

Trattamento di Biomasse vegetali e algali finalizzato all'ottenimento di energia. Potenziali sviluppi in Sardegna



Efisio Antonio Scano



**Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale
Università degli Studi di Cagliari
XXVII CICLO**

**Trattamento di Biomasse vegetali e algali finalizzato
all'ottenimento di energia. Potenziali sviluppi in Sardegna**



Efisio Antonio Scano

Supervisore

Prof. Daniele Cocco

Università degli Studi di Cagliari



Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale

Università degli Studi di Cagliari

XXVII ciclo

Questa Tesi può essere utilizzata, nei limiti stabiliti dalla normativa vigente sul Diritto d'Autore (Legge 22 aprile 1941 n. 633 e succ. modificazioni e articoli da 2575 a 2583 del Codice civile) ed esclusivamente per scopi didattici e di ricerca; è vietato qualsiasi utilizzo per fini commerciali. In ogni caso tutti gli utilizzi devono riportare la corretta citazione delle fonti. La traduzione, l'adattamento totale e parziale, sono riservati per tutti i Paesi. I documenti depositati sono sottoposti alla legislazione italiana in vigore nel rispetto del Diritto di Autore, da qualunque luogo essi siano fruiti.

A Betty

" Il vero viaggio della scoperta non consiste nel trovare nuove terre, ma nell'aver nuovi occhi."

Marcel Proust

Indice

Capitolo 1	1
Introduzione	1
1.1 Scopo del lavoro	3
1.2. Sviluppo della tesi.....	3
1.3 Nuovi contributi nel settore	4
Capitolo 2	5
La produzione di energia da biomasse	5
2.1 Le tecnologie di produzione di energia da biomasse: stato dell'arte.....	5
2.2 La pianificazione della produzione di energia da biomasse	12
Capitolo 3	15
Il settore delle biomasse in Sardegna	16
3.1 Il Piano regionale delle biomasse e il loro potenziale energetico in Sardegna.....	16
3.2 Potenzialità energetiche delle biomasse residuali in Sardegna	34
3.2.1 Metodologia di indagine.....	34
3.2.2 Risultati e discussione.....	34
3.2.3 Conclusioni.....	40
Capitolo 4	42
Impiego della Digestione Anaerobica	42
4.1 Applicazioni nel trattamento di biomasse residuali.....	43
4.2 I residui ortofrutticoli	43
4.2.1 Materiali e metodi.....	44
4.2.2 Impianto di digestione anaerobica su scala pilota	44
4.2.3 Campionamento, preparazione e caratterizzazione dei FVR	46
4.2.4 Procedure operative e monitoraggio del processo	47
4.2.5 Bilanci di massa e di energia	48
4.3 Risultati e discussione	50
4.3.1 Caratterizzazione chimico-fisica dei FVR.....	50
4.3.2 Risultati sperimentali su scala pilota	55
4.3.3 Bilanci di massa e di energia	58
4.4 Valutazione preliminare delle prestazioni di un impianto su scala industriale	62
4.5 I residui dell'industria delle patate.....	65
4.5.1 Materiali e metodi.....	66
4.5.2 Risultati e discussione.....	67
4.6 le colture dedicate e i residui dell'industria casearia e olearia	81
4.6.1 Materiali e metodi.....	82

4.6.2 Risultati e discussione.....	84
4.7 L'applicazione di tecniche statistiche multivariate per l'analisi del processo.....	93
4.8 Previsione della composizione dei prodotti di combustione del biogas.....	98
4.9 Conclusioni	103
Capitolo 5	105
La filiera delle biomasse forestali.....	105
5.1 Le biomasse forestali nella Provincia dell'Ogliastra.....	106
5.2 Stima della ritraibilità della biomassa per fini energetici.....	111
5.3 Materiali e metodi.....	119
5.3.1 Prelievo delle specie forestali.....	119
5.3.2 Preparazione dei campioni.....	120
5.3.3 Caratterizzazione chimico-fisica	121
5.3.4 Valutazione del potenziale energetico del territorio	121
5.3.5 Scelta della migliore tecnologia di conversione energetica impiegabile.....	122
5.4 Risultati e discussione	124
5.3.4 Valutazione del potenziale energetico del territorio	131
5.6 Conclusioni	138
Capitolo 6	139
L'impiego delle biomasse algali.....	139
6.1 Stato dell'arte.....	139
6.2 Approccio del <i>Design of Experiments</i>	142
6.3 Materiali e metodi.....	144
6.3.1 Fotobioreattori su scala di laboratorio e pilota.....	144
6.3.2 Valutazione del regime fluidodinamico dei reattori su scala pilota	145
6.3.3 Specie algale	147
6.3.4 <i>Medium</i> colturale.....	148
6.3.5 Modello di crescita.....	149
6.3.6 Campionamento e caratterizzazione della biomassa algale	150
6.3.7 Procedure operative e monitoraggio del processo	151
6.4 Risultati e discussione	151
6.5 Conclusioni	152
Capitolo 7.....	181
Conclusioni.....	181
Bibliografia.....	183
Pubblicazioni.....	198

Capitolo 1

Introduzione

Lo scenario energetico mondiale, descritto in numerosi rapporti delle principali agenzie internazionali, si presenta come un sistema in rapida evoluzione e con una domanda di energia primaria in continua crescita. Nel 2012 i consumi mondiali di energia primaria hanno superato il valore di 13.000 Mtep (IEA-2014) e con un andamento in aumento per via dell'impetuosa crescita economica dei paesi in via di sviluppo e dell'incremento demografico. L'81,7% di tali consumi è stato assicurato dai combustibili fossili, il 4,8% dal nucleare, il 2,4% dall'idroelettrico, il 10% dai biocombustibili e dai rifiuti e l'1,1% da geotermico, solare ed eolico nel loro insieme (IEA 2014).

Se si analizza il 14th *EurObserv'ER Report 2014 (The state of renewable energies in Europe)* si osserva che nell'Europa a ventotto la produzione di energia elettrica da biogas, rifiuti solidi urbani e biomasse solide è cresciuta nel 2013, in confronto al 2012, rispettivamente dell'11,9%, del 3,6% e del 3,7%. In Italia i corrispondenti incrementi sono stati pari, rispettivamente, a 54,0%, 1,9% e 5,5%. Sempre nel 2013 il consumo di biocarburanti nel settore dei trasporti è diminuito del 9,3% rispetto al 2012 nell'Europa a 28, mentre in Italia è diminuito dell'8,1%.

La distribuzione disuniforme delle fonti energetiche, segnatamente di quelle fossili, rende molti Paesi dipendenti da altri per il soddisfacimento del proprio fabbisogno energetico. Secondo Eurostat, l'Unione Europea a ventisette mostrava a Febbraio del 2013 una dipendenza media del 53,8%, mentre quella dell'Italia era pari all'81,3% (eunews.it), valore sceso, secondo quanto indicato dall'AEEGSI (Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas e il Sistema Idrico) nella Relazione annuale sullo stato dei servizi e sull'attività svolta (Marzo 2013), sotto all'80%, restando comunque alto e superato nell'UE a 27 soltanto da 5 Paesi. L'elevata dipendenza dalle fonti fossili pone pertanto molti Paesi nella necessità di diversificare le fonti energetiche e di ricorrere per quanto possibile all'impiego di fonti rinnovabili delle quali la più rappresentativa sono le biomasse.

Le biomasse sono particolarmente interessanti per il contributo al soddisfacimento delle esigenze energetiche del Pianeta, essendo la principale fonte energetica rinnovabile a livello mondiale. Esse, infatti, forniscono il 10% dell'energia primaria consumata, seguite dall'idroelettrico con il 2,2% e da altre fonti quali la geotermia, il solare e l'eolico complessivamente con lo 0,5% (IEA - 2013).

Le biomasse sono disponibili sulla terra tramite la fotosintesi, processo attraverso il quale il carbonio inorganico (CO₂), con l'apporto dell'energia solare, dell'acqua e di altri nutrienti, è convertito in sostanza organica. Le biomasse prodotte mediante la crescita delle piante sono definite come produzione primaria netta (PPN).

Attualmente la produzione primaria netta sulla terra è stimata approssimativamente in 52.500 Mtep a⁻¹ dei quali 29.600 Mtep a⁻¹ sono rappresentati dalle piante intere escluse le radici (Haberl *et al.*, 2010).

Le biomasse sono definite dalla Direttiva 2001/77/CE come "la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani".

Le biomasse possono essere utilizzate direttamente a fini energetici, attraverso il processo di combustione, o impiegate per ottenere, attraverso opportuni processi di trasformazione, combustibili solidi, liquidi o gassosi. Il loro impiego, però, non è diffuso in maniera omogenea: infatti, mentre nei Paesi in via di sviluppo esse coprono dal 34%

al 40% del fabbisogno energetico complessivo, nei Paesi industrializzati il loro contributo è nettamente inferiore e pari a circa il 3%.

Nei Paesi in via di sviluppo, comunque, la principale percentuale di utilizzo è legata agli impieghi tradizionali della biomassa legnosa in ambito domestico che, oltre ad essere inefficienti dal punto di vista energetico, generano diverse problematiche ambientali. L'apporto energetico delle biomasse in Europa è mediamente del 3,5%, ma con valori molto differenti tra i singoli Paesi: 17% in Svezia, 15% in Finlandia e 13% in Austria; in Italia il contributo delle biomasse al bilancio energetico nazionale è situato intorno al 2-3%.

La gran parte delle recenti proiezioni sul potenziale energetico delle biomasse da qui al 2050 indica valori compresi tra 715 Mtep a⁻¹ e 23.900 Mtep a⁻¹ (Hoogwijk *et al.*, 2003, Berndes *et al.*, 2003, Hoogwijk, 2004, Campbell *et al.*, 2008, Field *et al.*, 2008, Erb *et al.*, 2012). Tuttavia il valore più alto previsto è riportato in un lavoro di Smeets *et al.*, 2007 che indica un valore di 35.800 Mtep a⁻¹, cioè tre volte maggiore dei consumi mondiali attuali. Esso si basa sulla previsione di avere sistemi agricoli molto tecnologici e assume il completo soddisfacimento delle necessità alimentari e della tutela delle foreste (Dornburg *et al.*, 2010). Nel 2010 comunque la produzione di energia elettrica è stata piuttosto piccola rappresentando il 3,0% circa dei 3.345 TWh complessivamente prodotti (Commissione Europea, 2012). A dispetto di questo con la Direttiva 2009/28/EC sono state fissate quote legalmente vincolanti di energie rinnovabili nei consumi finali lordi per ciascuno stato membro dell'Unione Europea. Questo implica che entro il 2020 per il riscaldamento, il raffreddamento e la produzione di energia elettrica, si dovranno raggiungere con le biomasse 110 Mtep pari al 46% del valore di riferimento per le rinnovabili e al 9,4% dei consumi finali di energia europei. Questo significa passare da 114 TWh prodotti nel 2010 a 232 TWh nel 2020. Un incremento di questo genere però si potrà ottenere solamente se saranno disponibili tecnologie di conversione energetica più efficienti e costi di produzione inferiori a quelli attuali (Fiorese *et al.*, 2014).

Rispetto ad altre fonti rinnovabili (fotovoltaico, eolico) le biomasse hanno la possibilità di generare energia elettrica con continuità, caratteristica quest'ultima di estremo interesse per i gestori delle reti elettriche e per gli investitori. Una maggiore quota di utilizzo delle biomasse per la produzione di energia elettrica contribuirebbe da un lato a ridurre l'impatto sulle reti di distribuzione, dovuto attualmente ad un'elevata quota di energia prodotta da fonti non programmabili, dall'altro a stimare con precisione l'energia producibile e, di conseguenza, i ritorni economici degli investimenti. D'altra parte, a differenza delle fonti eolica e solare le biomasse hanno costi di esercizio più elevati, determinati dalla necessità di fornire, con continuità, la materia prima agli impianti.

Le biomasse, specificamente dedicate alla finalità energetica, possono essere prodotte con percorsi ("filiera") che possono impegnare porzioni molto ampie di territorio, il cui impiego in alternativa ad altri usi, non può essere giustificato solamente in termini di riduzione globale delle emissioni di diossido di carbonio. Devono essere considerati attentamente anche altri aspetti quali il conflitto con l'approvvigionamento alimentare, il benessere rurale, lo sfruttamento del suolo, la biodiversità, oltre alle implicazioni potenziali sui prezzi delle materie prime.

L'uso delle biomasse a fini energetici è stato, però ed è tuttora oggetto di controversie e polemiche, soprattutto per quanto riguarda l'impiego di specie vegetali d'interesse alimentare e di terreni agricoli. Oltre a quest'aspetto, certamente di primaria importanza, occorre tener conto anche di altri fattori. Infatti, se è vero che la coltivazione di specie vegetali a scopo energetico consente la diversificazione delle attività agricole, il recupero di aree abbandonate o lo sfruttamento di terreni non

destinabili a produzioni alimentari, non si può non considerare che essa richiede comunque l'impiego di risorse ed energia, di cui bisogna quindi valutare le ricadute ambientali.

Questa tesi di dottorato è stata svolta per valutare gli sviluppi della produzione di energia da biomasse in Sardegna, tenendo conto della disponibilità e della distribuzione di queste risorse sul territorio, e del contesto economico e ambientale. Nello specifico sono state prese in esame le potenzialità delle biomasse vegetali, residuali e algali.

1.1 Scopo del lavoro

Lo scopo fondamentale di questa tesi di dottorato è di verificare la potenzialità energetica delle biomasse vegetali e algali in Sardegna e in particolare la possibilità di impiego delle biomasse residuali nell'ambito di una pianificazione energetica e di una strategia di sviluppo a livello regionale. Un primo obiettivo è lo studio e la messa a punto di processi di digestione anaerobica su scala pilota per il trattamento di biomasse residuali sia come singolo substrato, sia come miscela di substrati differenti. Questo con lo scopo di ridurre le superfici agricole dedicate alle colture energetiche, eliminare la competitività con il settore alimentare, oltre che fornire una risposta alle problematiche ambientali create dai residui agroindustriali. Un secondo obiettivo è dato dalla messa a punto di una metodologia per la valutazione del potenziale energetico forestale di un sub-territorio regionale (Ogliastra), esportabile in tutta la regione e non solo, e per la scelta della migliore tecnologia di conversione energetica. Un ultimo obiettivo, infine, è la valutazione della possibilità d'impiego di una specie microalgale per l'ottenimento di energia sotto forma di olio vegetale, utilizzando per la crescita nutrienti presenti in reflui inquinanti.

Questo lavoro di ricerca è stato sviluppato contestualmente all'inizio delle attività della piattaforma Biocombustibili e Biomasse del Parco Scientifico e Tecnologico della Sardegna e ha richiesto l'avvio dell'intero sistema costituito dal laboratorio chimico e dagli impianti pilota nel settore della digestione anaerobica, delle colture microalgali e della pirolisi.

1.2. Sviluppo della tesi

Il **capitolo 1** fornisce una panoramica dell'intero lavoro e illustra le motivazioni all'origine di questa tesi. Il **capitolo 2** fa il punto sulle tecnologie di conversione energetica delle biomasse e descrive le problematiche e gli strumenti relativi alla pianificazione della produzione di energia da biomasse. Il **capitolo 3** descrive le potenzialità energetiche delle biomasse in Sardegna, illustra il piano regionale d'azione per le biomasse e spiega la metodologia di indagine impiegata per la ricognizione in tutta la regione. Mostra infine le enormi potenzialità delle biomasse residuali in questa regione e la loro importanza dal punto di vista energetico e ambientale. Il **capitolo 4** è relativo all'applicazione della digestione anaerobica nel trattamento di diverse biomasse residuali derivanti da attività di commercializzazione, agricole o agro-industriali: sono illustrati i processi di trattamento messi a punto su scala pilota per i residui ortofrutticoli, i residui dell'industria di trasformazione delle patate e per la sostituzione delle colture dedicate con residui dell'industria olearia e casearia. E' interessante notare che queste ultime prove sono state condotte in parallelo con un impianto industriale da 1 MW.

L'applicazione dell'analisi statistica multivariata ai risultati ottenuti con i diversi substrati consente di verificare quantitativamente le relazioni tra le diverse variabili implicate nel processo. Il **capitolo 5** è dedicato allo studio della potenzialità energetica

del territorio con maggiore indice di boscosità in Sardegna, a partire dalla disponibilità reale di biomasse forestali. E' eseguita una completa caratterizzazione chimico-fisica delle biomasse e compiuta la scelta della migliore tecnologia di conversione energetica mediante un criterio di decisione multi attributo. Il **capitolo 6** mostra i risultati dello studio della crescita della specie microalgale *Nannochloropsis oculata*, ottenuta con l'impiego di due taglie (6l e 120l) di fotobioreattori anulari del tipo " *bubble column*", dotati di sistema automatico di controllo. Sono esplorati diversi parametri che influenzano la crescita microalgale e le interazioni tra loro con l'approccio del *Design of Experiment* (DoE). E' stata studiata contestualmente anche la degradazione dell'azoto in due diverse forme, della quale però sono stati considerati solamente gli aspetti legati alla crescita della biomassa algale. L'obiettivo fondamentale è rappresentato dalla valutazione delle potenzialità in campo energetico delle microalghe ottenute nelle diverse condizioni. Nel **capitolo 7**, infine, sono riportate le conclusioni e i possibili sviluppi futuri nella produzione di energia mediante le biomasse di origine vegetale e algale in Sardegna.

1.3 Nuovi contributi nel settore

Un contributo fondamentale è stato fornito al settore della digestione anaerobica per il quale sono stati messi a punto processi di trattamento di residui ortofrutticoli, provenienti dal mercato del fresco e dalla trasformazione industriale, come singolo substrato e verificata la possibilità di installare impianti di piccola taglia (<50 kW).

Con riferimento a impianti di digestione anaerobica di taglia industriale, è stata altresì valutata la possibilità di giungere alla sostituzione di una quota importante (fino al 70%) di colture energetiche dedicate con biomasse residuali di origine agroindustriale, abbassando notevolmente i costi delle materie prime e incrementando la resa in metano. I risultati di quest'ultima attività sono stati confrontati con prestazioni fornite da un impianto industriale (1 MW_e) operante in Sardegna. L'applicazione di tecniche statistiche multivariate ha permesso uno studio completo delle variabili implicate nel processo di digestione anaerobica.

Un secondo contributo fornito dal lavoro di tesi è dato dallo sviluppo di un metodo per la valutazione del potenziale energetico di un determinato territorio e per la scelta della migliore tecnologia di conversione energetica, impiegando un metodo GIS con l'aggiunta dello strato informativo relativo alla carta della vegetazione e utilizzando un metodo di tipo multi attributo per la scelta della tecnologia migliore di conversione energetica.

I metodi e i risultati ottenuti nel corso di questa ricerca sono stati in parte impiegati per uno studio sulla potenzialità energetica delle biomasse di diversa origine in Sardegna. Infatti, nell'ambito della pianificazione territoriale della produzione di energia da biomasse, è stato realizzato uno specifico piano regionale per la produzione di energia da biomasse. Questo piano è tra i primi in Italia nel suo genere, ma sicuramente l'unico per quanto riguarda l'analisi delle potenzialità delle biomasse residuali e per l'approccio metodologico impiegato.

Un terzo contributo, infine, è dato dall'applicazione alla crescita microalgale dell'approccio del *Design of Experiment* (DoE) ha consentito di identificare le variabili statisticamente significative per il processo e di valutare le interazioni tra loro.

Capitolo 2

L'impiego delle biomasse nella produzione di energia è un tema complesso che coinvolge numerosi aspetti quali la conoscenza precisa della effettiva ritraibilità in un determinato territorio e delle caratteristiche chimico-fisiche, la disponibilità di tecnologie efficienti di conversione energetica e ultima, ma non meno importante, la gestione della catena di approvvigionamento. Quest'aspetto riveste una particolare importanza quando si utilizzano le biomasse residuali.

In questo capitolo sono analizzate le principali tecnologie impiegate per la conversione energetica delle biomasse e in particolare quelle termochimiche e biochimiche, oltre alla produzione di idrogeno. Nell'ambito termochimico sono illustrate la combustione, la gassificazione, la pirolisi, la pirogassificazione, la produzione di idrogeno, mentre nell'ambito biochimico la digestione anaerobica e la produzione di energia da microalghe. E' fatto un cenno alle bioraffinerie e sono presi in esame i principali ostacoli alla diffusione della produzione di energia da biomasse.

Una sezione specifica è stata riservata alle problematiche connesse con la pianificazione della produzione di energia da biomasse, alle metodologie impiegate per la stima della distribuzione spaziale delle risorse, dei potenziali energetici e per la scelta della migliore tecnologia di conversione.

La produzione di energia da biomasse

2.1 Le tecnologie di produzione di energia da biomasse: stato dell'arte

La scelta del percorso di conversione energetica più appropriato dipende da diversi fattori quali le caratteristiche della biomassa, la disponibilità di tecnologia e il tipo di prodotto richiesto (energia elettrica, calore, biocombustibili).

Le proprietà chimico-fisiche delle biomasse hanno un'importanza decisiva per la scelta del processo di conversione energetica. In particolare, sono rilevanti il rapporto Carbonio/Azoto (C/N) e l'umidità percentuale. Valori di C/N inferiori a 30 e di umidità superiori al 30% indirizzano la scelta verso processi di tipo biochimico (digestione anaerobica, digestione aerobica e fermentazione alcolica), mentre valori di C/N superiori a 30 e di umidità inferiori al 30% verso processi di tipo termochimico (combustione, gassificazione e pirolisi). Nel caso di residui costituiti da sostanze grasse, s'impiegano processi di conversione di tipo fisico-chimico per l'ottenimento di biocombustibili, mentre nel caso delle biomasse legnose sono adottati processi di macinazione, agglomerazione e compattazione (produzione di *pellet* e bricchette) per facilitarne il trasporto, lo stoccaggio e l'uso.

Le tecnologie al momento disponibili si collocano, in funzione del processo impiegato, allo stadio di ricerca e sviluppo, dimostrativo o commerciale e sono rappresentate fondamentalmente da processi termochimici, biochimici e meccanici.

La combustione e la gassificazione delle biomasse solide sono tecnologie consolidate, perlomeno su piccola scala (0,01-10 MW), per la produzione combinata di energia elettrica e calore. La co-combustione di carbone e biomasse è ormai una tecnologia collaudata per sfruttare l'elevata efficienza degli impianti di grossa taglia. La *Fast* pirolisi consente la produzione di un olio ad alta densità energetica rispetto alla biomassa originaria. La digestione anaerobica (DA) rappresenta la strada migliore da percorrere per il trattamento di biomasse con elevata umidità e con diversa origine e per la produzione di biogas.

Combustione

La produzione di energia elettrica da biomasse, mediante processi di combustione, fa uso di tecnologie consolidate, basate molto spesso su turbine o motori a vapore. Questi ultimi sono disponibili per potenze comprese tra 50 kW e 1 MW, mentre le turbine a vapore si situano in un intervallo compreso tra 0,5 MW e 500 MW. Gli impianti a vapore su piccola scala impiegano caldaie a tubi di fiamma, mentre le turbine sono monostadio o multistadio. Gli impianti con potenza inferiore a 1 MW usualmente operano con efficienze elettriche del 10-12% e con efficienze termiche dell'ordine del 70%. Infatti, a causa del basso rendimento elettrico questi impianti operano spesso in modalità cogenerativa, con la produzione combinata di energia elettrica e calore processo (CHP). I motori a vapore, anch'essi, possono operare in singolo stadio o in multiplo stadio con efficienze tra il 6% e il 10% nel primo caso e del 12%-20% nel secondo caso. I motori a vapore possono operare con vapore saturo, hanno una vita operativa prolungata e bassi costi di manutenzione. I grandi impianti a ciclo Rankine basati su turbine a vapore fanno uso di caldaie a tubi di acqua, con surriscaldatori e talvolta anche risurriscaldatori. Nell'intervallo di potenza compreso tra 5 e 10 MW sono possibili efficienze elettriche nette intorno al 25%. Si possono raggiungere efficienze elettriche anche del 40% con impianti di taglia intorno ai 50 MW.

Con impianti cogenerativi, il rendimento globale (termico+elettrico) aumenta significativamente, ma il rendimento elettrico tendenzialmente diminuisce. Date le problematiche dovute alla grande necessità di biomasse per gli impianti su larga scala e alle lunghe distanze da affrontare per il trasporto, un'interessante opportunità per mantenere un elevato rendimento elettrico è rappresentata dalla co-combustione in impianti alimentati con combustibili fossili (Cocco *et al.*, 2008).

Nonostante l'uso di biomasse nella co-combustione porti a una riduzione delle emissioni di NO_x e SO_x, si hanno una serie di effetti secondari negativi quali corrosioni e incrostazioni delle apparecchiature. Per queste ragioni s'impiega normalmente un contenuto in biomasse nel combustibile primario dell'ordine del 5-10% per minimizzare gli effetti sulle ceneri e i residui. L'applicazione principale comunque è data dalla co-combustione di biocombustibili suddivisi finemente in caldaie a polverino di carbone (Nussbaumer, 2003).

In alternativa agli impianti convenzionali a vapore, nel campo di potenza tra 0,5 MW e 2 MW sono ormai disponibili gli impianti a ciclo Rankine (ORC). Questi possono operare senza surriscaldatori poiché l'espansione del vapore saturo del fluido organico conduce a vapore secco (Dong *et al.*, 2009, Bianchi *et al.*, 2009, Maraver *et al.*, 2013).

I rendimenti elettrici degli impianti ORC sono intorno al 15-25%, in relazione alla taglia ed al livello tecnologico, cosicché anche questi sistemi trovano spesso le migliori condizioni di funzionamento in modalità cogenerativa.

Per gli impianti di piccola taglia (alcune decine di kW), in combinazione con caldaie a biomassa, stanno diventando interessanti anche i motori a ciclo Stirling che impiegano come fluido di processo Elio, Idrogeno o Azoto. Una volta che la tecnologia sarà adeguatamente sviluppata, essi potranno rappresentare certamente un'interessante alternativa ai sistemi convenzionali (Maraver *et al.*, 2013).

La combustione delle biomasse è dunque una tecnologia affidabile, praticabile su larga scala e recentemente anche su impianti di piccola scala. La configurazione tecnica degli impianti, maggiormente impiegata per la produzione di energia elettrica fa uso delle caldaie abbinate con i cicli a vapore. I prodotti sono rappresentati da energia elettrica e calore oppure da entrambi. Le dimensioni degli impianti CHP sono determinate dalla richiesta di energia termica che non sempre è sufficiente a livello locale, o presenta dei picchi stagionali.

Per questa ragione gli sviluppi futuri sono orientati alla combinazione con sistemi solari e pompe di calore. La trigenerazione e quindi la creazione di distretti del freddo potranno rendere applicabile questo modo di generazione dell'energia anche in regioni nelle quali si registrano temperature elevate (Maraver *et al.*, 2013). Inoltre, i motori Stirling con basse capacità produttive (10-100 kW_e) e gli impianti ORC sono tecnologie promettenti per installazioni su piccola e micro scala per la cogenerazione distribuita di energia. La maggiore difficoltà che si rileva per l'applicazione della combustione delle biomasse risiede nell'approvvigionamento delle materie prime per gli impianti su larga scala (10-100 MW).

Un problema di non semplice soluzione, infine, è rappresentato dallo smaltimento delle ceneri che, in assenza di altri impieghi, può essere abbastanza costoso. In ogni caso gli impianti per la combustione delle biomasse sono convenienti solamente quando si ha la disponibilità di materie prime a breve distanza e a basso costo, oppure si hanno incentivi da parte dello stato.

Gassificazione

La gassificazione è la conversione termochimica delle biomasse in un gas combustibile (*syngas*) mediante l'ossidazione parziale a elevate temperature. La gassificazione è un processo molto versatile e potenzialmente applicabile a una vasta tipologia di biomasse. Tuttavia è spesso necessario sottoporre le biomasse a pretrattamenti di riduzione delle dimensioni e di essiccazione fino a un'umidità del 10-20% e questo è vero soprattutto per gli impianti a letto fluido. Il *syngas* ottenuto viene poi generalmente utilizzato per alimentare impianti di generazione elettrica, spesso operanti in cogenerazione, basati su motori a combustione interna, turbine a gas o cicli combinati gas/vapore. Le potenze installate per questi impianti si situano a poche centinaia di kW per la produzione di calore, tra 100 kW_e e 1 MW_e per unità CHP e tra 30 MW_e e 100 MW_e per cicli integrati e combinati di gassificazione.

Normalmente sono impiegati tre agenti gassificanti quali l'aria, l'ossigeno o il vapore d'acqua in funzione delle caratteristiche del *syngas* che si vuole ottenere.

Dal punto di vista impiantistico s'impiegano gassificatori a letto fisso, fluido o trascinato (Ruiz *et al.*, 2014).

I gassificatori a letto fisso sono generalmente alimentati con aria o vapore e quindi producono un *syngas* con basso potere calorifico. La tecnologia è semplice, i costi di gestione bassi, sono adatti per impianti fino a 2,5 MW_e e possono essere alimentati con biomasse a elevata umidità.

I gassificatori a letto fluido, nelle versioni a letto fluido bollente, circolante e trascinato, sono disponibili fino a una taglia di 100 MW_t e sono spesso abbinati a impianti a ciclo combinato, con un rendimento elettrico tra il 40 e il 50%.

I gassificatori a letto fluido inoltre devono essere alimentati con biomasse legnose che presentano un elevato punto di fusione delle ceneri (>1000°C), mentre non sono adatti per trattare biomasse erbacee che hanno un punto di fusione delle ceneri talvolta inferiore ai 700°C, poiché questo valore rappresenta un limite per la temperatura di esercizio del gassificatore stesso.

L'impiego del *syngas* nei motori alternativi provoca una diminuzione della potenza prodotta del 15-20% e nei motori di piccola taglia i rendimenti elettrici non sono molto elevati e possono raggiungere al massimo il 25%, mentre nei motori di grossa taglia possono arrivare fino al 30%. Se si considerano sistemi che operano in co-generazione, si possono ottenere comunque rendimenti complessivi dell'80-85%. In Europa sono presenti peraltro numerose installazioni che abbinano impianti di gassificazione con motori a combustione interna con potenze variabili da qualche centinaio di kW_e a 5

MW_e. Un settore molto importante per l'impiego del *syngas* è rappresentato dalla generazione di energia mediante turbine a gas. In questo caso l'energia termica non convertita in lavoro e disponibile allo scarico della turbina può essere recuperata per usi cogenerativi anche ad alta temperatura. Un'altra soluzione tecnologica in questo campo è rappresentata dalle turbine a gas con iniezione di vapore nelle quali l'energia termica allo scarico viene utilizzata per la produzione di vapore che poi può essere iniettato, tutto o in parte, nella camera di combustione della turbina a gas con aumento della potenza e del rendimento.

E' interessante notare come per la produzione di energia elettrica su grande scala si impieghino sistemi IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*) alimentati con carbone o TAR di raffineria e basati su impianti a ciclo combinato gas/vapore, ottenendo rendimenti del 45-48%, ma che comunque nel caso dei sistemi a biomasse BGCC (*Biomass Gasification Combined Cycle*) si raggiungono rendimenti fino al 45% o superiori. Questi ultimi però sono sostenibili economicamente solamente nel caso di impianti di grande taglia (40-50 MW_e). Un'altra possibilità per gli impianti di piccola taglia è la combinazione con impianti convenzionali di grande taglia, miscelando il *syngas* prodotto dai primi con gas naturale. Per gli impianti di piccola taglia ultimamente sono apparse sul mercato le microturbine a gas che presentano potenze elettriche tra 30 e 200 kW_e e rendimenti elettrici dell'ordine del 25-30% (Bocci *et al.*, 2014, Bianchi *et al.*, 2009).

Un'ultima considerazione, infine, riguarda l'impiego del *syngas* nelle celle a combustibile eventualmente integrate con microturbine a gas. Infatti, se il *syngas* è depurato in modo appropriato, può essere impiegato nelle celle a combustibile ad alta temperatura (*Solid Oxide Fuel Cell* e *Molten Oxide Fuel Cell*) integrate con microturbine a gas.

L'applicazione della gassificazione in impianti ad alta efficienza e basso impatto ambientale presenta ancora notevoli difficoltà pratiche dovute a:

- scelta del tipo di biomasse da utilizzare;
- difficile controllo della dinamica delle reazioni all'interno del gassificatore;
- presenza di contaminanti, fra cui idrocarburi a catena lunga (*tar*) che possono condensare quando il gas viene raffreddato, causando notevoli danni alle parti meccaniche degli impianti (Sharma *et al.*, 2013).

I vantaggi della gassificazione rispetto alla combustione sono l'elevato rendimento di generazione elettrica, anche su piccola scala, le interessanti prospettive di utilizzo in impianti di cogenerazione (CHP) e soprattutto le emissioni più contenute.

Pirolisi

La *Fast* pirolisi, condotta a temperature comprese tra 450 e 500°C e con tempi di residenza inferiori ai 5 s, fornisce un olio con un potere calorifico di circa 17 MJ kg_{ss}⁻¹ e risulta di particolare interesse scientifico e industriale.

Dal punto di vista della ricerca e sviluppo il settore della pirolisi si mostra piuttosto promettente per quanto concerne lo spettro di attività di sperimentazione che si possono condurre. In particolare sono in fase di studio sistemi di pirolisi che operano in atmosfera di idrogeno, sistemi di pirolisi che fanno impiego di collettori solari per la fornitura dell'energia termica necessaria al processo e sistemi che operano sotto vuoto. E' ormai consolidata la pirolisi catalitica, nella quale, utilizzando catalizzatori a base di ferro, zeoliti, allumina, cromo, è possibile pilotare la qualità finale dell'olio.

Nel campo della conversione termochimica, comunque, la pirolisi *Fast* è una tecnologia di potenziale interesse a patto che si riescano ad ottenere rilevanti miglioramenti qualitativi dei diversi prodotti (Meier *et al.*, 2013, Radlein *et al.*, 2013).

Sono stati, infatti, condotti numerosi studi sull'impiego dell'olio di pirolisi in motori a combustione interna a ciclo Diesel, ma le caratteristiche dell'olio stesso richiedono ancora la messa a punto di attività di *upgrading* che lo rendano idoneo a tale impiego.

Alcuni aspetti riguardano le proprietà aggressive nei confronti dei materiali che costituiscono i motori, altri alla viscosità che ne richiede il preriscaldamento. Si sta valutando l'impiego in turbine a gas in sistemi di piccola taglia (70 kW_e) e di grande taglia (2,5 MW_e) che ne hanno dimostrato la concreta possibilità d'uso.

Sono stati sperimentati con successo la co-combustione con carbone e con gas naturale in caldaie di diversa potenza che richiedono però modifiche al sistema di alimentazione. Sono in corso, infine, sperimentazioni sui motori Stirling di piccola potenza (5-10 kW_e), ma i risultati sono ancora parziali e pertanto deve essere eseguito ancora molto lavoro sperimentale.

Le problematiche maggiori connesse all'impiego della pirolisi sono le seguenti:

- la qualità dei prodotti, che non ha ancora raggiunto un livello sufficientemente adeguato per applicazioni con turbine a gas e con motori diesel;
- il gas non risulta stoccabile e richiede un impiego immediato in prossimità dell'impianto;
- il bio olio non è stabile e pertanto non è conservabile per lungo tempo.

I cicli combinati a olio pirolitico appaiono i più promettenti, soprattutto in impianti di grande taglia, mentre i motori a ciclo diesel, alimentati con prodotti di pirolisi, sembrano più adatti a impianti di piccola potenzialità.

I vantaggi della pirolisi sono comunque i seguenti:

- valorizzazione di biomasse e rifiuti mediante la trasformazione in combustibili di maggior pregio, con più alta densità energetica;
- ampia flessibilità del processo e dei prodotti;
- minori emissioni inquinanti rispetto ad altri processi termochimici;
- possibilità di realizzare impianti di piccola taglia promuovendo biomasse da filiera corta;
- capacità di utilizzare materiali diversi, evitando problematiche e vincoli legati alla stagionalità di una particolare biomassa.

Pirogassificazione

La pirogassificazione è un processo di conversione termochimica che si sviluppa in due stadi: pirolisi e gassificazione. La pirolisi è condotta a temperature variabili tra 300 e 600°C, mentre la gassificazione a temperature comprese tra 1000 e 1100 °C. In queste condizioni nel primo stadio si originano olio, gas di pirolisi e carbone.

Il carbone è parzialmente combusto con ossigeno e aria, mentre il gas di pirolisi è sottoposto a *reforming* in fase vapore. Il prodotto finale è costituito da un gas che può essere impiegato in motori a combustione interna o in turbine gas per la produzione di energia elettrica ed eventualmente anche termica in cogenerazione. Il vantaggio principale è dato dal fatto che il gas può essere impiegato immediatamente nel luogo di produzione, oppure inviato a gasometri o trasportato mediante gasdotti direttamente ai punti di utilizzo (Arioli, 2009).

Digestione anaerobica

La digestione anaerobica è la conversione di materiali organici in biogas mediante l'azione dei batteri in assenza di ossigeno. Questo processo è particolarmente adatto per il trattamento di biomasse umide quali colture dedicate, residui colturali, agroindustriali, delle attività zootecniche, fanghi di depurazione (Madsen *et al.*, 2011,

De Meester *et al.*, 2012). Al momento in Europa (con il maggior numero d'installazioni in Germania) è presente un grande numero di impianti che tratta principalmente colture dedicate, ma anche residui di attività agricole e industriali (Lebuhn *et al.*, 2014). Il prodotto è rappresentato dal biogas che deve essere purificato per essere impiegato nella produzione di energia termica ed elettrica, poiché contiene umidità e sostanze indesiderabili quali il solfuro di diidrogeno.

La digestione anaerobica è una tecnologia disponibile a livello commerciale sebbene i risultati economici dipendano dalla disponibilità di materie prime a basso costo e dagli incentivi alla produzione di energia. Il biogas può essere impiegato nei distretti termici o per la cogenerazione di energia elettrica e termica in impianti di piccola potenza.

Il biogas può anche essere sottoposto a raffinazione per l'ottenimento di metano puro impiegabile in rete o come combustibile per autotrazione. A livello commerciale sono disponibili diverse tecnologie quali l'assorbimento, l'assorbimento con pressione variabile, mentre a livello dimostrativo s'impiegano sistemi criogenici e tecnologie a membrana (Andriani *et al.*, 2010, Ryckebosch *et al.*, 2011, Scholz *et al.*, 2013).

Gli impianti a biogas hanno potenze in genere comprese tra 250 kW e 2,5 MW e l'efficienza di conversione elettrica è compresa tra il 32% e il 45%. Sta emergendo la possibilità di realizzare impianti di piccola taglia (<50 kW) impiegabili in situazioni specifiche e in particolare per il trattamento di biomasse residuali in unità commerciali, produttive o agricole di piccola dimensione (Scano *et al.*, 2014). La realizzazione di questi impianti richiede la messa a punto di processi specifici non sempre semplici da progettare. Altre questioni concernenti la ricerca in questo settore riguardano la sostituzione delle colture dedicate con biomasse residuali, per minimizzare il costo delle materie prime alimentate agli impianti e destinare diversamente le superfici agricole impegnate (Mata-Alvarez *et al.*, 2014, Asquer *et al.*, 2014).

La digestione anaerobica e in particolare la realizzazione di piccoli impianti consentirebbero di attuare la generazione distribuita dell'energia con la creazione di *smart grid* a livello locale di sicuro interesse per i singoli territori. La conversione delle biomasse residuali in biogas porta significativi benefici ambientali, ma, come avviene per altri substrati, residua il digestato che a tutt'oggi rappresenta un problema importante anche perché l'uso come fertilizzante (ancorché indicato in numerosi lavori scientifici) non sempre è realizzabile in modo efficace (Möller *et al.*, 2012).

Un aspetto cruciale, infine, è rappresentato dall'impiego dell'energia termica che, data la localizzazione degli impianti in zone rurali trova raramente impiego e spesso è dispersa nell'ambiente. In questo caso è necessario studiare applicazioni efficaci dell'energia termica quali per esempio l'impiego nella valorizzazione di residui agroindustriali nello stesso campo energetico o in altri settori.

Energia da microalghe

Le microalghe sono organismi fotosintetici microscopici che si ritrovano nelle acque marine e dolci. Data la loro semplice struttura cellulare e l'immersione in un mezzo acquoso, esse hanno un efficiente accesso all'acqua, alla CO₂ e a numerosi altri nutrienti, per cui presentano una notevole efficienza nella conversione dell'energia solare in biomasse (Demirbaş *et al.*, 2010). La proprietà che maggiormente ha attratto l'attenzione del mondo scientifico e industriale è la capacità di produrre olio con rese notevolmente più elevate rispetto alle migliori colture oleaginose finora note. Inoltre il processo di crescita delle microalghe richiede l'apporto di anidride carbonica, cosicché esse offrono la possibilità di catturare la CO₂ emessa durante altri processi industriali. Infine, le colture algali non solo non richiedono l'utilizzo di terreni fertili e acqua potabile, e quindi non competono con il settore delle colture alimentari, ma possono anche essere impiegate come mezzo di denitrificazione/defosforazione di acque reflue

e come mezzo di rimozione di metalli pesanti tossici (Luz E. de Bashan *et al.*, 2010, Sturm *et al.*, 2011, Hernández *et al.*, 2013).

Per ottenere la crescita delle microalghe sono stati fondamentalmente sviluppati due sistemi: aperti o *open ponds* e chiusi (fotobioreattori). Gli *open ponds* sono in genere grandi vasche, stagni, canali, unità a circolazione di acqua bassa. I *race-way ponds* rappresentano la configurazione tecnica degli impianti maggiormente utilizzata per le colture microalgali. Consistono in vasche all'aperto della profondità di 20-50 cm, nelle quali il movimento dell'acqua è garantito da pale meccaniche (Brennan *et al.*, 2010, Chiaramonti *et al.*, 2013).

I fotobioreattori hanno diverse configurazioni e possono essere costituiti da un insieme di tubi di plastica o in vetro, chiusi, allineati verticalmente, orizzontalmente oppure inclinati. I fotobioreattori a colonna sono quelli che consentono, una miscelazione più efficace, elevati tassi di trasferimento di massa e la crescita delle microalghe in strette condizioni di controllo. Le colonne verticali sono aerate con diffusori posti sul fondo e illuminati attraverso pareti trasparenti (Scragg *et al.*, 2002, Ugwu *et al.*, 2008, Posten, 2009, Brennan *et al.*, 2010, Kunjapur *et al.*, 2010, Chen *et al.*, 2011).

Dalle alghe si possono estrarre molecole ad alto valore aggiunto quali acidi grassi, pigmenti e isotopi stabili. Le biomasse derivate dalle microalghe sono impiegate come alimenti nell'acquacoltura, mentre le biomasse algali di scarto dell'industria e dell'acquacoltura trovano impiego come fertilizzanti naturali (Yen *et al.*, 2013).

L'utilizzo più interessante delle microalghe dal punto di vista industriale è quello che prevede la produzione di oli destinati all'uso energetico diretto o alla produzione di biodiesel. Le microalghe presentano, infatti, rese di produzione dell'olio per unità di superficie, circa venticinque volte superiori rispetto a quelle ottenibili con la palma che è la coltura oleaginosa più produttiva (Chisti, 2007, Scott *et al.*, 2010, Mata *et al.*, 2010, Ahmad *et al.*, 2011, Demirbaş, 2011, Kirrolia *et al.*, 2013).

In questo momento però i costi di produzione delle microalghe sono particolarmente alti e di conseguenza sono elevati anche i costi degli oli che si ottengono. Questo perché ci sono numerosi ostacoli scientifici e tecnici associati con la progettazione dei fotobioreattori e soprattutto con la raccolta, l'essiccamento e il trattamento della biomassa algale (Dragone *et al.*, 2010).

Bioraffinerie basate su biomasse

Una prospettiva interessante per accrescere la competitività della produzione di energia da biomasse è rappresentata dalle bioraffinerie. Una bioraffineria è la trasformazione sostenibile della biomassa in uno spettro di prodotti commerciabili quali: alimenti, mangimi per animali, materiali, sostanze chimiche ed energia (IEA Bioenergy Task 42). Le bioraffinerie hanno superato lo stadio concettuale, ma le vie per ottenere il ventaglio di possibili prodotti devono ancora essere identificate con precisione, poiché sono possibili numerosi percorsi in funzione delle biomasse che si hanno a disposizione.

Idrogeno da biomasse

Un'altra possibilità fornita dalle biomasse è rappresentata dalla produzione di idrogeno mediante fermentazione, digestione anaerobica seguita dal *reforming* del metano, gassificazione seguita dall'*upgrading* e dal *reforming* del *syngas*, pirolisi e *reforming* dell'olio, produzione mediante microalghe. Tuttavia questi processi sono ancora allo stadio di laboratorio e richiedono nuove attività di ricerca e sviluppo (Ni *et al.*, 2006, Saxena *et al.*, 2008).

I principali ostacoli alla diffusione della produzione di energia da biomasse sono rappresentati dai costi maggiori rispetto ai combustibili fossili, dalle basse efficienze di conversione energetica e dall'indisponibilità di materie prime a basso costo. Quest'ultima voce è decisiva per lo sviluppo nel lungo periodo della produzione di energia da biomasse su ampia scala. Sono richiesti alla ricerca sforzi per individuare nuove materie prime, progettare processi innovativi di produzione dell'energia, incrementare la produttività e sviluppare catene di approvvigionamento affidabili.

Anche per questo l'attenzione si è particolarmente rivolta verso le biomasse residuali del settore agricolo e di quello industriale, il cui impiego a scopo energetico consente di trasformare materiali di scarto, per i quali occorrerebbe affrontare le procedure ed i costi di smaltimento, in fonti energetiche.

Naturalmente, essendo le biomasse residuali molto diverse tra loro per origine e caratteristiche, occorre di volta in volta individuare la tecnologia migliore per il loro sfruttamento a fini energetici.

Al fine di programmare un utilizzo sostenibile delle biomasse residuali in un determinato territorio è necessario eseguire un'accurata stima delle potenzialità energetiche e dei vincoli che ne possono influenzare l'impiego. Diversi studi presenti nella letteratura scientifica riportano la stima del potenziale dei residui agricoli (Brian *et al.*, 2008, Jingura *et al.*, 2008, Shuit *et al.*, 2009) e forestali (Huang *et al.*, 2010, Viana *et al.*, 2010, Mc Farlane *et al.*, 2009, Kinoshita *et al.*, 2009, Lopez-Rodriguez *et al.*, 2009) basata sulla resa, sulle superfici, sui fattori di disponibilità, quali per esempio il rapporto con i vegetali freschi e la frazione non asportabile dall'area prescelta.

Studi di questo tipo sono stati svolti a livello regionale (Fernandes *et al.*, 2010, Vasco *et al.*, 2009, Beccali *et al.*, 2009, García-Maraver *et al.*, 2012), nazionale (Havličková *et al.*, 2005, Karaj *et al.*, 2010, Ćosić *et al.*, 2011) e globale (Hoogwijk *et al.*, 2003).

L'uso di biomasse residuali contribuisce alla quota di produzione di energia da fonti rinnovabili necessaria per il soddisfacimento degli impegni internazionali, riduce la dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili e contribuisce a uno smaltimento sostenibile di rifiuti che potrebbero altrimenti avere un elevato impatto ambientale.

Lo sfruttamento a fini energetici delle biomasse residuali, la gestione razionale delle risorse forestali e il miglioramento delle pratiche agricole possono contribuire a un notevole incremento nell'uso di questo tipo di biomasse (Scano *et al.*, 2014).

2.2 La pianificazione della produzione di energia da biomasse

L'uso efficace delle biomasse in campo energetico richiede un'accurata pianificazione della produzione di energia attraverso l'individuazione dei possibili scenari evolutivi dei fabbisogni e dei consumi. Le previsioni dei consumi sono legate direttamente alle previsioni dello sviluppo economico e sociale dei differenti territori e presentano una molteplicità di vincoli, in massima parte derivanti dai contesti nazionali e internazionali (Kwon *et al.*, 2013).

La determinazione degli scenari di sviluppo di consumo energetico si riferisce in genere a tre settori di riferimento: elettrico, termico e dei trasporti.

L'obiettivo fondamentale è quello della maggiore sostituzione possibile delle fonti primarie, nella produzione di energia elettrica e termica, attraverso l'uso razionale delle biomasse disponibili.

Un'altra possibilità è data dal sostegno alle coltivazioni energetiche, dedicate anche alla produzione di biocombustibili, qualora le condizioni generali di mercato siano favorevoli o ci siano specifiche norme di legge. In generale la pianificazione della produzione di energia da biomasse si può attuare a tre diversi livelli: globale, nazionale, regionale che comunque sono molto legati tra loro.

Il livello globale deve tenere conto della limitata disponibilità di risorse e di aspetti che si riferiscono alla protezione ambientale e ai cambiamenti climatici. Il livello nazionale coinvolge i governi dei singoli paesi che hanno responsabilità non solo nei confronti dei singoli cittadini, ma anche della comunità internazionale. Il livello locale (regionale) è legato direttamente all'uso dell'energia all'interno di una regione e deve tenere conto delle specificità del territorio, in altre parole delle condizioni socio-economiche attuali, dello sviluppo economico previsto e dei risvolti ambientali (Domac *et al.*, 2011).

Pianificare la produzione di energia da biomasse in una determinata regione significa conoscerne profondamente la struttura, le peculiarità e la vocazione dei territori, le attività economiche principali e secondarie sia in campo agricolo sia nei settori artigianale e industriale (Kautto *et al.*, 2012).

Lo sviluppo di un piano regionale per la produzione di energia da biomasse deve passare attraverso due stadi fondamentali:

- la ricognizione delle risorse disponibili nel territorio di riferimento

- l'adozione delle strategie ritenute più adeguate e lo sviluppo del piano stesso.

Il primo stadio rappresenta il punto di partenza e deve portare all'ottenimento di dati con il maggiore grado di affidabilità possibile in termini di previsione dei consumi, caratteristiche delle biomasse disponibili, potenziale energetico stimato, impianti di produzione eventualmente presenti e tecnologie di conversione energetica più adeguate.

Il secondo stadio comprende la creazione del piano vero e proprio con la definizione della strategia generale, dei piani specifici e l'integrazione con le politiche energetiche nazionali.

L'individuazione del fabbisogno energetico a livello regionale richiede la determinazione della richiesta di energia termica ed elettrica a livello domestico, agricolo industriale e dei servizi. La richiesta di energia termica a livello domestico è determinata dai consumi di acqua calda, dal riscaldamento e dipende dallo stato e dall'età delle costruzioni e dallo standard di vita degli occupanti.

Nello specifico questa valutazione richiede la conoscenza dettagliata del patrimonio edilizio esistente, dell'impiego di combustibili, pompe di calore e pannelli solari.

La richiesta di energia termica per il settore dei servizi è correlata con gli stessi parametri impiegati per i consumi domestici.

A livello industriale, invece, la situazione si presenta più complessa perché sono impiegati (soprattutto nel campo alimentare, ma non solo) processi a bassa o elevata temperatura che hanno bisogno di acqua calda e vapore, o l'impiego diretto del calore prodotto.

Inoltre l'assenza di misure puntuali dei consumi, sempre presente invece nel settore dell'energia elettrica, fa sì che i dati presentino elevate incertezze nella valutazione (Scano *et al.*, 2013).

La determinazione della richiesta di energia elettrica presenta minori difficoltà poiché i consumi a tutti i livelli sono puntualmente misurati e registrati. Più difficile è la previsione dello sviluppo della domanda giacché quest'ultima può essere fortemente condizionata dall'evoluzione della situazione socio-economica del territorio di riferimento.

La conoscenza delle caratteristiche chimico-fisiche delle biomasse riveste una grande importanza per la scelta del processo di conversione energetica e per le conseguenti problematiche di processo che possono insorgere. Le proprietà chimico-fisiche delle biomasse di maggiore interesse per i processi di conversione energetica sono l'umidità, il potere calorifico, il rapporto tra carbonio fisso e sostanze volatili, il contenuto in ceneri, metalli alcalini, cloro e zolfo, il rapporto tra cellulosa e lignina.

Le prime cinque caratteristiche sono importanti per i processi di conversione di biomasse secche, mentre le rimanenti due per i processi di conversione di biomasse umide (Mc Kendry, 2002).

La stima del potenziale energetico di un determinato territorio è un'attività veramente complessa e la mappatura esatta delle diverse risorse impiegabili dal punto di vista energetico richiede notevoli sforzi e la costruzione di appropriati modelli per la previsione della ritraibilità e di conseguenza dell'effettiva disponibilità. Infatti, nella valutazione del potenziale energetico occorre tenere conto:

- della superficie coperta da foreste, dei tagli annuali e dei residui;
- delle aree marginali (arbusteti, cespuglieti e altre tipologie di coperture);
- delle aree dedicate all'agricoltura e conseguentemente dei residui colturali;
- della presenza ed entità di industrie agroalimentari;
- della presenza di industrie per la lavorazione del legno e quindi dei residui;
- della presenza di allevamenti.

Nella stima del potenziale energetico di un determinato territorio si deve considerare attentamente la distribuzione geografica delle biomasse che in generale presenta una certa dispersione, oppure una distribuzione non omogenea nel territorio.

Questo fatto ha determinato l'impiego dei sistemi di informazione geografica (GIS) per la valutazione dell'approvvigionamento delle biomasse, delle loro caratteristiche, per la stima dei costi di trasporto agli impianti esistenti, ma anche per la scelta dei siti da destinare allo sviluppo di colture dedicate (Viana *et al.*, 2010, Zhang *et al.*, 2011, Zambelli *et al.*, 2012, Calvert *et al.*, 2014).

L'uso dei GIS nella selezione dei siti è stato mirato all'identificazione dei siti ottimali per lo sviluppo di colture energetiche in funzione della produzione attesa di biomasse o del loro conferimento presso impianti di conversione energetica preesistenti. L'analisi del potenziale energetico delle biomasse deve stimare con precisione la disponibilità teorica, quella effettiva e prendere in esame infine tutti gli aspetti concernenti il possibile impiego tecnologico ed economico.

Il livello identificato di distribuzione spaziale del potenziale energetico rappresenta la base per la valutazione della disponibilità della biomassa per la produzione di energia e la valutazione economica dell'installazione di nuovi impianti (Voivontas *et al.*, 2001).

Nel caso delle colture energetiche, per esempio, il percorso utilizzato prevede la selezione delle specie, l'individuazione dei suoli più adatti alle colture di interesse, la valutazione della disponibilità di superfici, la scelta del suolo e la localizzazione dell'impianto di conversione energetica (Fiorese *et al.*, 2010).

Una volta noto il potenziale energetico è possibile identificare con precisione le tecnologie di conversione energetica più idonee al territorio di interesse utilizzando strumenti decisionali di supporto, quali i sistemi di supporto decisionale ambientale (SSDA). Diversi lavori presenti in letteratura descrivono il ruolo degli SSDA nella gestione ambientale (Rizzoli *et al.*, 1997, Matthies *et al.*, 2007, Frombo *et al.*, 2009).

Un sistema SSDA è costituito da modelli ambientali, *databases* a strumenti di valutazione accoppiati e integrati con un'interfaccia grafica e sviluppati con sistemi (GIS). Tali sistemi sono stati utilizzati a livello internazionale, nazionale e locale per il trattamento delle biomasse (Noon *et al.*, 1996, Nagel, 2000) e hanno considerato le dimensioni e le caratteristiche degli impianti di produzione di energia termica, il costo dei combustibili e le emissioni di gas serra (Frombo *et al.*, 2009).

Un'altra possibilità è data dall'impiego di metodi di decisione multi attributo (MADM) (Pugh 1981, Frei *et al.* 2009) che consente per esempio, di identificare la migliore configurazione tecnica degli impianti per la regione di interesse (Melis *et al.*, 2014). Il metodo MADM è rappresentato graficamente da una matrice nella quale le colonne

rappresentano le alternative, mentre le righe i criteri adottati per la scelta. Un'altra metodologia di questo genere, infine, è stata sviluppata da Fishburn (1967).

In sintesi, per la scelta della tecnologia da impiegare e la determinazione della potenza installabile occorre eseguire un'analisi che includa innanzitutto la valutazione della disponibilità e della tipologia delle biomasse presenti nel territorio di interesse, nonché la stima comparativa dei costi di acquisto, approvvigionamento e stoccaggio. Occorre inoltre verificare le possibilità di connessione alle reti di trasporto e distribuzione dell'energia termica, elettrica e del gas. Si può quindi procedere con la determinazione dell'entità della potenza installabile, con la scelta della configurazione tecnica degli impianti più adatta e, infine, con l'analisi economica e finanziaria dell'investimento.

L'ultimo aspetto, ma non per questo meno importante di tutti gli altri presi in considerazione, è rappresentato dalla gestione della catena di approvvigionamento delle biomasse (Gold *et al.*, 2011).

Questa rappresenta la gestione integrata della produzione di energia da biomasse dalla raccolta delle materie prime e fino al trasporto agli impianti per la conversione energetica (Mafakheri *et al.*, 2014).

Rispetto ad altre catene di approvvigionamento impiegate a livello industriale, le biomasse presentano alcune specificità legate alla stagionalità, alla bassa densità energetica, all'incertezza produttiva che ne determina una domanda variabile, alle caratteristiche dei materiali che ne influenzano il trasporto e lo stoccaggio (Iakovou *et al.*, 2010). Una gestione efficace della catena di approvvigionamento deve essere improntata alla minimizzazione dei costi, alla riduzione dell'impatto sull'ambiente e all'assicurazione della continuità nelle forniture di materia prima agli impianti di produzione dell'energia (Mafakheri *et al.*, 2014).

La catena di approvvigionamento delle biomasse residuali si differenzia in una certa misura da quella delle materie prime tradizionali. Le biomasse residuali di origine agricola o industriale, infatti, sono caratterizzate da una disponibilità stagionale per cui nel corso dell'anno si devono impiegare materie prime con caratteristiche anche molto differenti tra loro. Questo fa sì che debbano essere immagazzinate talvolta per lunghi periodi, ma altre volte per tempi brevissimi, data la loro elevata deperibilità. La catena di approvvigionamento delle biomasse residuali deve essere abbastanza flessibile in modo da adattarsi a condizioni di mercato difficilmente prevedibili, poiché la domanda di energia dipende dalle caratteristiche degli impianti di conversione energetica adottati e dalla competizione con il prezzo di combustibili sostitutivi (Iakovou *et al.*, 2010). Di conseguenza la progettazione e la pianificazione di una catena di approvvigionamento per le biomasse residuali richiedono un processo decisionale piuttosto complesso. La decisione strategica più importante concerne la scelta di una singola biomassa rispetto a quella di una miscela di biomasse.

La scelta del secondo tipo presenta una certa complessità perché richiede la messa a punto di processi di conversione energetica specifici, ma consente di operare con un ampio spettro di biomasse residuali a prescindere dalla disponibilità stagionale, con aspetti positivi anche dal punto di vista ambientale.

Capitolo 3

La pianificazione regionale della produzione di energia da biomasse richiede la determinazione puntuale dei fabbisogni energetici, la mappatura di tutte le risorse realmente disponibili, la definizione e l'attuazione di strategie specifiche.

In questo capitolo sono analizzati nel dettaglio l'ammontare e la distribuzione delle biomasse su tutto il territorio regionale sia in termini di colture dedicate, sia di residui agricoli e agroindustriali. E' valutato altresì il potenziale energetico di ciascuna risorsa e individuate nelle tecnologie termochimiche e biochimiche quelle praticabili con un alto grado di efficacia in Sardegna.

Il Piano regionale delle biomasse è inquadrato nel più generale Piano d'Azione Regionale per le Energie Rinnovabili ed è illustrata nel dettaglio la strategia specifica per questo settore.

Particolare enfasi è stata data al settore delle biomasse residuali, presenti in Sardegna in quantità tali da rappresentare materie prime a basso costo per la produzione di energia, ma anche molto importanti dal punto di vista delle ricadute ambientali.

Il settore delle biomasse in Sardegna

3.1 Il Piano regionale delle biomasse e il loro potenziale energetico in Sardegna

Gli elementi generali necessari allo sviluppo di un Piano Regionale delle biomasse sono stati illustrati nel precedente Capitolo 2 e si possono riassumere sinteticamente in tre punti:

- Mappatura delle risorse disponibili nel territorio regionale;
- Quantificazione del fabbisogno energetico a tutti i livelli;
- Definizione delle azioni necessarie all'attuazione.

Il Piano regionale delle biomasse è inserito nel quadro definito dal Piano d'Azione Regionale per le Energie Rinnovabili (PDAER) della Sardegna approvato con la deliberazione della Giunta Regionale n°12/21 del 20 marzo 2012.

Il Piano Regionale delle biomasse è stato approvato con la deliberazione n°50/13 della Giunta Regionale del 3 dicembre 2013.

Il PDAER è stato predisposto per cogliere gli obiettivi definiti nel Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 15 marzo 2012 (altrimenti detto *Burden-Sharing*) delineando una strategia per lo sviluppo economico dell'isola con l'impiego sostenibile delle risorse naturali e con la maggiore salvaguardia possibile dell'ambiente.

L'obiettivo assegnato all'Italia dalla Direttiva 28/2009/CE per il raggiungimento della quota di produzione di energia da fonte rinnovabile prevede un valore pari al 17%.

Con il *Burden-Sharing* sono stati definiti gli obiettivi intermedi e finali che ciascuna regione deve conseguire per il raggiungimento della quota complessiva di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia e la quota da fonti rinnovabili nei trasporti.

Il valore obiettivo per ciascuna regione è espresso dalla relazione:

$$Fattore\ O = \frac{(FER_E + FER_C)}{CFL} \quad (1)$$

nella quale

Fattore O = contributo attuale delle energie rinnovabili al consumo finale lordo

FER_E = Contributo del comparto elettrico

FER_C = Contributo del comparto termico

CFL = Consumo finale lordo.

In base ai valori riportati nel PDAER, in Sardegna nel 2010 si aveva un FER_E pari a 166 ktep, un FER_C di 19 ktep e un CFL di 3.803 ktep, per un corrispondente valore del Fattore "O" uguale al 4,86%. Peraltro il valore del rapporto FER_E/FER_C evidenzia come la produzione di energia da fonti rinnovabili fosse indirizzata soprattutto verso il settore elettrico.

Il valore finale di riferimento del CFL , sulla base dell'obiettivo nazionale è pari a 3.746 ktep al 2020. Il PDAER individua due obiettivi fondamentali per il 2020: il raggiungimento di una quota di energia prodotta da fonti rinnovabili del 15% (minimo) e il raggiungimento di una quota del 17,8% (limite).

Considerando esclusivamente le azioni da portare avanti nel comparto elettrico e termico nel PDAER si possono individuare due possibili scenari al 2020:

Scenario 1- Il contributo delle biomasse per la sola potenza installata in Sardegna si porterebbe dal 3,68% del 2010 al 7,91% del 2020.

Per l'energia prodotta passerebbe dal 28,16% del 2010 al 36,74% del 2020.

Il contributo delle biomasse al settore termico sarebbe pari al 12,4%.

Scenario 2- Il contributo delle biomasse per la sola potenza installata passerebbe dal 3,68% del 2010 al 7,70% del 2020.

Per l'energia prodotta si porterebbe dal 28,16% del 2010 al 36,96% del 2020. Il contributo al settore termico sarebbe pari al 23,12%.

Nel primo scenario la produzione da fonti rinnovabili sarebbe ancora quasi totalmente indirizzata al settore elettrico (91%), mentre nel secondo lo sarebbe in una misura inferiore (81%).

Il PDAER ha individuato una serie di strategie specifiche per le biomasse che sono riportate integralmente di seguito:

STRATEGIA 1 - Coordinamento tra le attività svolte dall'Assessorato dell'Industria con i diversi soggetti, istituzionali e non, interessati allo sviluppo dell'attività specifica di produzione energetica da biomasse, in particolare favorendo la comunicazione e la condivisione di dati e intenzioni strategiche.

STRATEGIA 2 - Promozione della generazione diffusa e distribuita sul territorio dell'energia da biomasse, orientando gli operatori di mercato verso impianti di piccola taglia finalizzati al soddisfacimento del fabbisogno energetico locale.

STRATEGIA 3 - Promozione della diversificazione delle fonti energetiche. Nella prospettiva di favorire la valorizzazione locale delle biomasse, individuare soluzioni di sfruttamento integrato che consentano, di garantire l'alimentazione di impianti economicamente sostenibili.

STRATEGIA 6 – Biomassa-Predisposizione del Piano Regionale delle biomasse a scopo agro-energetico con l'obiettivo di:

- favorire l'impiego di biomasse residuali;
- Individuare i macrobacini di alimentazione delle biomasse di origine agricola e zootecnica;
- valutare la massima potenza installabile nel territorio regionale nelle diverse aree, secondo criteri di sostenibilità tecnico-economica e tenendo conto degli impianti già installati;
- privilegiare l'alimentazione da colture agricole dedicate in filiera corta escludendo materie prime di provenienza extra-regionale.
- sviluppare un sistema di approvvigionamento delle biomasse sostenibile da un punto di vista economico-finanziario ed ambientale;
- favorire l'installazione di impianti di piccola e media taglia distribuiti sul territorio e finalizzati all'autoconsumo energetico degli utenti ed al rilancio del settore agricolo regionale;
- fissare i criteri tecnico-economici da seguire nell'elaborazione dei progetti di impianti a biomasse necessari per ottenere il provvedimento di autorizzazione unica;
- STRATEGIA 7 – Comparto termico (FER-C) - Porre in essere le iniziative volte a incentivare la produzione di energia termica da fonte rinnovabile e a riequilibrare il rapporto tra FER-E e FER-C, quanto meno nelle proporzioni descritte nello scenario 2. Per le biomasse è necessario:
 - favorirne l'uso diretto per la produzione di energia termica;
 - nello scenario 2, garantire la produzione di almeno 28,93 ktep da uso termico diretto.

Mappatura delle risorse disponibili nel territorio regionale

In considerazione delle caratteristiche variabili del territorio della Sardegna, la valutazione del potenziale energetico delle biomasse in questa regione è un'operazione che è stata particolarmente complessa. Infatti, in base ai dati presenti nel CORINE Land Cover 2012, la Sardegna presenta una superficie pari a 1.213.250 ha di vegetazione forestale (50% dell'intera superficie regionale), di cui il 52% è rappresentato da arbusteti, 1.153.691 ettari di superficie agricola (42% dell'intera superficie regionale), con il 52% di pascoli naturali (Dettori, 2015).

Per l'impiego delle biomasse vegetali in Sardegna è possibile percorrere due vie:

- la realizzazione di colture energetiche dedicate;
- il recupero di materiali residui derivanti dalla gestione delle foreste, dalle coltivazioni a scopo alimentare, dalla lavorazione del legno e dalle trasformazioni agro-industriali.

Questo richiede la conoscenza dettagliata delle caratteristiche qualitative e della distribuzione delle biomasse presenti nell'intero territorio regionale con l'individuazione di eventuali bacini con un'elevata concentrazione di risorse specifiche. Nell'elaborazione dello "Studio sulle potenzialità energetiche delle biomasse" completato in Sardegna (Scano *et al.*, 2013) è stata compiuta una ricognizione dell'intero territorio coinvolgendo tutti i soggetti istituzionali e non detentori dei dati e delle informazioni che si riferiscono all'intero sistema regionale delle biomasse.

Per la valutazione del potenziale energetico della Sardegna sono stati presi in considerazione:

- colture energetiche in atto (localizzazione, varietà, estensione e resa agronomica);
- aree agricole idonee alla produzione di biomasse a fini energetici;
- produttività medie previste (t biomassa ha⁻¹ anno⁻¹) per ciascuna coltura nelle condizioni pedo-climatiche locali;
- contenuto energetico, valutato attraverso il Potere Calorifico Inferiore per unità di biomassa secca;
- superfici agricole potenzialmente impiegabili per l'ottenimento di biomasse destinate alla produzione di biocombustibili;
- distribuzione geografica delle aree di potenziale interesse;
- valutazione della disponibilità di scarti, residui agricoli, forestali e agroindustriali, nell'ottica della trasformazione da problema per l'ambiente a risorsa per il settore energetico.

La stima dell'estensione delle superfici agricole potenzialmente destinabili a colture energetiche è stata improntata a principi di sostenibilità territoriale e questo costituisce un limite invalicabile per lo sviluppo del settore agro energetico. Occorre considerare, infatti, come non si possano compiere trasformazioni irreversibili dei territori e dei sistemi agricoli e rurali per favorire la produzione di biomasse a uso energetico. Tenendo ben presenti i vincoli che insistono sulle aree naturali-seminaturali e protette e sui boschi naturali che non ne consentono le trasformazioni agrarie e lo sfruttamento agricolo intensivo, anche per le aree agricole residue sono state formulate ipotesi di sviluppo coerenti con i programmi europei, nazionali e regionali. Le aree occupate dai pascoli naturali, nonostante la riduzione del patrimonio zootecnico regionale, data la loro destinazione naturale all'allevamento zootecnico, non sono state fatte oggetto di possibili piani di riconversione agraria, poiché non consentirebbero con le loro caratteristiche che una limitata produttività.

La tutela dell'assetto produttivo regionale ha escluso da possibili ipotesi di riconversione anche le superfici utilizzate per le coltivazioni arboree poliennali come l'olivicoltura e la viticoltura.

La possibilità dell'estensione delle colture dedicate è stata considerata soprattutto per le aree pianeggianti o leggermente collinari dei seminativi, mentre sono state escluse tutte le aree con elevata pendenza che rendono difficoltosa la meccanizzazione delle pratiche colturali.

E' stato valutato il problema della competizione con l'uso del terreno per fini alimentari. Le specie bioenergetiche sono state identificate in base alle caratteristiche dell'ambiente di coltivazione, in modo da massimizzare l'uso delle risorse naturali disponibili e minimizzare l'intensificazione culturale. Poiché la produttività delle piante dipende non solo dal potenziale genetico ma anche dalle condizioni in cui si opera, particolare rilievo è stato attribuito al fatto che uno tra i principali fattori ambientali limitanti determinate coltivazioni in Sardegna è la disponibilità di acqua.

La valorizzazione degli scarti agricoli e delle produzioni agroindustriali è senz'altro vantaggiosa sia dal punto di vista economico che ambientale. La realizzazione di colture dedicate richiede una minore disponibilità di fertilizzanti e diserbanti rispetto alle coltivazioni più diffuse e quindi può contribuire alla riduzione dell'inquinamento dei terreni e delle falde acquifere (Scano *et al.*, 2013). Altri aspetti che sono stati presi in esame sono dati dalla conservazione del suolo, prevenendo fenomeni erosivi

superficiali, dal miglioramento della qualità del paesaggio dovuto alla diversificazione delle colture e dall'altro reddito per gli agricoltori.

Il calcolo del potenziale energetico per ciascuna biomassa vegetale/residuale destinata a una conversione termochimica presa è stato eseguito utilizzando la seguente espressione generale:

$$P_{ea} = \frac{S_p \cdot B_r \cdot PCI}{3600} \quad (2)$$

nella quale

P_{ea} è il Potenziale energetico espresso in MWh a⁻¹

S_p è la superficie della coltura in ha

B_r è la biomassa ritraibile in t di sostanza secca per ha⁻¹ a⁻¹

PCI è il potere calorifico inferiore in MJ kg⁻¹ sostanza secca.

Il calcolo del potenziale energetico per ciascuna biomassa vegetale/residuale destinata a una conversione biochimica è stato eseguito utilizzando la seguente espressione generale:

$$P_{ea} = \frac{B_r \cdot P_{ub} \cdot PCI}{3600} \quad (3)$$

nella quale

P_{ea} è il Potenziale energetico espresso in MWh a⁻¹

B_r è la biomassa ritraibile in t a⁻¹

P_{ub} è la produttività in biogas per unità di biomassa in Nm³ t⁻¹

PCI è il potere calorifico inferiore in MJ Nm⁻³ di biogas.

Di seguito sono illustrati i risultati ottenuti per ciascuna biomassa sia in base alla disponibilità annuale sia in termini energetici.

Colture di tipo cerealicolo e oleaginoso

Tenendo conto dell'andamento del mercato e delle politiche comunitarie in atto, è prevedibile un aumento della domanda di cereali con un ritorno al livello di coltivazione riscontrato nel 2008 e pari, a circa 116.000 ha. Considerando le condizioni infrastrutturali dei terreni, si stima che siano disponibili in Sardegna circa 37.000 ha destinabili a colture energetiche. Questa previsione è confermata dai dati ISTAT che registrano un incremento per le superfici dei principali cereali (frumento tenero e duro), passate dai 78.000 ha del 2008 ai 34.000 ha del 2012, con una differenza pari a 44.000 ha, riconvertiti ad uso foraggero (erbai, prati e pascoli). Questo ne fa prevedere un loro potenziale utilizzo per usi non alimentari.

Si possono comunque considerare cautelativamente 37.000 ha dati dalla differenza tra la superficie impiegata nel 1999 e pari a 153.000 ha e quella del 2008 pari a 116.000 ha.

Questa previsione potrebbe essere ridimensionata in aumento o in diminuzione qualora la domanda di materie prime a uso alimentare dovesse aumentare, e conseguentemente il prezzo salire o scendere.

La stima eseguita potrebbe quindi essere soggetta a variazioni in diminuzione o in aumento partendo da un valore attuale di trentasettemila ettari (pari al 27% del totale a usi cerealicoli nel periodo 1999-2010). Le coltivazioni industriali, invece, secondo i dati ISTAT del 2012, hanno un'estensione pari a 45 ha con particolare riferimento alle coltivazioni oleaginose colza e girasole (Cossu A. e Atzori D., in Scano *et al.* 2013).

Per quanto concerne le colture di tipo cerealicolo, è interessante notare come i residui colturali (come si dirà più avanti) abbiano un certo potenziale energetico e possano essere impiegati in processi di conversione termochimica.

Le specie vegetali esaminate in questa sezione sono state la *Brassica napus* (colza) e la *Brassica carinata*. I dati di produttività agricola presi in considerazione sono stati quelli ottenuti in Sardegna dall'Agenzia per la Ricerca in Agricoltura -AGRIS con coltivazioni in tre siti differenti.

Considerando un contenuto medio di olio del 40% per la *Brassica napus* si otterrebbe una resa per unità di superficie compresa tra 0,648 e 1,04 t ha⁻¹, mentre per la *Brassica carinata*, con un tenore in olio del 37%, si otterrebbe una resa compresa tra 0,566 e 1,21 t ha⁻¹.

Le colture oleaginose, per via delle condizioni pedo-climatiche che ne determinano una resa agronomica non elevata, sono difficilmente praticabili in Sardegna (Agris Sardegna, 2012).

In conclusione si può dire che la filiera delle oleaginose per la produzione di biocombustibili non sembra avere molte possibilità di applicazione in Sardegna, anche se uno studio recente ne mostra alcuni vantaggi in termini di risparmio di energia primaria e di emissioni di gas serra (Cocco *et al.*, 2014).

Colture energetiche specifiche

Considerando che non esiste una specie erbacea per eccellenza da impiegare per la coltivazione energetica, la diffusione delle colture dedicate, oltre ad altri vantaggi conseguibili nella gestione globale dell'azienda agricola, dipende soprattutto dalla redditività economica.

L'introduzione delle coltivazioni energetiche in ordinamenti estensivi dominati dalla presenza di cereali autunno - vernini (soprattutto frumento duro) e foraggere, risulta comunque influenzata da condizioni nelle quali si possono ottenere redditi simili o superiori alle colture praticate normalmente.

L'inserimento delle colture agro-energetiche nei sistemi colturali cerealicoli, può avere successo solamente se non determina nuovi problemi organizzativi per gli imprenditori agricoli, ma rappresenta, una scelta diversa per praticare avvicendamenti colturali alternativi.

Nello studio sono state considerate colture erbacee caratterizzate da un'elevata adattabilità all'ambiente di coltivazione della Sardegna cercando di identificarne i limiti di applicazione (Agris Sardegna, 2012). Tra le specie considerate rientrano la canna comune (*Arundo donax L.*), il sorgo (*Sorghum bicolor (L.) Moench*), il carciofo (*Cynara cardunculus var. scolymus L.*), il cardo (*Cynara cardunculus var. altilis*), il cardo mariano (*Sylibum marianum L.*) e il crisantemo (*Chrysanthemum coronarium*).

Tra queste il sorgo che presenta un'elevata efficienza nell'utilizzo dell'acqua, fornisce una produzione media annua compresa tra 16 e 20 t ha⁻¹ di sostanza secca (S.S.). La varietà commerciale di cardo ha mostrato delle potenzialità nettamente superiori

rispetto ai cardì selvatici con produzioni medie di 5 t ha⁻¹ di S.S (Cossu A. e Atzori D., in Scano *et al.* 2013).

L'uso dei residui della coltivazione del cardo, impiegato per l'attivazione della filiera *chimica verde*, potrebbe rappresentare una possibilità aggiuntiva nell'ambito di processi di conversione termochimici.

Tuttavia l'elevato contenuto in ceneri comporta costi elevati di smaltimento e questo ne limita notevolmente le potenzialità applicative.

La potenzialità produttiva del sorgo è concentrata in particolare nelle aree di Oristano e della Sardegna meridionale, con rese pari a circa 192.000 t di S.S.a⁻¹ per ciascuna zona. La potenzialità produttiva del cardo è localizzata nelle zone della Nurra e della Sardegna centrale, con rese rispettivamente pari a circa 64.000 t.a⁻¹ e 33.000 t a⁻¹ di S.S..

Biomasse agricole residuali da coltivazioni legnose

Le biomasse derivanti dagli interventi di potatura di vite e olivo, sono disponibili in quantità variabili, in funzione dell'investimento iniziale (numero di piante ha⁻¹), della forma di allevamento adottata, del clima, del tipo di terreno e delle risorse idriche.

I rapporti quantitativi medi, esistenti fra prodotti agricoli e residui di potatura associati, fanno riferimento alle produzioni di uva da vino e olive da olio del 2007 e hanno rispettivamente un valore medio su scala regionale pari a 1,07 per l'uva e 1,01 per le olive (*Report RSE 2009/50, ENEA, 2009*).

Partendo da questi valori e considerando i dati riguardanti le produzioni agricole per i due comparti, si ottiene una quantità di residui di potature della vite pari a 113.780 t a⁻¹ di biomassa tal quale, mentre una quantità di 46.043 t a⁻¹ di residui di potatura dell'olivo. Considerando un potere calorifico inferiore di 18 MJ kg_{ss}⁻¹ per le potature di vite, un'umidità media all'impiego del 40% si ottiene un potenziale energetico pari a 341.401 MWh a⁻¹. Lo stesso calcolo ripetuto per le potature di olivo con un potere calorifico inferiore di 17,6 MJ kg_{ss}⁻¹ conduce a un potenziale energetico di 134.944 MWh a⁻¹. Complessivamente in tutta la Sardegna, le potature di vite e olivo presentano un potenziale energetico di 476.395 MWh a⁻¹. Le Province di Cagliari, Sassari e Oristano sono in grado di contribuire per il 57,1% al potenziale energetico complessivo per questa tipologia di residui (Maxia C., Fenu D. e Atzori D., in Scano *et al.* 2013).

Biomasse agricole residuali da coltivazioni erbacee

Le principali colture erbacee praticate in Sardegna riguardano le filiere del carciofo, del pomodoro e dei cereali. La filiera del carciofo costituisce la coltivazione ortiva più importante della regione e una stima dei residui colturali fornisce valori compresi tra 5 e 35 t ha⁻¹. Uno studio recente condotto nel nord-ovest della Sardegna (Ledda *et al.*, 2013) indica una produzione annuale di biomassa pari a 4 t ha⁻¹, ma la biomassa che si può ricavare dai carciofeti presenta un'estrema variabilità legata alle pratiche colturali differenti nelle diverse zone della regione. Comunque se si considera un impianto medio di 9.000 piante ha⁻¹, con un peso medio della pianta di carciofo pari a 1,5 kg se ne ottiene una quantità potenziale di residui pari a 13,5 t ha⁻¹ a⁻¹. Una stima dell'entità della produzione di carciofi nel 2014 individua la superficie coltivata in circa 12.000 ha. Questo dato con l'assunzione fatta in precedenza porterebbe a una disponibilità di biomassa pari a 162.000 t a⁻¹ (Maxia C., Fenu D. e Atzori D., in Scano *et al.* 2013). Il destino energetico dei residui di carciofo può seguire due strade: la digestione anaerobica della pianta fresca e la conversione termochimica della pianta lasciata seccare sul campo. Date le problematiche legate alla digestione anaerobica di questo substrato, dovute alla presenza di sostanze fenoliche inibenti e alla struttura, costituita

fondamentalmente da lignina, degli stocchi, la conversione termochimica sembra essere la tecnologia di conversione energetica più idonea. Se si considera, infatti, un potere calorifico inferiore di $16 \text{ MJ kg}_{\text{ss}}^{-1}$, un'umidità dell'80% si ottiene un potenziale energetico pari a $142.222 \text{ MWh a}^{-1}$. Se si considera invece una produzione potenziale di biogas di circa $100 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ di residuo, con un contenuto in metano pari al 50%, si raggiungono $112.196 \text{ MWh a}^{-1}$.

L'entità della coltivazione di pomodoro in Sardegna nel 2010 era pari a 2.233,49 ettari, dei quali 1.127 ha destinati alla produzione da mensa in pieno campo, 543 ha per la produzione di pomodoro da industria e 563,49 ha di pomodoro da mensa in coltura protetta (serra). I residui colturali, al termine del ciclo produttivo, sono rappresentati da parti di pianta, apparati radicali, steli e foglie.

In considerazione dell'elevata umidità dei residui (65-75%) e del rapporto C/N molto inferiore a 30, il processo di digestione anaerobica sembra essere il più adatto alla conversione energetica. Ipotizzando una resa in biogas pari a $103 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ di residuo, con un contenuto in metano pari al 50%, si otterrebbero $35.341 \text{ MWh a}^{-1}$.

L'ultimo residuo da colture erbacee considerato sono le paglie di origine cerealicola, principalmente impiegate sia a fini zootecnici, sia come lettiera per la stabulazione degli animali.

La potenzialità produttiva in termini energetici è stata stimata partendo dalla consistenza delle coltivazioni cerealicole, di frumento, orzo e avena, registrata in Sardegna dall'ISTAT nel 2011. Secondo le indicazioni inserite nel Piano Energetico Ambientale Regionale (PEARS) del 2006, la produzione della paglia in Sardegna è stimata in circa 2 t ha^{-1} , con umidità alla raccolta media dell'12%. Pertanto, utilizzando le produzioni censite, si ottiene una potenzialità produttiva in paglia del comparto pari a circa 144.307 t a^{-1} (Maxia C., Fenu D. e Atzori D., in Scano *et al.* 2013). Questo in termini energetici potenziali, considerando un potere calorifico inferiore medio di $15,6 \text{ MJ kg}_{\text{ss}}^{-1}$, è pari a $624.869 \text{ MWh a}^{-1}$.

Residui dei frutteti e degli agrumeti

La potatura degli agrumeti e dei frutteti produce una quantità di residui variabile tra 1 e 3 t ha^{-1} con valori medi che si attestano su $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ per gli agrumi e $2,8 \text{ t ha}^{-1}$ per la frutta fresca. Considerando una disponibilità in residui di $27.952,4 \text{ t a}^{-1}$, con un'umidità media del 40% e un potere calorifico inferiore di $17 \text{ MJ kg}_{\text{ss}}^{-1}$, si ricava un potenziale energetico complessivo pari a $124.816 \text{ MWh a}^{-1}$ del quale il 50% circa attribuibile alla sola provincia di Cagliari.

Residui del settore vinicolo

Gli scarti industriali della filiera vitivinicola sono rappresentati dalla biomassa vegetale che residua dai processi di vinificazione. Dal processo derivano vinacce vergini per il 13%, vini di torchiatura 5%, fecce 3,6%, raspi 2,4%, reflui di lavaggio 2% (Anpa, 1999). Il rapporto quantitativo medio tra tale quantitativo e il prodotto raccolto è pari a 0,12 su scala regionale (Report RSE 2009/50 ENEA, 2009) e questo porta, su scala regionale, a una disponibilità di residui pari a $12.930,4 \text{ t a}^{-1}$ (Maxia C., Fenu D. e Atzori D., in Scano *et al.* 2013). Considerando un'umidità media del 68% e un potere calorifico inferiore di $20,1 \text{ MJ kg}_{\text{ss}}^{-1}$, si ricava un potenziale energetico complessivo pari a $23.121 \text{ MWh a}^{-1}$.

Scarti del settore oleario

I residui sono rappresentati dalla sansa che è composta di acqua per circa il 50%, bucce e residui del nocciolino frantumato e da acque reflue, denominate acque di vegetazione.

Il rapporto medio tra residuo e prodotto lavorato è pari a 0,51 (report RSE/2009/50 Enea, 2009).

In base al D.lgs.152/2006 (testo unico ambientale) le acque di vegetazione rappresentano un sottoprodotto e possono essere distribuite sul terreno, con i limiti stabiliti per legge, qualora se ne ravvisi un'utilità agronomica. I processi di smaltimento delle acque di vegetazione olearie (AVO) condotti nei diversi paesi produttori possono differire ma, in genere, consistono nello spandimento controllato sul terreno e il contenimento in vasche per favorire la degradazione naturale della sostanza organica. Le AVO, come si vedrà più avanti in questo documento, possono essere impiegate efficacemente in processi di digestione anaerobica in miscela con altri substrati.

Facendo riferimento al 6° Censimento Generale dell'Agricoltura (ISTAT, 2010) si ottengono 2.696 t a⁻¹ di nocciolino e 18.046 t a⁻¹ di sansa denocciolata. Tenendo conto dell'umidità, considerando un potere calorifico inferiore medio di 20,1 MJ kg_{ss}⁻¹ per il nocciolino e di 15,9 MJ kg_{ss}⁻¹ per la sansa, si può ricavare un potenziale energetico regionale complessivo pari a 12.094 MWh a⁻¹ per il nocciolino e 66.096 MWh a⁻¹ per la sansa.

Scarti di macellazione

Sono stati presi in esame i residui derivanti dalle carni bovine, bufaline, suine, ovine, caprine, avi-cuniole e dalla selvaggina. Dalla macellazione di queste specie animali si ottengono il sangue, la testa, le parti distali degli arti, la pelle e il contenuto addominale (stomaci, visceri e loro contenuto). In base ai dati del Ministero della Salute e Sicurezza alimentare il numero di macelli in Sardegna è pari a 64.

Di questi, 14 sono localizzati nella provincia di Cagliari, 18 in quella di Nuoro, 8 in quella di Oristano, 16 in provincia di Sassari, 2 nella provincia di Carbonia Iglesias, 3 in quella di Ogliastra e 3 nella provincia di Olbia Tempio. I residui totali, sempre secondo i dati ministeriali, ammontano a 22.477 t a⁻¹. In assenza di dati certi da fonte ufficiale che quantifichi la quota parte di scarti di macellazione annualmente convertiti in farine, è stato considerato un potenziale energetico pari ad un terzo di quello teorico, ottenibile con una conversione biochimica, ovvero 2.922 MWh a⁻¹. Sono tuttavia nella fase di sviluppo processi industriali di valorizzazione delle parti grasse degli scarti di macellazione mediante tecnologie termochimiche. In particolare nella provincia di Oristano nella fase autorizzativa un impianto di produzione di energia elettrica, in assetto cogenerativo, alimentato da grassi animali con una potenza elettrica pari a 992 kW_e e una potenza termica pari a circa 2.400 kW_t (Orrù A., Fenu D. e Cossu A. in Scano *et al.* 2013).

Lana ovina

La lana sarda è una fibra tessile animale, costituita dai peli ricavati dal vello degli ovini di razza sarda che rappresentano oltre il 40% del patrimonio ovino nazionale. In Sardegna si produce circa un terzo della lana nazionale. La produzione di lana è concentrata nelle Province di Sassari e Nuoro, nelle quali sono localizzati rispettivamente il 27% e il 22% degli allevamenti ovini regionali, seguite dalle province di Oristano (16%) e Cagliari (15%).

La produzione media di lana per capo allevato di razza sarda è pari a 2,5 kg per i maschi adulti, 1,2 kg per le femmine adulte e 0,85 kg per i capi giovani.

Complessivamente, considerando un indice di produzione medio di 1,2 kg a capo si stima una produzione di lana grezza pari a circa 4.000 t a⁻¹. Il Regolamento (CE) n. 1069/2009 (norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale) all'art. 10

punti h, n classifica la lana quale Materiali di categoria 3 e pertanto all'art.14 stabilisce che possa essere :

- smaltita come rifiuto mediante incenerimento, dopo la trasformazione o senza trasformazione preliminare;
- recuperata o smaltita mediante co-incenerimento con o senza trasformazione preliminare, qualora sia rifiuto;
- smaltita in una discarica autorizzata, dopo la trasformazione;
- compostata o trasformata in biogas;
- utilizzata come combustibile dopo la trasformazione o senza trasformazione preliminare.

In assenza di dati certi sugli attuali usi della lana sarda, si è assunto di potere disporre realmente di un terzo della produzione annuale per la conversione energetica mediante la combustione. In questo caso, considerando il valore di $20,8 \text{ MJ kg}_{\text{ss}}^{-1}$, per il potere calorifico inferiore, si avrebbe un potenziale energetico pari a circa 7.563 MWh a^{-1} (Orrù A., Fenu D. e Cossu A. in Scano *et al.* 2013).

Scarti del settore lattiero caseario

La Sardegna contribuisce per circa il 4,6% alla produzione nazionale di latte (Istat, 2011), e soddisfa circa il 67% del mercato del latte ovino italiano (2,8 milioni di quintali nel 2011). I residui di lavorazione rappresentano circa l'80-90% del latte in ingresso alle linee di trasformazione industriale e sono costituiti principalmente dal siero e dalla scotta. Il siero derivante dalla trasformazione del latte in formaggio rientra nei sottoprodotti di origine animale Cat.3 come definito dal REGOLAMENTO (CE) n. 1069/2009 (sottoprodotti di origine animale derivanti dalla fabbricazione di prodotti destinati al consumo umano, compresi ...i fanghi da centrifuga o da separatore risultanti dalla lavorazione del latte).

Il medesimo regolamento ne disciplina, a fini energetici, i seguenti smaltimenti e usi :

- recupero o smaltimento mediante co-incenerimento, con o senza trasformazione preliminare, qualora i materiali categoria 3 siano rifiuti;
- compostaggio o trasformazione in biogas;
- utilizzo come combustibile dopo la trasformazione o senza trasformazione preliminare.

Il D.lgs. n.152/06 e ss.mm.ii. Parte IV, all'art. 185 comma 2b ricomprende nell'ambito della disciplina del Decreto quella parte dei sottoprodotti di origine animale, contemplati dal suddetto Regolamento (CE) destinati all'incenerimento, allo smaltimento in discarica o all'utilizzo in un impianto di produzione di biogas o di compostaggio. Il trattamento del siero e degli altri reflui caseari rappresenta, in particolare per i caseifici di dimensioni medie e piccole, uno dei maggiori problemi gestionali e pertanto rende necessaria l'individuazione di adeguate soluzioni tecnologiche per il trattamento.

La quantità stimata di latte ovino, destinato alla produzione di formaggio in Sardegna, nel 2011, è stata pari a circa 3.081.711 di quintali lavorati (Agenzia Laore, 2013).

Considerando che per ogni quintale di latte da lavorare si ottengono normalmente circa 17 kg di formaggio e 83 l di siero, la produzione totale di questo sottoprodotto, nello stesso anno di riferimento, è stata pari a circa 2,47 milioni di quintali.

Con l'impiego della metà del siero prodotto annualmente in Sardegna, quale co-substrato in processi di digestione anaerobica, considerando un indice di conversione

pari a 15-17 m³ di biogas per tonnellata di tal quale, si potrebbero ottenere circa 20 Mm³ a¹ di biogas di cui il 33% nella provincia di Sassari e il 23% in quella di Nuoro, con un potenziale energetico di 113.350 MWh a⁻¹ (Progetto Agribiogas, 2009).

Effluenti zootecnici

Per valutare la produzione potenziale di biogas dai reflui zootecnici, sono state prese in considerazione solo le deiezioni di bovini e suini, poiché quelle di ovini e caprini, non sono valutabili con certezza. Infatti, il loro allevamento è condotto al pascolo brado, o semibrado, con distribuzione delle deiezioni all'aperto, oppure su lettiere poi reimpiegate quale letame fresco e stabilizzato. Complessivamente in Sardegna la produzione totale di reflui zootecnici è pari a 4.174.321,04 m³ a⁻¹.

Il territorio della Provincia di Oristano è quello che presenta la maggiore quantità di reflui e questo è in linea con la localizzazione della gran parte del patrimonio bovino dell'isola. Immediatamente dopo si situano le Province di Sassari e Nuoro nelle quali è consistente soprattutto il patrimonio suinicolo. Questo importante volume di reflui può essere trattato efficacemente con processi di digestione anaerobica, preferibilmente in co-digestione con altri substrati più ricchi in materiali volatili. Complessivamente, ipotizzando una produzione di biogas pari a 35,5 m³ m⁻³ di liquame si potrebbero ottenere 148.136.218 m³ a⁻¹ di biogas, con un potenziale energetico pari a 888.817 MWh a⁻¹.

Biomasse forestali e arboricoltura da legno a ciclo breve

Allo stato attuale la determinazione della disponibilità di biomassa lignocellulosica in Sardegna è ancora affetta da notevoli incertezze, soprattutto a causa della mancanza di dati precisi e coerenti relativi all'estensione superficiale delle foreste, a causa delle differenti metodologie impiegate per le rilevazioni.

Questo ha reso necessario lo sviluppo di un metodo per la valutazione del potenziale energetico di un determinato territorio impiegando un metodo GIS, con l'aggiunta dello strato informativo relativo alla carta della vegetazione, testato sulla zona della Sardegna con maggiore indice di boscosità (Ogliastra) e riportato nel Capitolo 5 (Scano *et al.*, 2013).

Tuttavia la fonte più recente e attendibile di informazioni, è quella del Piano Energetico Regionale del 2006 (PEARS), nel quale sono stati riportati i dati forniti dal Corpo Forestale dello Stato (CFVA) relativi all'estensione superficiale dei boschi in Sardegna.

L'Assessorato alla difesa dell'Ambiente ha stimato la disponibilità di biomassa, valutando un accrescimento medio annuo delle risorse forestali in circa 1,5 milioni di tonnellate l'anno, che si riduce a 320.000 t a⁻¹ se si tiene conto di aspetti infrastrutturali e specifici delle aree boscate.

Considerando le zone con maggiore densità boschiva, definiti i potenziali bacini di approvvigionamento della biomassa legnosa in Sardegna, rapportando il prelievo massimo ammissibile alle superfici boscate di ciascun bacino e considerando un tasso costante di accrescimento annuo, è possibile ottenere i dati riportati nella Tab.11. Come si può notare i bacini potenziali di approvvigionamento individuati nel PEARS, presentano una potenzialità di prelievo, espressa in t a⁻¹, in generale abbastanza simile, con esclusione di quello dell'Ogliastra che si discosta nettamente da quello delle altre province. Il potenziale energetico che se ne ricava, considerando un'umidità del 45% e un Potere Calorifico Inferiore medio del legno di 18,4 MJkg_{ss}⁻¹. (Rapporto ISPRA 111/2010), è pari a 671.447 MWh a⁻¹, con una potenza installabile teoricamente pari a circa 84 MW per un esercizio degli impianti pari a 8000 ore a⁻¹. Tuttavia questi numeri, importanti dal punto di vista della dimensione dei potenziali impianti, trovano

difficilmente riscontro nella realtà come si vedrà nell'indagine approfondita eseguita in Ogliastra e riportata nel Capitolo 5 di questo documento. Infatti, quando si considerano altri fattori, quali le pendenze del terreno, la viabilità di accesso alle formazioni forestali e si eseguono mirate determinazioni chimico-fisiche, la ritraibilità delle biomasse e il potenziale energetico possono diminuire notevolmente. Per quanto concerne l'arboricoltura da legno a ciclo breve (*short Rotation Forestry*), i dati ISTAT indicano una superficie investita pari a 8.848 ha, con 324 ha pioppo e 10.897 ha per le altre arboree da legno. Nell'indagine oltre al pioppo è stato considerato l'eucalipto in rappresentanza delle altre specie arboree.

Prove colturali condotte in Italia, indicano per il pioppo rese agronomiche dell'ordine dei 30-40 t ha⁻¹ a⁻¹ di cippato, al 50% di umidità, riportati anche in uno studio eseguito dal SIL Patto territoriale - Agenzia di Sviluppo Locale della Provincia di Oristano, nel 2007. Nel piano biomasse della Sardegna, conservativamente, è stata considerata una quantità di biomassa ritraibile dal pioppo a ciclo breve pari a 30 t ha⁻¹ a⁻¹, mentre per l'eucalipto una resa di 10 t ha⁻¹ a⁻¹ (Cossu A. e Atzori D., in Scano *et al.* 2013).

Pertanto, date le superfici indicate nei dati ISTAT, se ne deduce un potenziale produttivo, a livello regionale pari a 8.235 t a⁻¹ per il pioppo e 85.735,40 t a⁻¹ per l'eucalipto. Il maggior potenziale energetico delle biomasse legnose provenienti da agricoltura da legno a ciclo breve dovrebbe essere localizzato nelle province di Cagliari e Oristano. Considerando le quantità che si riferiscono alle biomasse forestali e a quelle provenienti da arboricoltura da legno ciclo breve, si dovrebbero avere 332.825,40 t a⁻¹ di biomasse legnose per un potenziale energetico complessivo pari a 936.000 MWh a⁻¹ (Cossu A. e Atzori D., in Scano *et al.* 2013).

Frazione organica dei rifiuti solidi urbani e fanghi di depurazione

Le politiche comunitarie e nazionali per la gestione dei rifiuti, sono orientate alla massima riduzione dei volumi delle discariche mediante l'ottenimento di energia dalla frazione dei rifiuti idonea allo scopo. Un esempio è rappresentato dalla conversione energetica tramite la digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU). Una politica di gestione corretta deve prevedere l'integrazione tra il sistema dei rifiuti solidi urbani e quello dei rifiuti classificati come speciali, con l'ottenimento di vantaggi economico-gestionale e ambientali.

Questo con l'obiettivo primario della sostenibilità ambientale, coinvolgendo ben definite tipologie di attività di trattamento, recupero o smaltimento di rifiuti, essenzialmente non pericolosi, quali: *rifiuti speciali assimilabili agli urbani, rifiuti speciali compostabili, rifiuti combustibili, rifiuti solidi, fanghi palabili non più recuperabili come materia o energia*. In Sardegna la quantità di rifiuti del 2008 era pari a 7.307.435 t. A fronte di una potenzialità di recupero energetico pari a 65.000 t a⁻¹ si registra un impiego di circa 56.000 t a⁻¹. L'obiettivo generale per la raccolta differenziata prevedeva una soglia del 70% da raggiungere entro il 2012.

Il recupero precede tuttora la bio-stabilizzazione e il compostaggio per la frazione organica e la termovalorizzazione del secco residuo presso due o più poli regionali. Il PEAR 2006 peraltro proponeva due soli impianti di smaltimento del CDR (combustibile ottenuto dalla componente secca quale plastica, carta, fibre tessili) dei rifiuti, urbani, dei quali uno coincidente con il termovalorizzatore di Macchiareddu, ampliato ad una potenza totale di 20,4 MW_e, mentre l'altro da realizzarsi a Ottana, per una potenza di 20 MW_e, mentre attualmente si sta comunque rifacendo l'impianto della zona industriale di Macomer. Per quanto concerne i fanghi di depurazione, in Sardegna nel 2008 sono state prodotti 67.027 t. Il DM 14 febbraio 2013, n. 22 "Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di determinate tipologie di combustibili solidi

secondari (CSS) - Attuazione articolo 184-ter del Dlgs 152/2006" rende utilizzabile un combustibile da rifiuti (CSS) mediamente costituito dal 4% di fanghi di depurazione, offrendone un'altra opportunità di conversione energetica. Il contributo potenziale derivante dalla conversione mediante processo termochimico, dei fanghi di depurazione, assumendo un potere calorifico pari a $2,46 \text{ MWh t}_{\text{ss}}^{-1}$, considerando il 20% di umidità all'impiego, è pari a circa $130.000 \text{ MWh a}^{-1}$. La valorizzazione energetica della parte organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) vede in Sardegna un unico impianto di trattamento mediante la digestione anaerobica. Nel corso del 2011 sono state raccolte 164.156 t a^{-1} di FORSU con una quantità di sostanza organica pari al 31,7%. Considerando il trattamento del 50% del totale, con un indice di conversione della FORSU in biogas pari a $84 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ tal quale e un potere calorifico inferiore del biogas pari a 6 kWh Nm^{-3} ne emerge un potenziale complessivo attuale pari a circa $40.000 \text{ MWh a}^{-1}$, ma con una proiezione al 2025 che ne prevede la riduzione a circa $30.000 \text{ MWh a}^{-1}$. La captazione del biogas in discarica, in conseguenza sia del ridotto fattore produttivo sia del più modesto potere calorifico ($4,4 \text{ kWh Nm}^{-3}$) renderebbe tale risorsa fortemente meno significativa sotto l'aspetto energetico. Oltre il 50 % della FORSU è conferito presso i 2 impianti del CACIP di Cagliari (27,72%) e di Villacidro (23,42%). Delle 198.000 t di FORSU separata con la raccolta differenziata, l'85% è destinato a impianti di compostaggio/digestione anaerobica, mentre il restante 15% alla bio-stabilizzazione. Il digestato che si produce a Villacidro, unico impianto di digestione anaerobica, ha come destinazione finale la discarica, mentre dei rifiuti in ingresso a impianti di compostaggio il 20% diventa *compost* riutilizzabile come ammendante per i terreni e il 31% costituisce lo scarto che è smaltito in discarica o incenerito¹ (Orrù A., Fenu D. e Cossu A. in Scano *et al.* 2013).

Scarti della manutenzione del verde

L'entità degli scarti determinati dalla manutenzione del verde urbano in tutta la Sardegna, determinata dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sardegna (ARPAS) è pari a 12.061 t a^{-1} di sostanza secca. Considerando un potere calorifico di $10 \text{ MJ kg}_{\text{ss}}^{-1}$ se ne ricaverebbe un potenziale energetico di $335.000 \text{ MWh a}^{-1}$.

Scarti della lavorazione del legno

Sono state prese in esame le industrie del legno e dei prodotti del legno quali: industrie di taglio, piallatura e trattamento, industrie per la fabbricazione di fogli compensati e pannelli vari, industrie per la fabbricazione di imballaggi in legno, sughero e materiali da intreccio. Le industrie sarde di questo settore sono localizzate principalmente nei comuni capoluogo di provincia e in esse nel 2001 vi trovavano lavoro circa 5.612 addetti.

Per la stima della quantità annuale di residui legnosi prodotti a livello provinciale dall'industria del legno, ci si è basati su uno studio svolto da AssoLegno che assume che la quantità di residui legnosi sia proporzionale al numero di addetti in essa impiegati. Per ogni addetto è stata stimata una produzione annua pari a 11,2 tonnellate di scarti legnosi, con un'umidità relativa del 15%, ma tenendo conto che il 50% degli scarti può essere impiegato per altri scopi. Secondo queste assunzioni la quantità di biomassa disponibile è pari a 31.247 t a^{-1} di S.S., con un potenziale energetico di $160.000 \text{ MWh a}^{-1}$.

Oli vegetali esausti

In Italia vengono, ogni anno, impiegate $1.400.000 \text{ t}$ di olio vegetale con un consumo medio pro capite di circa 25 kg . annui. Di conseguenza si stimano residui non utilizzati

pari a circa il 20% (oli esausti). Utilizzando questi parametri, si stima in Sardegna una quantità complessiva di olio esausto pari a circa 2.500 t a⁻¹.

Ipotizzandone una conversione in biodiesel si stima che si possa avere una resa intorno all'85% di biodiesel, 8% di glicerina e 7% di scarto.

Attribuendo al biodiesel un potere calorifico inferiore pari a 32,4 MJ kg_{ss}⁻¹, si può calcolare un potenziale energetico di 24.000 MWh a⁻¹.

Microalghe

La coltura di microalghe è in questo momento un settore in fortissimo sviluppo e in tutto il mondo si stanno moltiplicando le iniziative di sperimentazione e imprenditoriali. L'Unione Europea sta finanziando numerosi progetti che si basano su questa tecnologia per favorirne lo sviluppo. Studi riportati nella letteratura scientifica corrente hanno, infatti, evidenziato diversi vantaggi correlati a uno sfruttamento massiccio di questo tipo di biomassa, legati alla resa energetica e alla sostenibilità ambientale. Dalle alghe si possono estrarre molecole ad alto valore aggiunto quali acidi grassi, pigmenti e isotopi stabili. Le biomasse derivate dalle microalghe sono impiegate come alimenti nelle acquacolture, mentre le biomasse algali di scarto dell'industria e dell'acquacoltura trovano impiego come fertilizzanti naturali.

L'utilizzo più promettente delle microalghe e sul quale si stanno concentrando anche gli sforzi delle multinazionali del settore petrolifero, è quello che prevede la produzione di oli destinati all'uso energetico diretto o alla produzione di biodiesel.

Tuttavia sussistono ancora numerose difficoltà tecniche che la ricerca sta cercando di superare e in particolare la progettazione di sistemi aperti di coltivazione più efficienti, la disponibilità di sistemi economici di estrazione dell'olio, o attraverso l'impiego di microrganismi geneticamente modificati, il rilascio diretto dell'olio nel *medium* colturale.

L'impiego più interessante delle microalghe, comunque, è senza dubbio quello legato alla produzione di energia, che consiste nella combustione diretta della biomassa algale tal quale o insieme ai residui agricoli e forestali e alla frazione umida dei rifiuti solidi urbani. Le microalghe hanno dimensioni dell'ordine di qualche micron, per cui possono essere impiegate nella combustione diretta in appositi motori, miscelate con i combustibili tradizionali. Per esempio, sono state preparate miscele a base di gasolio per i motori Diesel e avviate collaborazioni per la produzione di combustibili per aerei di linea (Algae Link, Air France - KLM). Altre tecnologie di conversione energetica, tuttora in fase di studio, in cui sono impiegabili direttamente le biomasse algali essiccate o tal quali, sono rappresentate dalla pirolisi, dalla gassificazione e dalla digestione anaerobica, mentre altre applicazioni sfruttano direttamente la capacità delle microalghe di produrre idrogeno. La pirolisi consente di impiegare la biomassa essiccata sia prima sia dopo l'estrazione dell'olio, ottenendo ancora un combustibile solido, uno liquido ed uno gassoso che possono contribuire a migliorare l'economia dell'intero processo. La digestione anaerobica consente di impiegare la biomassa tal quale per la produzione di metano, anche in questo caso prima o dopo l'estrazione dell'olio. Analizzando la situazione della Sardegna dal punto di vista dell'irraggiamento solare si può notare come, rispetto ad altre regioni d'Italia e d'Europa, i valori siano tra i più elevati attestandosi tra i 1.450 ed i 1.700 kWh m⁻² a⁻¹. Questo consente di affermare che una localizzazione di tali impianti in questa regione può trovare condizioni favorevoli (Petrick *et al.*, 2013). In questo momento in Sardegna è nella fase di avvio un'attività imprenditoriale basata sulla produzione di biomassa algale mediante fotobioreattori a basso costo destinati alla produzione di *Spirulina* su scala industriale e di *Nannochloropsis oculata* su scala pilota.

Quantificazione del fabbisogno energetico a livello regionale

Analizzando i dati pubblicati dal Ministero dello Sviluppo Economico e relativi, al 2005-2011 si rileva un calo progressivo in Sardegna dell'uso dei carburanti per il settore dei trasporti e del gasolio per il settore non auto. Per il GPL, l'incremento nel settore dei trasporti è compensato dalla diminuzione dei consumi per altri usi. anche l'olio combustibile a basso tenore di zolfo (BTZ), impiegato nel comparto industriale, ha fatto registrare una diminuzione importante a causa dei rilevanti impatti sull'ambiente che ne determina la sua combustione. I consumi di carbone nelle centrali termoelettriche di Portovesme e Fiumesanto sembrano mostrare una lieve flessione (-10% periodo 2006-2009), in parte giustificata dall'utilizzo di biomassa legnosa in sostituzione del carbone, in parte a causa della diminuzione dei consumi e dell'aumento di produzione di energia da fonti energetiche rinnovabili (Orrù A. e Triverio A., in Scano *et al.* 2013).

Fabbisogno di energia termica

Uno studio del CRESME RICERCHE SPA sul mercato delle costruzioni e le prospettive degli impianti termici e di condizionamento - Settore Residenziale del 2010 ha messo in evidenza come in Sardegna il tipo di combustibile maggiormente utilizzato negli impianti di produzione di energia termica è quello solido (legna e *pellet*) con il 30% del totale, seguito da quello di tipo gassoso (28%), dall'energia elettrica (23%) e da quello di tipo liquido (18%).

Dal consumo di biomasse per il riscaldamento domestico, tenendo conto della consistenza del patrimonio edilizio regionale e del rendimento degli impianti, è stato quantificato un impiego di energia primaria di circa 300 ktep a⁻¹.

Lo stesso impiego di 300 ktep a⁻¹ è stato identificato per il patrimonio edilizio residenziale.

Per il fabbisogno energetico specifico per il riscaldamento con l'uso delle pompe di calore è stato quantificato un impiego di energia primaria di circa 130 ktep a⁻¹.

Per i consumi finali da solare termico per riscaldamento, considerando un irraggiamento solare annuo medio di 1.500 kWh m⁻² e un rendimento dei pannelli pari a 0,42 è stato quantificato un impiego di energia primaria pari a circa 4 ktep a⁻¹.

In termini di energia primaria sono state stimate in circa 1.900 ktep le risorse energetiche complessivamente impiegate dall'industria nell'anno 2008, con il 72% destinato alla conversione in energia elettrica, contro le circa 2.550 ktep del 2005, delle quali circa il 65% destinato alla conversione in energia elettrica.

Mentre di circa 560 ktep, per il periodo, 2011-2012, con l'uso prevalente di vapore, *pet coke*, *fuel gas*, con la prevalenza di quest'ultimo.

Nel settore terziario i consumi termici, dato il perdurare di una lunga crisi economica, si sono ridotti del 41% nel triennio 2005-2008 (Orrù A. e Triverio A., in Scano *et al.* 2013).

Fabbisogno di energia elettrica

I consumi di energia elettrica in Sardegna, hanno mostrato, negli ultimi anni, significative flessioni sia in termini di fonti primarie sia di consumi elettrici. I consumi stimati di energia elettrica nel 2012 sono stati pari a circa 10,15 TWh, con una diminuzione rispetto al 2008, di circa il 15%. Il settore industriale ha rappresentato da solo il 56,35% dei consumi totali nel 2011.

E' stato stimato che comunque il consumo dell'industria manifatturiera di base abbia fatto registrare una diminuzione dal 2006 al 2012 del 33%.

La produzione lorda di energia elettrica nel 2011 è stata pari a 14.275,7 GWh, con l'esportazione nel 2012 di 2.280,00 GWh.

Lo studio dei consumi di energia in Sardegna ha evidenziato la forte influenza, sulle previsioni, della presenza di una forte concentrazione dell'impiego su un numero limitato di utenze rilevanti. In particolare, il recente processo di spegnimento delle celle elettrochimiche dell'ALCOA di Portovesme ha determinato una riduzione consistente dei consumi e si ipotizza che a regime questo determinerà una riduzione dei consumi elettrici di quasi 2,3 TWh pari al 19% dei consumi registrati nel 2011.

Pertanto allo scopo di rendere la valutazione delle stime di consumo adattabili a diverse condizioni di contesto sono state sviluppate delle proiezioni in maniera disaggregata per settore merceologico. Il gruppo di lavoro per il Piano Energetico Regionale ha individuato due scenari possibili: il primo denominato di "sviluppo" e il secondo di "base". I due scenari limite proiettati sul 2017, indicano in un caso una flessione dei consumi di circa il 16% e nell'altro un incremento di circa l'8% (nel caso del limite inferiore le percentuali raggiunte sono molto simili a quelle osservate a livello nazionale).

Lo sviluppo nell'impiego delle biomasse a fini energetici, seppure sostenuto da scelte strategiche comunitarie e nazionali e giustificato da motivazioni economico-ambientali di razionale impiego delle risorse, soprattutto residuali, non potrà non risentire della prevista contrazione dei consumi energetici.

Nell'ottica del *Burden Sharing*, comunque, risulta di particolare importanza l'evoluzione del contributo ai consumi finali dell'energia termica da biomasse.

L'incidenza degli impianti a biomasse per il riscaldamento in Sardegna è in costante crescita e si valuta conservativamente che la Sardegna incida per il 6% sulla produzione nazionale. Il consumo stimato di biomassa convertita in energia termica è pari a circa 300 ktep.

Tale valore è notevolmente superiore alla quota termica prevista dal *Burden Sharing* (125 ktep di cui solo il 23% da biomasse), peraltro ripartita quasi esclusivamente tra i settori residenziale e terziario. Gli impianti in ambito domestico alimentati da sole biomasse (57% camini e termo camini, 38% stufe, il restante, caldaie) fanno prevedere una crescita significativa per il mercato dei *pellet* e del cippato.

In ambito industriale le risorse energetiche di origine fossile, da qualche tempo, sia pure ancora in misura limitata, sono sostituite con l'impiego di diverse biomasse.

Il contributo delle biomasse alla produzione di energia elettrica rilevato nel monitoraggio statistico-quota regionale-settore elettricità (SIMERI GSE) per il 2011 è stato pari a circa il 27% del valore totale richiesto dal *Burden Sharing* limite (200 ktep). In base alla potenza installata però è stato coperto il 36% del valore totale richiesto dall'obiettivo limite.

I soggetti che possono produrre energia termica ed elettrica, adottando adeguate tecnologie per la conversione energetica delle biomasse sono:

- Utenti/operatori domestici;
- Utenti/operatori residenziali;
- Utenti/operatori del settore industriale e agricolo;
- Produttori di energia.

Il fabbisogno energetico varia in funzione della tipologia e della dimensione della struttura servita dall'impianto a biomasse e con qualche semplificazione, si possono ritenere accettabili i seguenti riferimenti dimensionali. Per esigenze domestiche il fabbisogno energetico che può essere coperto dall'impiego delle biomasse è di tipo

termico per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria (ACS) che per la fascia climatica della Sardegna è pari a circa $100 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$.

Il fabbisogno che può essere coperto è sia di tipo termico sia elettrico ed è possibile fare la seguente classificazione:

- Agriturismi e piccoli centri residenziali con fabbisogno termico pari a circa $165 \text{ kWh}_t \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ed elettrico di circa $140 \text{ kWh}_e \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;
- Centri commerciali, centri sportivi e centri servizi con fabbisogno termico pari a circa $240 \text{ kWh}_t \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ed elettrico di circa $260 \text{ kWh}_e \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;
- Pubblica amministrazione con fabbisogno termico così ripartito:
- Uffici pubblici;
- scuole con superficie media pari a 300 m^2 : $105 \text{ kWh}_t \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ e elettrico di circa $110 \text{ kWh}_e \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;
- Ospedali con superficie media pari a 500 m^2 : $180 \text{ kWh}_t \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ed elettrico di circa $120 \text{ kWh}_e \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$.
- Operatori del settore industriale e agricolo:
- I produttori di materie prime quali allevatori, agricoltori e silvicoltori che hanno fabbisogni energetici limitati e paragonabili a quelli di un piccolo complesso residenziale (circa $165 \text{ kWh}_t \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ed elettrico di circa $140 \text{ kWh}_e \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$);
- I trasformatori delle materie prime agricole, quali industrie agroalimentari, del legno, vivai e serre, con fabbisogno energetico, elettrico e termico, legati alla tipologia e alla dimensione dei processi di trasformazione industriale;
- L'obiettivo di tali operatori è la produzione e la vendita dell'energia termica ed elettrica e adottano scelte dimensionali e tecnologiche che discendono oltre che dalla disponibilità delle biomasse, da fattori di carattere strettamente economico.

I problemi d'impatto ambientale dovuti ai processi di trattamento di biomassa per ottenere energia, quali la digestione anaerobica con incluso compostaggio, l'incenerimento e la gassificazione, si possono attribuire all'immagazzinamento, alle emissioni prodotte dagli impianti, al trattamento delle ceneri di combustione e delle acque reflue.

L'immagazzinamento delle biomasse è necessario per via dalla stagionalità delle produzioni e dall'esigenza di omogeneizzare le differenti tipologie di biomassa in alimentazione all'impianto allo scopo di renderne i processi di conversione in energia più efficienti. Si preferiscono soluzioni che riducono gli stoccaggi (non superiore a quattro giorni di marcia a pieno regime dell'impianto) sia per motivi logistici sia a causa dei processi di naturale degradazione delle biomasse che oltre a ridurre il loro contenuto energetico, può determinare problemi d'inquinamento delle matrici ambientali aria e acqua. Le biomasse devono essere protette dagli agenti atmosferici, (solo il legno mostra una certa resistenza alla degradazione) e devono essere ben aerate in modo da evitare la rapida degradazione, la formazione di liquami e di biogas. Qualora le biomasse siano costituite anche da rifiuti agricoli, occorre evitare l'emissione di cattivi odori, derivanti dalla loro putrefazione, mediante un trattamento di essiccamento artificiale o di altre opportune tecniche di abbattimento.

In sostanza si deve evitare che l'area di deposito diventi nucleo d'attrazione sia per gli insetti sia per i roditori. Tutti gli impianti di conversione hanno bisogno di efficaci e complessi sistemi di trattamento degli effluenti prodotti allo scopo di ridurre drasticamente l'emissione di inquinanti. Nei processi di combustione si generano prevalentemente emissioni gassose e polveri, il cui controllo e abbattimento sono garantiti attraverso un'adeguata conduzione degli impianti e un efficace abbattimento, a valle, prima del rilascio in atmosfera.

Nel processo di digestione anaerobica per la produzione di biogas oltre agli evidenziati problemi di potenziali percolamenti ed emissioni di odori occorre considerare anche l'impatto dovuto alla gestione del digestato, che oltre a porre problemi logistici richiede trattamenti di separazione solido-liquido e in alcuni casi trattamenti di riduzione dell'Azoto totale per il digestato da smaltire in pieno campo (recepimento della Direttiva nitrati Dir. 91/676/CEE, nel Dlgs. n.152/06 e norme tecniche contenute nel Dm. 7/4/2006) (Orrù A. e Triverio A., in Scano *et al.* 2013).

Definizione delle azioni necessarie all'attuazione

Le scelte fondamentali del Piano Regionale delle Biomasse sono riassunte fondamentalmente nelle seguenti linee di azione:

AZIONE 1: Emissione di linee guida per la regolamentazione e l'incentivazione dello sfruttamento delle risorse finalizzate alla realizzazione di impianti a biomasse in Sardegna;

AZIONE 2: Promozione e incentivazione delle ipotesi di studio;

AZIONE 3: Georeferenziazione del quadro conoscitivo delle biomasse.

Tali azioni possono essere attuate mediante i seguenti strumenti:

1. incentivazione del recupero e della valorizzazione delle risorse anche attraverso:

- premialità per gli operatori che sottoscrivano accordi di ritiro per la valorizzazione energetica delle biomasse residuali;
- finanziamenti per la realizzazione di strutture logistiche asservite al recupero per la valorizzazione della biomassa (per esempio in prossimità dei mercati);
- finanziamenti di impianti pilota di tipo cogenerativo con teleriscaldamento (in aree industriali e in prossimità dei centri urbani);
- valorizzazione di colture microalgali (o di oleaginose in genere) per la produzione di biocombustibili;
- finanziamento di impianti di teleriscaldamento per edifici di pubblica utilità anche in presenza di una offerta energetica termica di tipo privato;
- individuazione di strumenti di promozione e sviluppo della produzione di energia da biomasse quali:

2. studi di settore finalizzati all'instaurazione di accordi di filiera:

- per la produzione di energia termica da biomassa legnosa;
- per la produzione di biocarburanti da colture dedicate;

3. studi di settore rivolti alla caratterizzazione della domanda specializzata di energia termica nei differenti distretti industriali e artigianali;

4. regolamenti di gestione delle aree industriali e artigianali rivolti a favorire e/o incentivare la produzione di energia da biomasse, preferibilmente residuali;
5. regolamenti urbanistici comunali atti a favorire, con i necessari limiti e condizioni, la localizzazione degli impianti termici a biomassa in prossimità dei centri urbani.

3.2 Potenzialità energetiche delle biomasse residuali in Sardegna

Poiché sono presenti diverse barriere economiche che rendono difficoltosa la produzione di energia da biomasse rispetto ai combustibili fossili, ma che sul territorio della regione è presente un notevole potenziale energetico ascrivibile alle biomasse residuali, si è incentrata l'attenzione su queste ultime risorse. Questo è stato fatto con l'obiettivo di verificarne la reale possibilità d'impiego nel settore della produzione di energia da fonti rinnovabili (Scano *et al.*, 2014).

3.2.1 Metodologia di indagine

Per tutte le biomasse sono state acquisite le seguenti informazioni generali: estensione, tipologia e localizzazione delle colture energetiche praticate; aree agricole suscettibili di essere impiegate per la produzione di biomasse con finalità energetiche; produttività medie attese per tipologia di coltura ($t\ ha^{-1}$) e condizioni locali; quota parte del territorio a uso agricolo potenzialmente destinabile a colture convertibili in biocarburanti (oleaginose e non); identificazione geografica delle aree potenziali e stima della produttività ($t\ h\ a^{-1}$ e percentuale di olio). In particolare si è tenuto conto di:

- biomasse di derivazione agricola;
- biomasse forestali attualmente ricavabili sia dai processi gestionali del patrimonio forestale regionale, sia dalle aree a destinazione silvo-culturale e loro potenziale sviluppo, con particolare riferimento alle tecniche di *Short Rotation Forestry* (quantità, tipologia, localizzazione ed eventuale loro attuale finalizzazione, energetica e non);
- residui del settore zootecnico;
- residui di lavorazioni agroindustriali;
- frazione organica, convertibile in termini energetici, derivante dai sistemi di gestione dei rifiuti solidi urbani e dai sistemi di depurazione delle acque;
- residui delle lavorazioni del legno e affini.

Per il settore specifico delle biomasse residuali la metodologia utilizzata per lo studio si è articolata in due diverse fasi. Nella prima fase è stata eseguita un'indagine per l'acquisizione di informazioni generali, relative alle diverse attività presenti nella regione che originano biomasse residuali, che ha permesso di individuare i contributi predominanti nel territorio per settore economico di appartenenza.

Nella seconda fase, dopo aver individuato la localizzazione e la tipologia dei residui identificati, si è proceduto con la stima delle quantità e la valutazione dell'attuale riutilizzo, a scopo energetico o no. Il metodo impiegato ha preferito le informazioni dirette pervenute dai soggetti istituzionalmente competenti (agenzie ed enti regionali). Laddove questo non è stato possibile ci si è basati su indicazioni e dati disponibili nei più recenti documenti ufficiali e/o su pubblicazioni scientifiche. In questo modo è stato possibile elaborare un quadro articolato delle risorse disponibili, seppure non completamente georeferenziato, correlabile sia con la potenziale domanda energetica locale sia con la rete infrastrutturale esistente (energetica e non). Sulla base delle informazioni acquisite e dei dati di letteratura concernenti le prestazioni dei processi

energetici sono stati stimati sia il potenziale attualmente disponibile che il presumibile incremento derivante da alcune scelte colturali rivolte ad una maggiore valorizzazione, in termini energetici, del territorio regionale con adeguati requisiti. Ogni singola risorsa studiata è stata indirizzata, sulla base delle proprie caratteristiche (umidità % e rapporto C/N), verso uno dei due principali processi di conversione che è possibile adottare in Sardegna: quello termochimico (combustione) e quello biochimico (digestione anaerobica), mancando al momento i presupposti per valutare altri possibili utilizzi rivolti per esempio alla produzione di biocarburanti o alla pirolisi e alla gassificazione. Il quadro conoscitivo complessivo, relativo sia alle biomasse in generale sia alla sottocategoria di quelle residuali, è stato infine utilizzato per individuare i potenziali bacini agro-energetici nei quali valorizzare, dal punto di vista della filiera corta, le diverse tipologie di biomasse disponibili. Partendo da tali bacini, dalle caratteristiche delle biomasse disponibili e dalla loro quantità, che determinano la tecnologia e la potenza installabile, dagli impieghi già in atto, dalla rete infrastrutturale esistente e, infine, da tutti gli aspetti connessi alla domanda di energia, è possibile, in prospettiva, individuare eventuali distretti energetici. Per quanto attiene specificamente ai dati di fabbisogno energetico, si è fatto riferimento all'analisi di contesto e all'evoluzione del sistema sviluppato nel PEARS. Nell'ambito dello *Studio sulle potenzialità energetiche delle biomasse* citato in precedenza, è stata compiuta, infine, una ricognizione del parco degli impianti alimentati con biomasse per la produzione di energia elettrica con qualifica IAFR (Impianti Alimentati da Fonti Rinnovabili) presso il GSE aggiornato al 31 dicembre 2014 (GSE 2014).

3.2.2 Risultati e discussione

L'indagine ha portato all'individuazione dei settori produttivi che contribuiscono in modo predominante alla produzione di biomasse residuali in Sardegna. Sono state individuate quattro principali macrocategorie di residui: i residui agricoli (paglie, potature di frutteti, vite e ulivo, residui colturali di carciofo e di pomodoro); i residui agroindustriali (residui dell'industria del legno, dell'industria enologica, dell'industria olearia, quali sanse, nocciolino e acque di vegetazione, del settore lattiero caseario, quali siero e scotta); i reflui zootecnici e gli scarti di macellazione.

Complessivamente, le principali biomasse residuali in Sardegna ammontano a oltre 5 milioni di tonnellate all'anno, ripartite tra i diversi settori produttivi come mostrato nella Fig.1a. Il grafico evidenzia che la gran parte delle biomasse residuali è costituita dai reflui zootecnici e questo è perfettamente in linea con il fatto che l'allevamento è uno dei settori economici fondamentali dell'Isola. Nella Fig.1b è mostrata la ripartizione percentuale delle biomasse agricole. Come si può notare, la quota maggiore è dovuta ai residui colturali del carciofo, del quale la Sardegna è il terzo produttore italiano; seguono le paglie, relative principalmente alla coltura del frumento, e le potature di vite. Nella Fig.1c, infine, è mostrata la ripartizione percentuale delle biomasse residuali agroindustriali. In questo caso il contributo principale riguarda il settore lattiero-caseario, che rappresenta, in termini dimensionali, il segmento più importante nel comparto agroindustriale della Sardegna; seguito dalle biomasse residuali derivate dall'industria del legno e dall'industria olearia. Se si esaminano i dati riportati nella Fig.2a si può notare come il maggiore contributo potenziale alla produzione di energia da biogas sia fornito dai reflui zootecnici (84,6% del totale), seguiti dai residui colturali del carciofo (10,7%) e dai residui colturali del pomodoro (3,4%).

I reflui caseari, invece, pur essendo la biomassa residuale agroindustriale maggiormente rappresentativa per quantità, date le loro caratteristiche compositive, (elevata percentuale di umidità), incidono marginalmente sull'energia potenzialmente

producibile. Lo stesso discorso vale per gli scarti di macellazione, anche se in questo caso il risultato è determinato dalla quantità disponibile. Tuttavia, questi due ultimi residui hanno riflessi molto negativi dal punto di vista ambientale e il loro smaltimento rappresenta a tutt'oggi un serio problema per la regione.

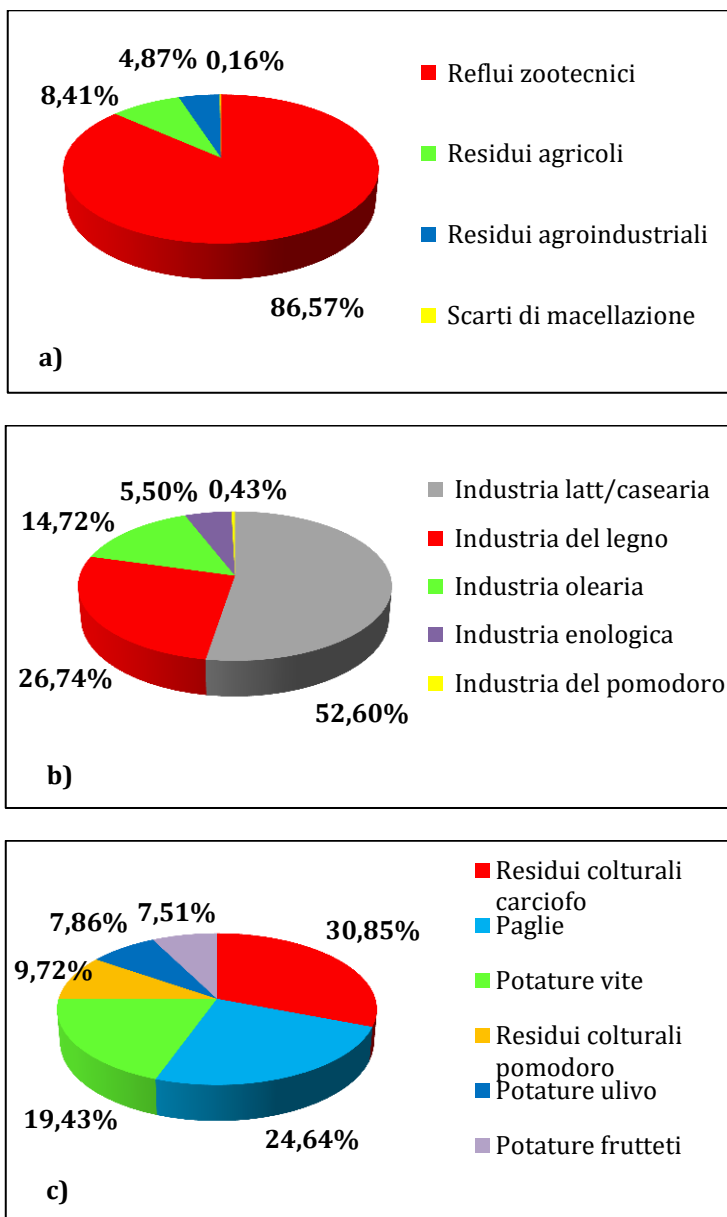


Figura 1- a) Biomasse residuali: suddivisione per macrocategorie; b) Ripartizione percentuale delle biomasse residuali agricole; c) Ripartizione percentuale delle biomasse residuali agroindustriali.

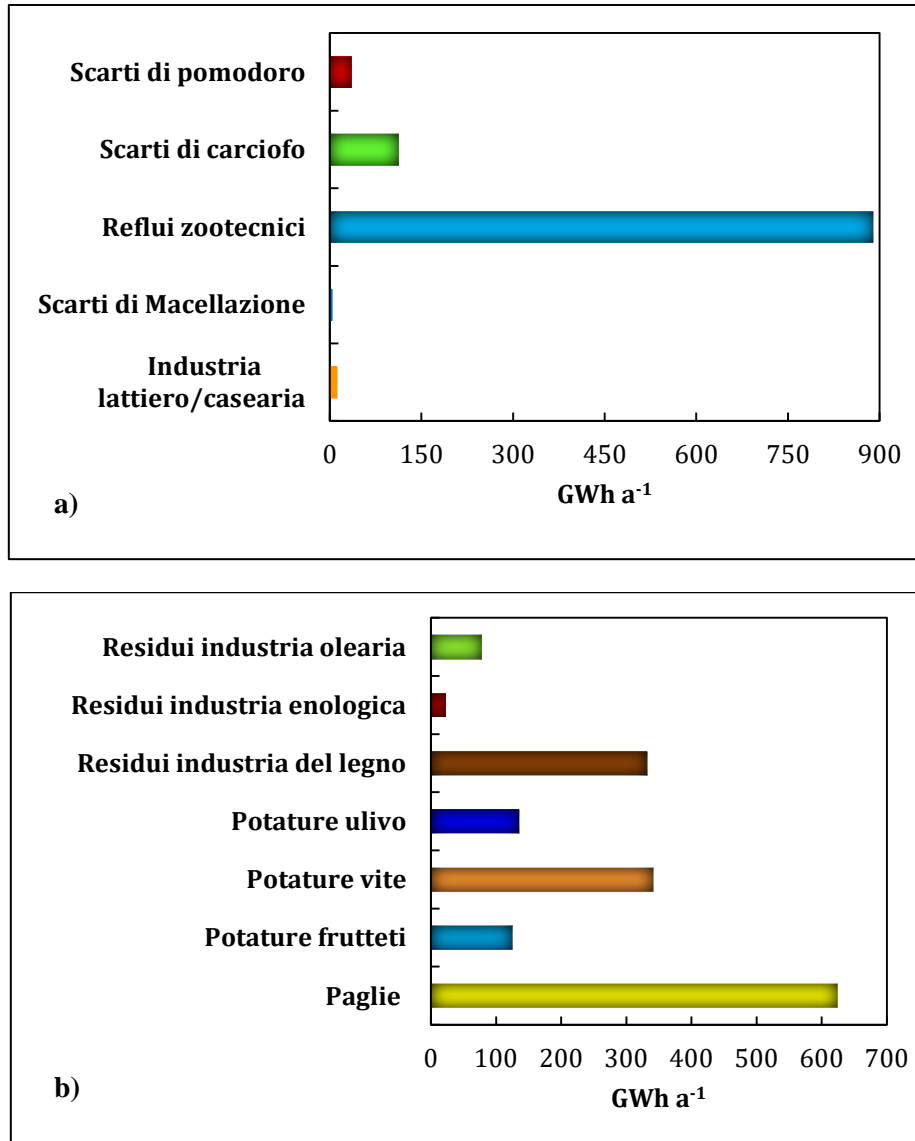


Figura 2 - a) Contributi delle singole biomasse alla produzione potenziale energia da biogas; b) Contributi delle singole biomasse alla produzione potenziale di energia mediante processi termochimici.

Secondo quanto riportato nella Fig.2b appare evidente come il maggiore contributo potenziale alla produzione di energia mediante processi termochimici sia fornito dalle paglie (37,6% del totale), seguite dalle potature di vite (20,6%) e dai residui dell'industria del legno (20,0%).

Le potature di frutteti e ulivo incidono pressoché in uguale misura (rispettivamente 7,5% e 8,1%), mentre più limitato, è il contributo dei residui dell'industria olearia (4,7% del totale). Sommando i contributi del potenziale energetico da biomassa impiegabile nella produzione di biogas e in processi termochimici si ottiene un valore

complessivo pari a 227,9 ktep a⁻¹, ripartiti tra 90,3 per il biogas e 137,6 per i processi termochimici.

Il valore di 227,9 ktep a⁻¹ rappresenta il 4,8% circa dei consumi finali di energia primaria della Regione nel 2008. Tenendo conto dei consumi energetici finali valutati ai fini del *Burden Sharing* e consolidati in Sardegna nel 2011, si stima un potenziale contributo delle biomasse residuali pari al 7% circa. Questo fornisce una misura dell'importanza che possono rivestire le biomasse residuali in Sardegna.

Se si esaminano i dati del GSE pubblicati nel Luglio 2015, escludendo gli impianti operanti in co-combustione ed esistenti prima del 1999, si rileva un numero complessivo di impianti a biomasse solide e a biogas, ammessi agli incentivi in esercizio e non, pari a 38, con una potenza complessiva pari a 45,50 MW. La situazione globale è riportata in Fig.3: gli impianti a biogas nel loro insieme raggiungono la potenza di 21,70 MW, gli impianti a biomasse solide 23,80 MW.

Dal punto di vista dell'alimentazione un impianto a biogas richiede 55-60 tonnellate al giorno di biomassa per ogni MW installato, mentre un impianto a biomasse solide ne richiede 35-40. Gli impianti a biogas sono prevalentemente alimentati con biomasse derivanti da colture dedicate e prevalentemente costituite da mais trinciato e da triticale (un ibrido ottenuto dall'incrocio di frumento e segale).

Questo richiede estese coltivazioni per approvvigionare con continuità la linea di produzione; gli impianti a biomasse solide richiedono materiali legnosi e questo comporta ugualmente la disponibilità di estensioni elevate di colture di tipo forestale.

Le biomasse residuali, come evidenziato dai dati illustrati in precedenza, presentano una notevole valenza poiché il loro potenziale contributo energetico è sicuramente superiore a quello richiesto dagli impianti presenti (circa 100 ktep), per cui potrebbero fornire un apporto decisivo quali materie prime sostitutive. Questo si tradurrebbe in una minore richiesta di superficie coltivata a biomassa per uso energetico, con un conseguente minore impegno di territorio e quindi con una sua maggiore disponibilità per altri usi agricoli.

Da un punto di vista strettamente ambientale, impiegare le biomasse residuali nella produzione di energia significa sottrarne una notevole quantità ai processi di smaltimento successivo e comunque modificarne le caratteristiche in modo da avviarle ai successivi processi in condizioni di maggiore stabilità microbiologica. Tuttavia, occorre considerare gli aspetti connessi all'impatto ambientale dei processi impiegati per la produzione di energia, in particolare della digestione anaerobica per l'ottenimento del biogas e dei processi termochimici.

La digestione anaerobica, in condizioni normali di processo, riduce di circa il 20% il volume della biomassa iniziale; residua però il digestato, un materiale, contenente un'elevata umidità e una piccola quantità di sostanza organica che deve essere avviato all'uso agronomico o destinato al successivo compostaggio.

I processi termochimici, invece, comportano inevitabilmente emissioni gassose e la produzione di ceneri, che possono essere impiegate in altri processi oppure destinate alla discarica.

Lo stoccaggio delle biomasse residuali, necessario per la stagionalità delle produzioni e per omogeneizzare le caratteristiche delle materie prime, ne determina la degradazione naturale, molto rapida nel caso di diversi residui agroindustriali, con la formazione di reflui liquidi, metano e altre sostanze con un certo impatto ambientale. La combustione delle biomasse può avere un certo impatto ambientale, soprattutto per gli impianti che presentano carenze progettuali di base o non sono dotati di adeguati sistemi di controllo.

Nei processi di combustione si generano prevalentemente emissioni gassose e polveri, di cui il controllo e l'abbattimento possono essere garantiti da un'adeguata conduzione

degli impianti e un efficace sistema di abbattimento, a valle, prima del rilascio in atmosfera.

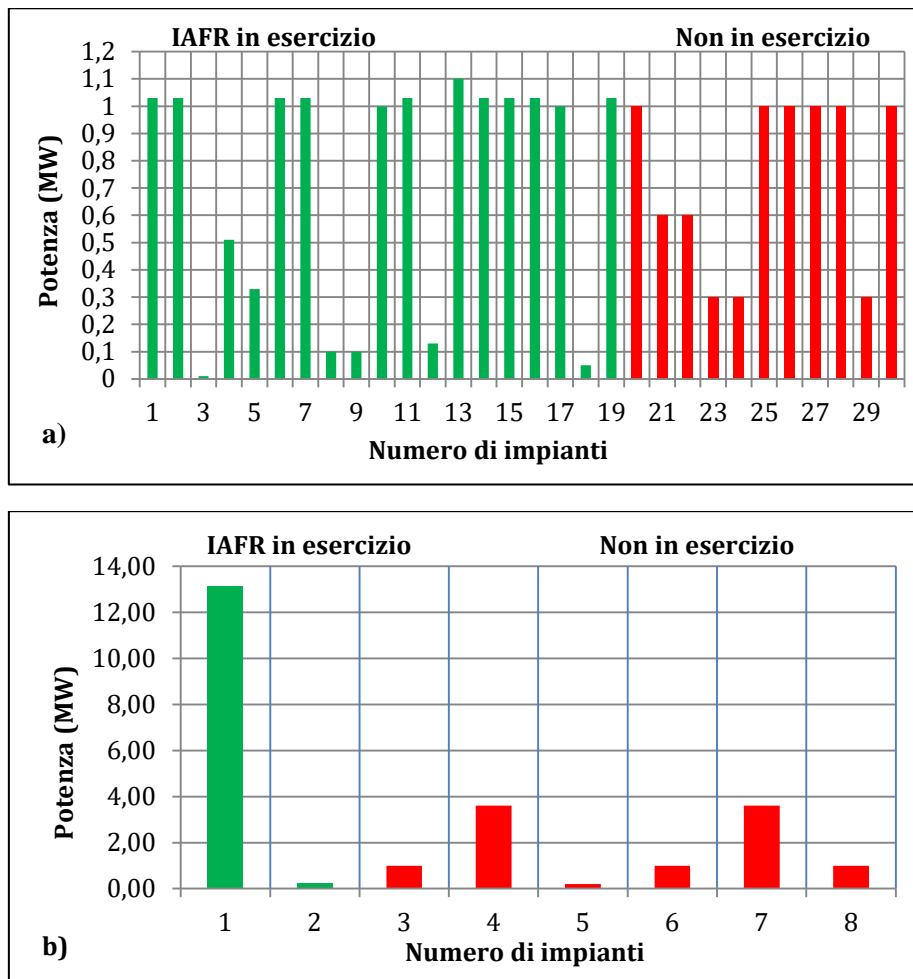


Figura 3 - a) Impianti a biogas in Sardegna; b) Impianti a biomasse solide in Sardegna.

Particolare attenzione è posta al recupero e al trattamento delle ceneri che si formano durante i processi di trattamento termico poiché esse contengono metalli pesanti, quali rame, nickel e zinco che, se recuperati nei processi di trattamento a umido, possono formare liquami potenzialmente inquinanti per suolo e acque superficiali e di falda (Asquer *et al.*, 2015). Normalmente le ceneri volanti sono separate dal gas mediante trattamenti a secco (cicloni e filtri a maniche) per evitare il trattamento delle acque di scarico.

La combustione di biomasse produce elevate emissioni di particolato superiori a 50 mg m^{-3} (Nussbaumer, 2003). Le particelle emesse sono di tipo primario, ultrafine e iperfine, quindi ben di sotto dei $10 \mu\text{m}$ (PM10). Nel caso delle particelle di legno gli elementi rilasciati dal combustibile e responsabili della formazione del particolato sono fondamentalmente potassio, zolfo e cloro. Altri metalli, quali per esempio il calcio, sono direttamente rilasciati in forma di particelle solide.

Un altro elemento in grado di originare particelle è lo zinco che evapora nel corso del processo e si ossida originando ZnO.

Per quanto concerne la produzione di metano attraverso la digestione anaerobica, occorre considerare la necessità di procedere alla depurazione del biogas per allontanare l'idrogeno solforato, l'ammoniaca e l'umidità, con la conseguente possibilità di emissioni gassose e liquide.

Complessivamente, prima di procedere allo studio di un'installazione a biomasse residuali per la produzione di energia, è necessario valutare: il consumo di altre risorse (acqua e territorio), i disturbi esterni e interni al sito prescelto, l'emissione di gas serra, l'inquinamento atmosferico possibile, la produzione di reflui da trattare, lo smaltimento dei residui di processo (ceneri e digestato). Pur tenendo conto di tutte queste problematiche, comunque, gli aspetti positivi sono notevoli poiché dallo sfruttamento delle biomasse residuali si possono avere numerosi benefici ambientali ed economici. Infatti, è possibile conseguire la riduzione del consumo di combustibili fossili, la riduzione delle emissioni di gas serra e del volume delle discariche, la stabilizzazione dei materiali, lo sfruttamento integrale delle materie prime destinate alle trasformazioni agroindustriali, la produzione autonoma di energia nei siti agricoli e industriali.

3.2.3 Conclusioni

La stesura del piano regionale delle biomasse ha consentito di individuare con precisione tutte le biomasse presenti in Sardegna in termini di quantità e potenziale energetico. Questo è un risultato molto importante e trova pochi riscontri nelle altre regioni italiane. Un aspetto certamente innovativo concerne l'approccio impiegato per il trattamento delle biomasse residuali per le quali in Sardegna esistono enormi possibilità di impiego.

Lo studio condotto, infatti, ha portato all'individuazione dei settori produttivi che contribuiscono in modo predominante alla produzione di biomasse residuali in Sardegna. Le biomasse residuali, che costituiscono uno scarto dei processi che le generano e che in larga parte confluiscono in questo momento nel terminale processo di gestione dei rifiuti, sono state considerate risorse energetiche. Questo a prescindere dalla loro classificabilità quali sottoprodotti, in considerazione dell'evoluzione normativa europea e nazionale sempre più rivolta alla cessazione della qualifica di rifiuto per le materie valorizzabili in termini energetici.

L'esito della riclassificazione delle biomasse residuali, finalizzata alla valorizzazione energetica, è tanto più virtuoso quanto più evidenti sono i benefici economici e ambientali, rappresentati sia dal risparmio di risorse energetiche di origine fossile, sia dalla riduzione globale delle emissioni di diossido di carbonio, sia dalla progressiva riduzione dei volumi di rifiuti da destinare allo smaltimento in discarica. Tuttavia, la valutazione della compatibilità tecnica, economica e ambientale di una determinata biomassa al recupero energetico, attraverso un determinato processo tecnologico, è fondata su un'adeguata caratterizzazione della fonte energetica, allo scopo di individuarne i requisiti applicativi atti a consentire l'ottimale convertibilità in energia nell'ambito di processi industriali.

La valorizzazione energetica delle biomasse derivate da residui agricoli o agroindustriali deve essere subordinata alla loro caratterizzazione chimico-fisica ed energetica e alla validazione degli impianti utilizzabili, allo scopo sia di massimizzarne il beneficio energetico e quindi economico, sia di minimizzarne gli impatti sull'ambiente. Sono state identificate quattro principali macrocategorie di residui: i residui agricoli, i residui agroindustriali, i reflui zootecnici e gli scarti di macellazione.

La stima del potenziale energetico da biomasse residuali è stata rivolta principalmente a valutare la dimensione della quantità di energia potenzialmente disponibile e il possibile contributo al fabbisogno energetico regionale, oltre che gli effetti ambientali derivanti da un razionale utilizzo di tali risorse.

La disponibilità di biomasse residuali presenti nel territorio isolano ha consentito di individuare fundamentalmente due tecnologie applicabili nella produzione di energia, la digestione anaerobica e la combustione, utilizzando le quali è possibile realizzare impianti, anche di piccola taglia, e localizzarli all'interno dei bacini nei quali si ha un'adeguata disponibilità di risorse. I risultati dell'indagine condotta in Sardegna mostrano la disponibilità di importanti quantità di biomasse residuali, di differenti tipologie, in grado di fornire un contributo di circa il 7% al soddisfacimento regionale dei consumi energetici finali consolidati nel 2011. Se si considera, infine, il fatto che da allora si è registrata una rilevante contrazione dei consumi di energia, è lecito ipotizzarne un'incidenza superiore nel futuro. Per quanto concerne l'individuazione della taglia degli impianti potenzialmente installabili è comunque necessaria una ricognizione più approfondita per la valutazione della distribuzione delle biomasse residuali e della loro effettiva ritraibilità negli specifici bacini. Un esempio di questa attività è illustrato nel dettaglio per le biomasse forestali nel Capitolo 5 di questa tesi.

Infine, per una valorizzazione sostenibile delle risorse individuate, occorre valutare e gestire razionalmente le problematiche ambientali connesse con i processi di conversione energetica delle biomasse residuali. Questo al fine di promuovere un nuovo modello di generazione energetica diffusa, integrato nei contesti specifici e che possa essere largamente accettato dalle comunità locali.

Capitolo 4

In questo capitolo sono illustrati i risultati delle prove sperimentali condotte su un impianto pilota di digestione anaerobica, descritto dettagliatamente nella sezione 4.3.1. Sono state eseguite prove di trattamento dei residui del mercato ortofrutticolo della Sardegna, dei residui dell'industria di trasformazione delle patate e dei residui dell'industria olearia e casearia in co-digestione con colture energetiche dedicate.

Nel caso dei residui ortofrutticoli è stata eseguita un'approfondita caratterizzazione chimica dei singoli vegetali, per verificarne l'effettiva possibilità di impiego quale singolo substrato per la digestione anaerobica, in termini di analisi prossima, analisi ultima, macroelementi, microelementi ed elementi in tracce. È stata calcolata previsionale la percentuale di metano nel biogas. Sono state infine eseguite prove di digestione in condizioni mesofile utilizzando i residui ortofrutticoli come singolo substrato. Nel caso dei residui dell'industria delle patate sono state utilizzate condizioni termofile e quale substrato i residui solidi da soli (tuberi e bucce) o in combinazione con le *chips* di scarto, le bucce e le acque di processo. Nel primo caso l'obiettivo principale è stato quello di identificare i parametri ottimali per ottenere un'efficiente conversione dei residui solidi in biogas. Nel secondo caso lo scopo finale è stato quello di studiare un processo di trattamento unico per ottenere energia da tutti i reflui e i residui dell'industria di trasformazione. Nel caso delle colture energetiche dedicate, infine, il trinciato di mais e il triticale di base sono stati sostituiti con una miscela costituita da acque di vegetazione, sanse, scotta e letame e condotte prove in parallelo con un impianto industriale in condizioni mesofile.

Infine l'analisi statistica multivariata è stata impiegata per identificare specifiche relazioni tra le variabili più significative per il processo anche quando sono sottoposte ad un ampio intervallo di variazione.

Impiego della Digestione Anaerobica

La digestione anaerobica è un processo di degradazione biochimica in assenza di ossigeno, impiegato spesso per il trattamento e il recupero energetico da diversi materiali organici di scarto (Murto *et al.*, 2007, Ward *et al.*, 2008, Alvarez *et al.*, 2010, Di Maria *et al.*, 2012, Gomec *et al.*, 2013).

Il principale prodotto della digestione anaerobica è una miscela di gas (biogas), composta principalmente da metano (CH₄) e anidride carbonica (CO₂), di norma impiegata quale combustibile per la produzione di energia elettrica e termica. Un prodotto secondario è rappresentato da un residuo solido-liquido denominato digestato che può essere riutilizzato come ammendante del suolo, come materiale di base per la preparazione di *compost*, o previo essiccamento per la produzione di energia, mediante processi termochimici (Holm-Nielsen *et al.*, 2009, Tambone *et al.*, 2010, Teglia *et al.*, 2011, Abubaker *et al.*, 2012, Yazdani *et al.*, 2012).

La diffusione di questa tecnologia nel corso degli ultimi decenni è in linea con le politiche di sostenibilità ambientale adottate dall'Unione Europea e con l'incremento dell'uso di materie prime di basso costo per la produzione di energia da fonti rinnovabili. Attualmente, infatti, la digestione anaerobica è utilizzata per il trattamento di letami di origine animale (Appels *et al.*, 2008, Poudel *et al.*, 2010) e fanghi di depurazione e si registra un incremento costante per il trattamento di residui agricoli, agro-industriali e FORSU (Sosnowski *et al.*, 2003). Inoltre moltissimi impianti trattano colture energetiche dedicate quali il mais e il triticale (Murphy *et al.*, 2009, Herrmann *et al.*, 2011, Lindmark *et al.*, 2012).

Gli impianti di digestione anaerobica che fanno uso di colture dedicate sono diffusi in tutta l'Europa e il loro numero è cresciuto moltissimo anche in Italia, facendo registrare un incremento notevole nel periodo 2009-2012, soprattutto per via dei generosi incentivi messi in campo dai governi nazionali (280 €/MWh in Italia).

Tuttavia gli impianti alimentati con colture dedicate richiedono importanti quantitativi giornalieri di biomasse vegetali, la cui produzione ha bisogno di estese superfici coltivate e l'apporto di concimi e acqua per raggiungere adeguate rese agronomiche e contenere di conseguenza i costi delle materie prime ottenute. Un impianto di digestione anaerobica di grossa taglia (1 MW di potenza elettrica del co-generatore) necessita per esempio di una quantità giornaliera pari a 20.000-22.000 t a⁻¹ di trinciato di mais e triticale ed una superficie agricola impegnata pari a circa 350-500 ha che corrisponde ad un'impresa del settore di grandi dimensioni. In Sardegna ci sono diciotto impianti di digestione anaerobica da 1 MW che richiedono da soli una superficie coltivata pari a oltre il 60% della superficie dedicata al carciofo che rappresenta la specie ortiva maggiormente coltivata in Sardegna, ovvero la terza per dimensione produttiva in Italia.

Un'altra questione è legata all'elevata quantità di energia termica prodotta dai co-generatori degli impianti da 1 MW di potenza installata (la potenza globalmente non convertita in elettrica è dell'ordine di 1,5 MW, di cui almeno 0,6 MW_t utilmente recuperabile a temperatura medio-alta) che al momento risulta completamente dissipata nell'ambiente e per la quale può essere economicamente interessante trovare un impiego. Queste problematiche rendono complicato l'esercizio degli impianti di grande dimensione e ne costringono i gestori (imprese industriali e agricole) ad affrontare tutta una serie di difficoltà legate soprattutto all'approvvigionamento delle materie prime agli impianti.

Poiché la digestione anaerobica rappresenta un efficace processo di conversione biochimica delle biomasse vegetali e residuali e, data la grande disponibilità di queste ultime a basso costo nella regione, è possibile ipotizzare la presenza di tutta una serie di impianti di piccola taglia dislocati sul territorio e alimentare senza grandi difficoltà quelli di grande taglia.

Sarebbe così possibile contribuire in modo sostenibile alla produzione di energia da fonti rinnovabili e nello stesso tempo fornire una risposta a tutta una serie di problematiche ambientali legate alle produzioni agroindustriali tradizionali della Sardegna.

Questo però richiede lo studio, la messa a punto e la valutazione economica di processi mirati di digestione anaerobica con un singolo substrato o con una miscela di substrati per la risoluzione di problematiche specifiche relative a piccole realtà commerciali e produttive, o a grandi impianti agro-industriali di trasformazione e di produzione di energia.

4.1 Applicazioni nel trattamento di biomasse residuali

4.2 I residui ortofrutticoli

La frutta e i vegetali di scarto (FVR) rappresentano una classe molto importante di residui perché sono prodotti in grandi quantità nei mercati all'ingrosso e in altre attività economiche nel mondo e il loro smaltimento in discarica è abbastanza difficoltoso per via della loro elevata deperibilità (Viswanath *et al.*, 1992, Viturtia *et al.*, 1995). I FVR sono degradati rapidamente dai microrganismi che li contaminano e questo avviene ancora più rapidamente quando presentano danni meccanici o sono

eccessivamente maturi. Inoltre la produzione di FVR incrementa i costi operativi dei mercati sia a causa della mancata vendita, sia a causa dei costi di trasporto e smaltimento.

Nella letteratura scientifica sono presenti diversi lavori riguardanti la digestione anaerobica dei FVR (Sharma *et al.*, 1999, Bouallagui *et al.*, 2004, Tambone *et al.*, 2010, Azeem *et al.*, 2011, Garcia-Peña *et al.*, 2011, Jiang *et al.* 2012).

Tuttavia solamente in qualche lavoro sono stati impiegati i FVR come singolo substrato, mentre la maggior parte degli esperimenti è stata condotta su scala di laboratorio (massimo volume del reattore 20 l). Gli unici lavori condotti su scala pilota hanno fatto impiego di FVR in co-digestione con altri substrati (Sharma *et al.*, 2000, Lastella *et al.*, 2002, Macias-Corral *et al.*, 2008). La sopraccitata letteratura mostra che la digestione anaerobica dei FVR senza l'aggiunta di un co-substrato può essere particolarmente difficile per via del loro contenuto in zuccheri semplici che promuove la rapida acidificazione della biomassa con la conseguente inibizione dell'attività dei batteri metanigeni. Per ridurre l'effetto dell'acidificazione ed evitare l'inibizione spesso sono aggiunti altri substrati quali letame e fanghi di depurazione. Infatti, l'aggiunta di un substrato appropriato assicura una migliore stabilità del processo tenendo pressoché costante il contenuto in solidi volatili ed evitando l'aumento di sostanze facilmente degradabili. La localizzazione dei mercati all'ingrosso in prossimità dei centri abitati rende difficile avere la disponibilità e comunque impiegare questi particolari substrati.

Una possibile soluzione per ridurre gli effetti del processo di acidificazione è data dall'alimentazione del reattore con miscele bilanciate di residui di frutta e vegetali per diminuire il contenuto di frutta con un'elevata concentrazione di zuccheri semplici.

Inoltre l'adozione di un impianto di digestione anaerobica con due stadi può consentire di migliorare la stabilità del processo, nonostante questo richieda impianti di trattamento più complessi e costosi (Demirel *et al.*, 2002, Bouallagui *et al.*, 2005).

La corretta progettazione di un impianto su scala industriale richiede una conoscenza approfondita del processo di digestione anaerobica e in particolare degli effetti prodotti dalla composizione del substrato, del tasso di produzione del biogas e del bilancio complessivo di energia dell'intero sistema.

In questa sezione sono presentati i risultati sperimentali ottenuti con un digestore anaerobico pilota (volume del reattore 1,13 m³) alimentato solamente con FVR raccolti presso il Mercato Ortofrutticolo della Sardegna. Questo mercato è il maggiore dell'isola, tratta 150.000 t a⁻¹ di frutta e vegetali e produce 8-10 t d⁻¹ di residui.

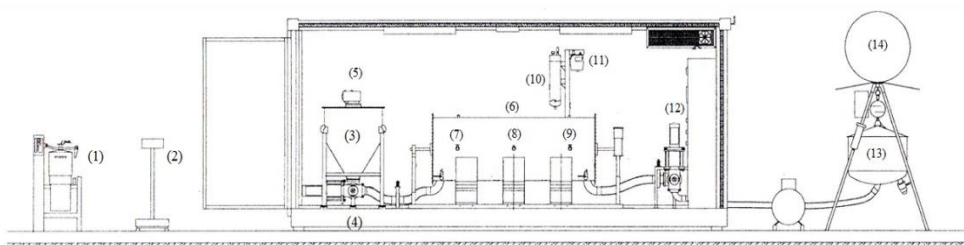
Questo esperimento è stato condotto per un periodo di 6 mesi in modo da valutare gli effetti prodotti dalla variabilità dei diversi tipi di frutta e vegetali in diversi periodi dell'anno e trovare le migliori condizioni operative per il processo di digestione anaerobica. I risultati sperimentali sono stati usati per la valutazione preliminare delle prestazioni di un impianto di digestione anaerobica su scala industriale per il trattamento dei FVR prodotti dal Mercato Ortofrutticolo della Sardegna.

4.2.1 Materiali e metodi

4.2.2 Impianto di digestione anaerobica su scala pilota

L'impianto pilota utilizzato è mostrato nella Fig.4. L'impianto è composto delle seguenti unità: un trituratore per il pretrattamento del substrato, una tramoggia di carico, un reattore tubolare orizzontale, una pompa pneumatica di alimentazione, una pompa pneumatica per lo scarico, una trappola di condensa, un misuratore di portata per il biogas, un serbatoio per il digestato, un compressore d'aria, un gasometro ed un sistema di controllo e supervisione.

Le sezioni principali dell'impianto sono allocate all'interno di un container come mostrato nella Fig.4. Dopo la triturazione le biomasse sono caricate nella tramoggia, nella quale sono miscelate mediante un agitatore verticale prima di essere immesse all'interno del reattore. La tramoggia (Fig.5) è montata su celle di carico, termicamente isolata e può essere riscaldata mediante una resistenza elettrica. Il reattore tubolare orizzontale (Fig.6) ha un volume complessivo di 1,13 m³, è parzialmente isolato mediante uno strato di materiale polimerico, dotato di un dispositivo di agitazione radiale e di un sistema di riscaldamento che consente di raggiungere una temperatura massima di 60°C. La temperatura è misurata e regolata automaticamente mediante tre termoresistenze poste lungo l'asse del reattore e collegate al sistema di riscaldamento. La pressione all'interno del reattore è misurata mediante un trasduttore di pressione. Il sistema di raccolta del biogas include una trappola per la rimozione dell'umidità, un misuratore di portata e un gasometro in materiale polimerico. Il digestato è allontanato dal reattore mediante una pompa pneumatica di scarico e inviato a un serbatoio esterno al container montato su celle di carico. Le specifiche degli elementi dell'intero sistema sono riportate nella Tab.1.



1	Trituratore	5	Agitatore verticale	11	Misuratore di portata
2	Bilancia	6	Reattore tubolare	12	Pompa del digestato
3	Tramoggia di carico	7-9	Sensori di temperatura	13	Serbatoio del digestato
4	Pompa di alimentazione	10	Trappola di condensa	14	Gasometro

Figura 4: Impianto pilota di digestione anaerobica.

Trituratore	200 kg h ⁻¹ , 4,5 kW
Volume della tramoggia di carico	0,25 m ³
Potenza dei riscaldatori della tramoggia di carico	1 kW
Pompa pneumatica di alimentazione	360 kg h ⁻¹
Volume di lavoro del reattore	0,95 m ³
Spessore dell'isolamento del reattore	30 mm
Conducibilità termica del materiale isolante	0,004 W m ⁻¹ K ⁻¹ (40°C)
Potenza dei riscaldatori del reattore	5 kW
Pompa pneumatica di scarico del digestato	360 kg h ⁻¹
Volume del serbatoio del digestato	0,20 m ³
Compressore	2,2 kW, 235 l min ⁻¹
Capacità del gasometro	0,65 m ³

Tabella 1: Principali specifiche tecniche dei componenti l'impianto pilota.



Figura 5: Tramoggia di carico.



Figura 6: Reattore tubolare.

L'impianto pilota è gestito da un sistema di supervisione che comprende un PLC che riceve i segnali di diversi sensori e aziona pompe, riscaldatori e agitatori.

Il PLC controlla, registra e gestisce i seguenti parametri: massa di substrato in alimentazione e di digestato, volume di gas prodotto, temperatura in tre posizioni lungo l'asse del reattore, pressione del biogas in uscita dal reattore, stato di sicurezza dei sensori. Gli altri parametri necessari al monitoraggio del processo di digestione anaerobica sono stati misurati giornalmente in laboratorio con le modalità indicate nella successiva sezione.

4.2.3 Campionamento, preparazione e caratterizzazione dei FVR

I materiali costituenti il substrato sono stati prelevati, due volte alla settimana, presso il Mercato Ortofrutticolo della Sardegna nel corso di tutto l'esperimento.

La caratterizzazione chimica in termini di solidi totali (ST), solidi volatili (SV), Ceneri, Carbonio fisso, Carbonio, Idrogeno, Azoto, Zolfo, macroelementi, microelementi ed elementi in tracce è stata eseguita sui singoli campioni delle più comuni specie di frutta e vegetali raccolti in un periodo di 6 mesi. I campioni erano costituiti da 10 tipologie di frutta (albicocca, banana, limone, melone, arancia, pesca, pera, ananas, clementina, cocomero), 13 tipologie di vegetali (melanzana, broccoli, cavolo, carota, cavolfiore, zuccina, cetriolo, indivia, finocchio, lattuga, cipolla, peperone, pomodoro) e 1 di patate. I campioni sono stati triturati e omogeneizzati, essiccati a 65°C, infine macinati fino a ottenere una polvere fine.

I parametri ST e SV sono stati determinati con un analizzatore termogravimetrico LECO TGA 701, secondo il metodo ASTM D5142. La stessa apparecchiatura è stata impiegata per la determinazione dei medesimi parametri nel digestato.

Il Potere Calorifico Superiore (PCS) per substrato e digestato è stato misurato secondo il metodo UNI EN 14918:2009, impiegando un calorimetro isoperibolico LECO AC500. Il contenuto di C, H, N, S è stato determinato secondo il metodo ASTM D5373, impiegando il LECO TRUSPEC CHN, unitamente al modulo S.

I macroelementi, i microelementi e gli elementi in tracce sono stati determinati, mineralizzando i campioni con una soluzione costituita da 3 ml di acqua regia e 1 ml di perossido di idrogeno al 30%, impiegando un digestore a microonde CEM MarsX e poi

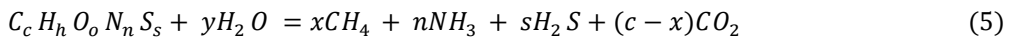
e eseguendo la determinazione mediante uno spettrofotometro in emissione atomica ICP-OES Varian Vista-MPX con vista assiale del plasma.

Il potere calorifico inferiore (PCI) è stato calcolato a partire dal potere calorifico superiore (PCS), applicando la seguente formula:

$$q_{p,net,d} = q_{v,gr,d} - 212,2 \cdot w(H)_d - 0,8 \cdot [w(O)_d + w(N)_d] \quad (4)$$

nella quale $q_{p,net,d}$ è il potere calorifico netto a pressione costante (kJ/kg), $q_{v,gr,d}$ è il potere calorifico lordo a volume costante (kJ/kg), $w(H)_d$, $w(O)_d$, $w(N)_d$ la percentuale in massa di Idrogeno, Ossigeno e Azoto rispettivamente.

La composizione prevista per il biogas prodotto mediante la digestione anaerobica è stata calcolata mediante la seguente espressione della formazione del metano (Deublein e Steinhauser, 2008):



nella quale

$$y = \frac{1}{8} \cdot (4c + h - 20 - 3n - 2s) \quad (6)$$

$$y = \frac{1}{4} \cdot (4c - h - 20 - 3n - 3s). \quad (7)$$

Tutte le misure sono state eseguite con tre repliche. Le formulazioni per l'alimentazione del reattore sono state preparate miscelando frutta e vegetali in modo da riprodurre la composizione media dei residui prodotti dal mercato all'ingrosso.

Ciascuna miscela è stata omogeneizzata mediante il tritatore e impiegata immediatamente, oppure immagazzinata in cella frigorifera alla temperatura di 4°C per pochi giorni, o congelata a -18°C per un uso differito nel tempo.

Per tutte le miscele è stata eseguita la caratterizzazione chimico-fisica in termini di: ST, SV, contenuto in ceneri, PCS e contenuto in C, H, N, S.

La composizione del biogas (concentrazione di metano, diossido di carbonio, ossigeno, idrogeno solforato e ammoniaca) è stata determinata mediante un analizzatore Geotech GA2000, mentre il PCS del biogas è stato calcolato in base al contenuto in metano e al suo potere calorifico superiore di 39,62 MJ Nm⁻³.

4.2.4 Procedure operative e monitoraggio del processo

L'esperimento è iniziato immettendo nel reattore 950 kg di digestato derivante da un impianto di digestione anaerobica di liquami suinicoli, necessario come inoculo per l'avvio del processo. La composizione chimica dell'inoculo è mostrata nella Tab.2.

La temperatura del reattore è stata portata al valore di 35±0,5°C e tenuta a questo livello per tutta la durata dell'esperimento. Per consentire l'adattamento della popolazione microbica al substrato alimentato, il volume iniziale dell'inoculo è stato gradualmente sostituito con i FVR. In queste condizioni, la fase di avvio è durata 44 giorni necessari alla completa sostituzione dell'inoculo con gli FVR. Complessivamente il monitoraggio del processo è stato protratto per 174 giorni, compreso il periodo di avvio. Dopo l'avvio sono stati condotti tre cicli di sostituzione completa della biomassa all'interno del reattore che sono identificati come tre differenti fasi.

Inoculo	ST (% t.q.)	SV (% ST)	C % ST	H % ST	N % ST	S % ST
Digestato da liquame suinicolo	9,15	76,7	47,13	5,37	2,54	0,45

Tabella 2: Composizione chimica del digestato impiegato come inoculo.

La fase di avvio è stata condotta nel periodo invernale (temperatura media dell'ambiente 15°C), la fase 1 durante la primavera (temperatura media dell'ambiente 19°C), le fasi 2 e 3 durante l'estate (temperatura media dell'ambiente 26°C).

L'obiettivo principale di questo esperimento è stato quello di identificare i parametri ottimali del processo di digestione anaerobica dei FVR per ottenere la conversione in metano più elevata possibile. Il controllo del processo è stato condotto tenendo sotto controllo continuo la massa all'interno del reattore e i parametri operativi più significativi, ovvero ST e SV per il substrato e il digestato, tasso di carico organico (OLR), rapporto FOS/TAC, pH, composizione del biogas, tasso di produzione del gas (GPR), produzione specifica di biogas (SGP), tempo di residenza idraulico (HRT).

4.2.5 Bilanci di massa e di energia

Per un determinato periodo operativo il bilancio di massa è rappresentato dall'equazione seguente:

$$m_F = m_B + m_D \quad (8)$$

nella quale m_F , m_B e m_D sono rispettivamente la massa del substrato alimentato, la massa del biogas prodotto e la massa del digestato scaricato. Il bilancio di massa non comprende la massa dell'acqua rimossa dal biogas mediante la trappola di condensa. Infatti, la quantità di acqua condensata può essere trascurata in quanto il contenuto nel biogas è risultato inferiore allo 0,1 % di m_B .

Il bilancio di energia del sistema può essere valutato mediante la seguente equazione:

$$m_F \cdot (PCS + h)_F + Q_H + Q_R + E_{AUX} = m_B \cdot (PCS + h)_B + m_D \cdot (PCS + h)_D + Q_L \quad (9)$$

nella quale h è l'entalpia specifica dei flussi in ingresso e in uscita, Q_H è l'energia termica fornita dai riscaldatori elettrici, Q_R è il calore prodotto dalle reazioni biochimiche esotermiche, Q_L sono le perdite termiche (dovute alla differenza di temperatura tra le pareti del digestore e l'aria esterna) e E_{AUX} è il consumo complessivo di energia elettrica per gli ausiliari di impianto (tritatore, agitatori, pompe e altre apparecchiature). Per la valutazione dei diversi parametri presenti nell'equazione (9), sono state fatte diverse assunzioni. In particolare, il calore di reazione Q_R è stato trascurato perché fornisce solamente un contributo minore al bilancio energetico complessivo. Nel caso della digestione anaerobica in regime mesofilo la temperatura dei flussi in ingresso e in uscita è molto vicina alla temperatura di riferimento (25°C) cosicché il contributo entalpico può essere trascurato. L'energia termica Q_H , necessaria a mantenere la temperatura del reattore costante, comprende due differenti contributi: l'energia Q_F richiesta per il riscaldamento del substrato alimentato dalla temperatura dell'ambiente a quella del digestore e l'energia richiesta per compensare le perdite termiche Q_L .

Complessivamente Q_H è stato valutato mediante la seguente equazione:

$$Q_H = Q_F + Q_L = m_F \cdot Cp \cdot (T_R - T_A) + U \cdot S \cdot (T_R - T_A) \quad (10)$$

nella quale T_R è la temperatura del reattore (35°C), T_A è la temperatura dell'aria, Cp è il calore specifico del substrato assunto uguale a 4,187 J/kgK), U è il coefficiente globale di scambio termico e S è la superficie esterna del reattore. Poiché la velocità del substrato all'interno del reattore è molto bassa, il coefficiente globale di scambio termico è stato calcolato trascurando il trasferimento di calore convettivo tra il substrato e le pareti interne del reattore. Pertanto sono stati considerati solamente il trasferimento di calore per conduzione attraverso le pareti del reattore e lo strato di isolante e il trasferimento di calore per convezione naturale dalla superficie esterna del reattore all'aria nell'ambiente (Incropera *et al.*, 2002).

Per calcolare i consumi totali di energia E_{AUX} , sono stati valutati i consumi di energia elettrica di ciascuna apparecchiatura mediante la seguente equazione generale:

$$E_E = \frac{P_M}{\eta_M} \cdot K \cdot t \quad (11)$$

nella quale P_M e η_M rappresentano l'energia meccanica e l'efficienza del motore elettrico, K è il fattore di utilizzazione e t è il tempo di esercizio. Il contenuto di energia della biomassa alimentata e del digestato è stato valutato a partire dai dati registrati dal PLC (flussi in ingresso e uscita) e alle analisi di laboratorio (PCS dell'alimentazione, del digestato e del biogas). Nello stesso modo Q_H e E_{AUX} sono stati valutati in base alle specifiche tecniche riportate nella Tab.1 ed ai dati registrati dal PLC (temperatura del reattore, tempo di esercizio etc.).

L'equazione (9) esprime un semplice bilancio tra il contenuto energetico della biomassa in ingresso al reattore e la somma del contenuto energetico del biogas e del digestato. In termini di bilancio cumulativo l'equazione (9) può essere espressa come di seguito:

$$E_F = E_B + E_D + E_R \quad (12)$$

nella quale E_F, E_B, E_D, E_R rappresentano rispettivamente il contenuto energetico della biomassa in alimentazione, del biogas, del digestato e della biomassa contenuta nel reattore.

Poiché il biogas è impiegato per la produzione di energia, uno dei parametri più importanti per valutare le prestazioni di un processo di digestione anaerobica è dato dall'efficienza di conversione energetica, che fornisce la frazione dell'energia della biomassa trasformata in energia sotto forma di biogas.

In base all'equazione (12) l'efficienza di conversione energetica di un processo di digestione anaerobica può essere espressa come il rapporto tra l'energia cumulativa del biogas e l'energia cumulativa della biomassa in alimentazione al reattore e cioè:

$$\eta_{AD} = \frac{E_B}{E_F} \quad (13)$$

Comunque una quota rilevante dell'energia in ingresso al reattore in un dato giorno E_F , appartiene anche alla biomassa all'interno del reattore E_R .

Di conseguenza la biomassa contenuta all'interno del reattore sarà convertita in biogas solo in seguito e pertanto è stata calcolata un'efficienza di conversione netta, data dalla seguente espressione:

$$\eta_{AD,N} = \frac{E_B}{E_F - E_R} \quad (14)$$

Le due efficienze di conversione energetica sono state calcolate per l'impianto pilota di digestione anaerobica in tutto il periodo sperimentale.

4.3 Risultati e discussione

4.3.1 Caratterizzazione chimico-fisica dei FVR

Il contenuto in ST e la percentuale in SV indicano la frazione della materia organica che può essere convertita in biogas, mentre il rapporto C/N rappresenta la disponibilità di sostanza organica in rapporto al principale nutriente che è rappresentato dall'Azoto.

I diagrammi ternari riportati nella Fig.7a-b consentono la localizzazione dei campioni di frutta e vegetali nel piano secondo ST, SV e C/N

Come si può notare i campioni di frutta che presentano elevati valori di ST e SV e C/N sono spostati nel piano del diagramma verso il vertice C/N, mentre i campioni di vegetali sono distribuiti maggiormente verso il centro.

I campioni di frutta, infatti, hanno un valore di ST medio pari al 14,0%, con un minimo del 7,5% e un massimo del 23,2%. I campioni di vegetali presentano un valore medio del 6,7%, con un minimo del 3,3% e un massimo dell'11,45%. Il contenuto in SV per la frutta è in media pari al 10,3%, con un valore minimo del 5,0% e uno massimo del 12%, mentre per i vegetali il contenuto medio è pari al 4,7%, con un valore minimo del 2,0% e uno massimo del 9,0%. Il rapporto C/N medio è pari a 40 per la frutta con un valore minimo di 19 ed uno massimo di 53. Per i vegetali si ha un valore medio di 13,4, con un minimo di 10 ed uno massimo di 21. Le patate rappresentano una categoria separata con un valore di ST medio del 21,8%, di SV medio del 17,4 % e un rapporto C/N pari a 23. I macro elementi, i microelementi e gli elementi in tracce sono fondamentali per il metabolismo batterico.

La visualizzazione della distribuzione di variabilità dei parametri C/N, SV e il contenuto in Zolfo per vegetali e frutta sono mostrati nella Fig.8a-c. La concentrazione dello Zolfo è una caratteristica rilevante per le materie prime alimentate a un impianto di digestione anaerobica e in genere, nella frutta è inferiore ai vegetali. In particolare i broccoli, il cavolfiore, il cavolo e la cipolla hanno il contenuto in Zolfo maggiore su base secca (0,7-1,0%). La concentrazione di Zolfo nelle patate è situata approssimativamente tra la frutta e i vegetali.

Le determinazioni analitiche non hanno mostrato sostanziali differenze tra Carbonio fisso, Idrogeno e Ossigeno su base secca nella frutta (22,0%, 6,5% e 44,0% rispettivamente), nei vegetali (20,0%, 6,5%, 40% rispettivamente) e nelle patate (15,0 %, 6,5%, 43% rispettivamente). Il contenuto in ceneri su base secca è differente per la frutta (2%-9%), per i vegetali (0,7%-16,0%) e per le patate (5%).

Il contenuto energetico mostra valori di PCI su base umida compresi nell'intervallo tra 0,7 MJ kg_{ss}⁻¹ e 1,9 MJ kg_{ss}⁻¹ per i vegetali, tra 1,2 MJ kg_{ss}⁻¹ e 3,9 MJ kg_{ss}⁻¹ per la frutta e di 3,5 MJ kg_{ss}⁻¹ per le patate. Questi valori consentono di conoscere esattamente la quantità di energia immessa in un digestore anaerobico e di conseguenza l'energia che può essere ottenuta sotto forma di biogas e che rimane nel digestato. Le concentrazioni dei microelementi, dei macroelementi e degli elementi in tracce sono riportate nella

Tabella 3. Non sono state rilevate differenze rilevanti nel contenuto di nutrienti tra frutta e vegetali. Il Calcio, il Potassio, il Magnesio e il Sodio sono gli elementi più abbondanti.

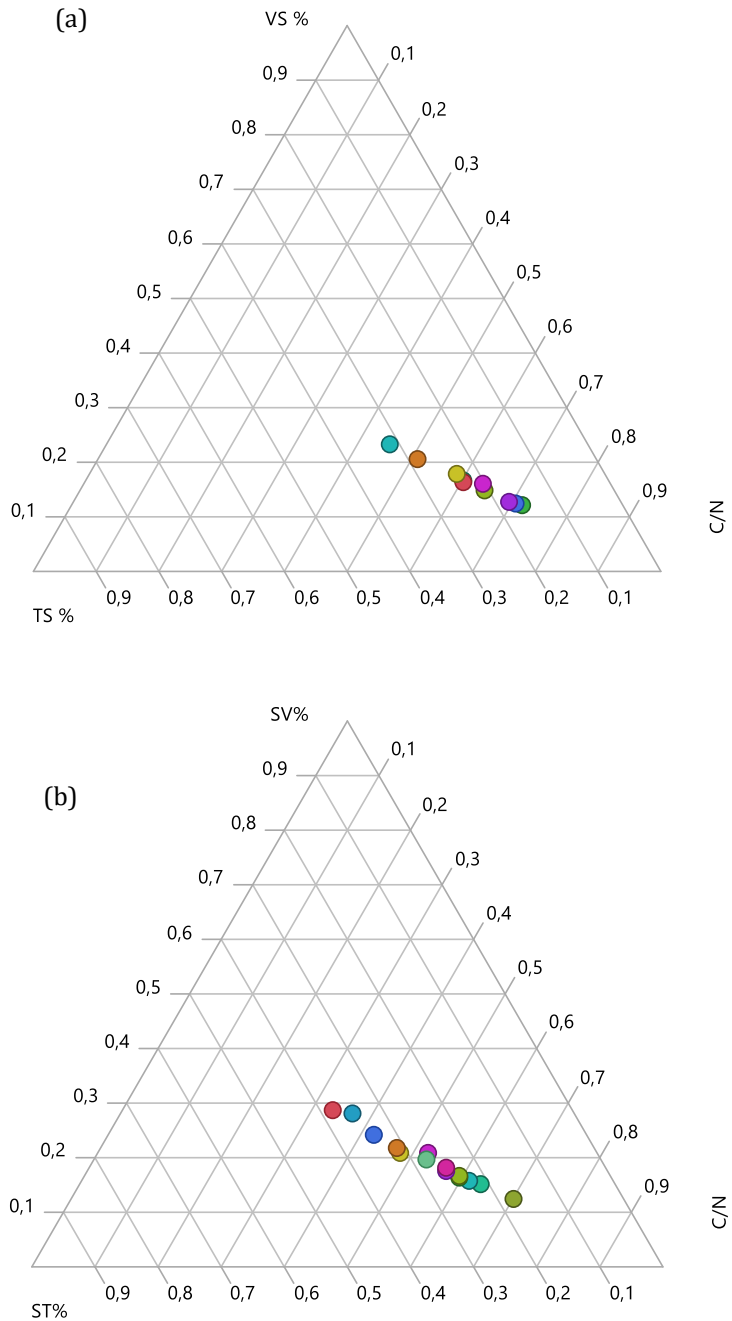


Figura 7: Distribuzione dei campioni nei diagrammi ternari. Frutta (a), Vegetali (b).

	Al	As*	B	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg*	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	Pb	Se*	Sn	Sr	V	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Albicocche	0,95	<0,007	0,10	0,014	3,67	0,002	0,029	0,648	0,04	2,37	<0,007	29,81	<0,001	1,31	0,31	0,022	0,08	2,88	0,04	<0,01	<0,03	0,01	0,007	0,08
Melanzane	3,40	<0,004	0,03	0,006	2,68	<0,001	<0,004	0,001	0,42	0,07	<0,004	20,75	<0,001	1,80	0,02	0,001	0,30	0,22	0,13	<0,01	<0,02	0,02	<0,001	0,49
Banane	0,68	<0,012	0,06	0,005	1,79	<0,001	0,015	0,033	0,44	0,26	<0,012	51,70	<0,001	4,35	0,08	0,012	0,08	2,58	0,08	<0,02	<0,06	0,03	<0,002	0,46
Broccoli	0,07	<0,006	0,06	0,015	14,03	<0,001	<0,006	0,002	0,31	0,11	<0,006	27,46	<0,001	4,36	0,02	0,008	3,28	0,27	0,06	<0,01	<0,03	0,08	<0,001	0,30
Cavoli	0,09	<0,004	0,04	0,006	7,96	<0,001	0,004	0,001	0,18	0,08	<0,004	21,15	<0,001	3,02	0,02	0,002	3,43	0,51	0,04	<0,01	<0,02	0,04	<0,001	0,22
Carote	1,01	<0,004	0,03	0,021	6,27	<0,001	<0,004	0,004	0,15	0,12	<0,004	14,27	<0,001	2,24	0,03	0,003	8,75	0,16	0,02	<0,01	<0,02	0,03	<0,001	0,10
Cavolfiori	0,12	<0,004	0,03	0,006	4,22	<0,001	0,005	0,000	0,37	0,08	<0,004	23,04	<0,001	2,87	0,02	0,003	2,89	0,72	0,03	<0,01	<0,02	0,02	<0,001	0,29
Clementini	1,07	<0,008	0,13	0,014	16,53	<0,001	<0,008	0,005	0,98	0,14	<0,008	16,78	<0,001	2,17	0,02	0,003	0,22	1,24	0,19	<0,02	<0,04	0,15	<0,002	0,98
Zucchine	0,14	<0,003	0,02	0,002	2,38	<0,001	0,003	0,002	1,68	0,08	<0,003	18,51	<0,001	1,96	0,01	0,002	0,18	0,66	0,07	<0,01	<0,01	0,01	<0,001	1,16
Cetrioli	2,28	<0,002	0,02	0,004	3,78	<0,001	<0,002	0,001	0,05	0,05	<0,002	12,41	<0,001	1,85	0,01	0,002	1,19	0,07	0,01	<0,003	<0,01	0,02	<0,001	0,06
Indivia	1,02	<0,002	0,01	0,000	3,68	<0,001	0,002	0,025	0,08	0,14	<0,002	12,49	<0,001	1,30	0,03	0,001	0,19	0,31	0,02	<0,004	<0,01	0,00	<0,001	0,08
Finocchi	1,74	<0,003	0,02	0,007	5,47	<0,001	0,018	0,080	0,35	0,52	<0,003	21,62	<0,001	1,38	0,09	0,005	5,59	0,37	0,12	<0,01	<0,02	0,03	0,001	0,54
Limoni	3,16	<0,006	0,04	0,021	13,56	<0,001	<0,006	0,005	0,69	0,10	<0,006	19,71	<0,001	1,64	0,03	<0,001	0,42	0,41	0,31	<0,01	<0,03	0,07	<0,001	1,14
Lattuga	3,05	<0,002	0,01	0,005	6,93	<0,001	0,026	0,038	0,31	0,42	<0,002	30,11	<0,001	1,67	0,08	0,001	1,26	0,28	0,17	<0,005	<0,01	0,02	<0,001	1,13
Meloni	3,43	<0,007	0,03	0,001	3,70	<0,001	0,010	0,001	0,80	0,19	<0,007	37,60	<0,001	3,60	0,02	<0,001	1,15	0,59	0,11	<0,01	<0,03	0,02	<0,001	0,93
Cipolle	0,78	<0,004	0,07	0,021	9,26	<0,001	0,004	0,001	0,51	0,11	<0,004	12,21	<0,001	1,73	0,02	0,002	0,97	0,54	0,13	<0,01	<0,02	0,05	<0,001	0,80
Arance	0,39	<0,006	0,05	0,016	17,61	<0,001	0,012	0,029	0,05	0,25	<0,006	11,85	<0,001	1,63	0,03	0,007	0,11	2,43	0,02	<0,01	<0,03	0,23	<0,001	0,05
Pesche	0,68	<0,008	0,04	<0,002	1,28	0,001	0,020	0,001	1,31	0,24	<0,008	19,06	<0,001	1,28	0,01	<0,002	0,11	3,25	1,50	<0,02	<0,04	0,02	<0,002	8,40
Pere	0,12	<0,008	0,06	0,001	0,94	<0,001	0,007	0,006	0,49	0,08	<0,008	7,86	<0,001	0,68	0,01	<0,002	0,29	0,98	0,31	<0,02	<0,04	0,01	<0,002	1,25
Peperoni	0,34	<0,004	0,01	0,001	0,61	<0,001	<0,004	<0,001	0,83	0,09	<0,004	15,84	<0,001	1,10	0,01	<0,001	0,18	0,77	0,09	<0,01	<0,02	0,00	<0,001	0,76
Ananas	4,86	<0,005	0,02	0,009	3,08	<0,001	0,005	0,001	1,99	0,07	<0,005	12,90	<0,001	1,33	0,16	<0,001	0,08	0,51	0,05	<0,01	<0,03	0,02	<0,001	1,53
Patate	5,48	<0,011	0,07	0,017	4,86	<0,001	0,012	<0,001	0,41	0,19	<0,011	45,30	<0,001	3,33	0,03	<0,002	0,35	0,24	0,13	<0,02	<0,05	0,01	<0,002	0,70
Pomodori	0,48	<0,002	0,01	0,000	1,23	<0,001	0,003	0,001	0,35	0,07	<0,002	9,97	<0,001	0,64	0,01	0,001	0,21	0,68	0,04	<0,004	<0,01	0,00	<0,001	0,39
Cocomeri	2,08	<0,004	0,03	0,006	1,57	0,001	0,013	0,203	0,004	0,81	<0,004	17,13	<0,001	1,65	0,16	0,007	0,08	2,29	0,01	<0,01	<0,02	0,01	0,002	0,02

Tabella 3: Macro elementi, microelementi e elementi in tracce presenti nei residui di frutta e vegetali.

L'Arsenico, il Cadmio, il Mercurio, il Litio, il Selenio, lo Stagno, e il Vanadio sono presenti in tracce o assenti, mentre metalli pesanti quali il Rame, il Piombo e lo Zinco presentano i valori più elevati in tutti i campioni e talvolta superano la concentrazione minima per essere considerati tracce. Sono stati riscontrati alcuni valori elevati (per esempio Nichel, Piombo e Zinco nelle pesche) che potrebbero essere attribuiti a situazioni isolate di contaminazione. La concentrazione dei nutrienti quali il Potassio, il Sodio, il Magnesio e il Calcio, la presenza di microelementi e di elementi tracce consentono di evitare l'aggiunta di queste sostanze, come spesso è fatto negli impianti di digestione anaerobica industriali, con una conseguente riduzione dei costi. Questa caratteristica, unitamente all'elevato contenuto in sostanza organica fa sì che i FVR possano essere impiegati tal quali direttamente in un processo di digestione anaerobica, con la condizione che siano impiegate per l'alimentazione degli impianti formulazioni bilanciate tra frutta e vegetali. La Tab.4 riporta la composizione principale delle formulazioni impiegate nello studio sperimentale. In particolare mostra come nella fase di avvio, ma anche nelle fasi 1 e 2 le miscele sono state composte principalmente da residui di vegetali (la frazione di frutta era pari a circa un terzo del totale), mentre durante la fase 3 erano costituite da residui di frutta.

	Frazione di frutta (%)	ST (% tq)	SV (%TS)	PCS MJ kg⁻¹ ss
Avvio	33,4	5,4-16,5 (Media: 9,6)	80,8-90,8 (Media: 85,0)	16,1-17,6
Fase 1	33,1	4,4-16,1 (Media: 8,8)	78,8-90,5 (Media: 86,4)	15,3-17,5
Fase 2	28,4	3,4-13,2 (Media: 7,1)	81,3-90,0 (Media: 84,9)	13,7-16,6
Fase 3	60,6	4,3-21,8 (Media: 9,5)	81,7-93,8 (Media: 87,9)	15,0-17,1

Tabella 4: Composizione delle miscele di FVR (intervallo di variazione e valore medio).

La concentrazione prevista per il metano nel biogas si situa tra il 43,0% e il 70,0%, mentre la concentrazione di anidride carbonica tra il 30,0% e il 57,0 %. In particolare le concentrazioni più elevate per il metano (> 60,0%) sono state previste per la frutta piuttosto che per le patate e i vegetali.

Come già riportato in precedenza, il periodo sperimentale può essere suddiviso in quattro fasi, in ciascuna delle quali è stata ottenuta la sostituzione completa della biomassa all'interno del reattore. In funzione della stagionalità dei residui prodotti dal mercato ortofrutticolo, le formulazioni impiegate per l'alimentazione del digestore pilota hanno mostrato una composizione differente in tutto il periodo sperimentale.

E' importante sottolineare che l'impiego di substrati con un alto contenuto di residui di frutta influenza notevolmente il processo di digestione anaerobica.

Infatti, i residui di frutta contengono un alto quantitativo di zuccheri semplici che incrementano la concentrazione di CO₂ nel biogas a discapito del contenuto di Metano.

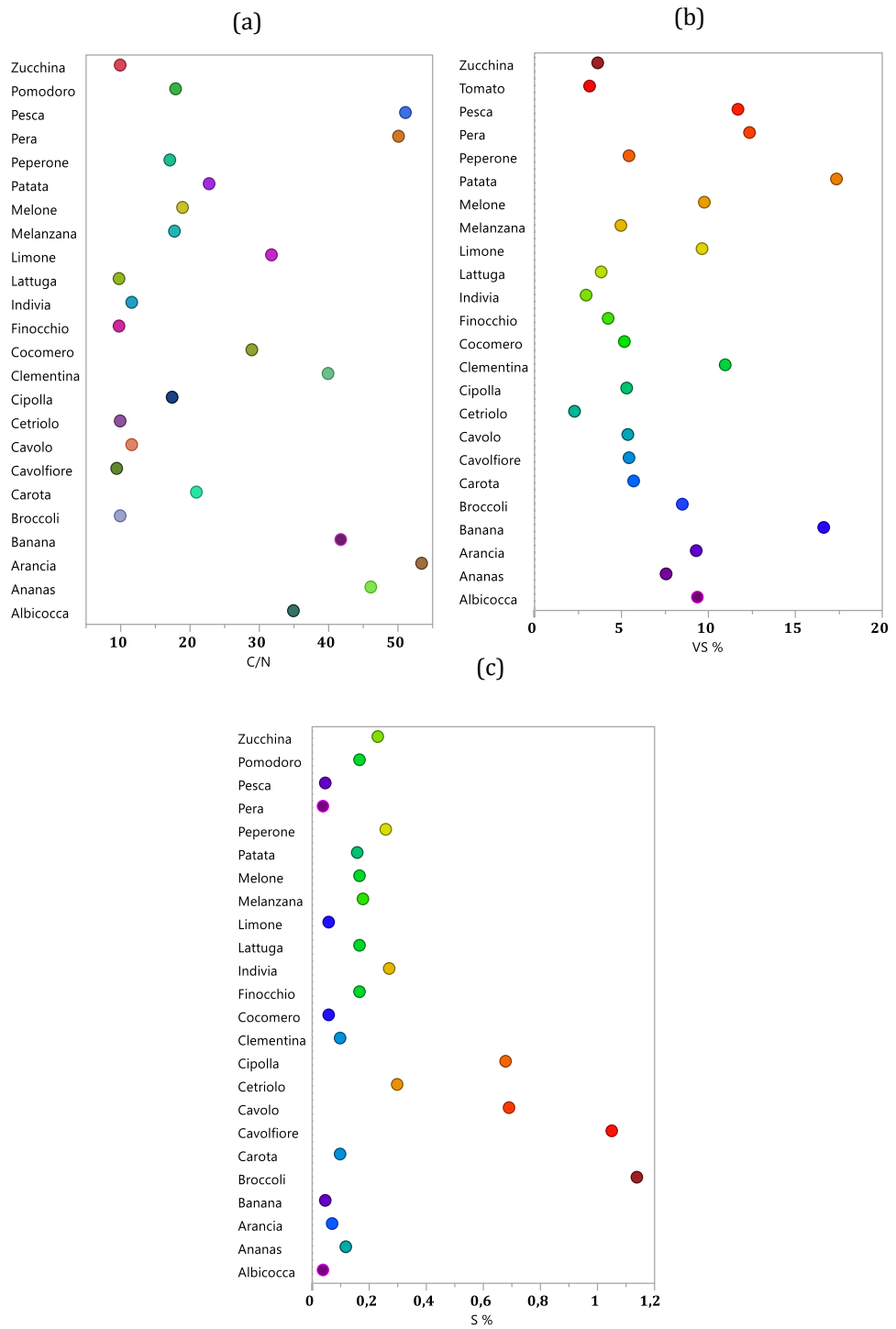


Figura 8: Rapporto C/N (a). Contenuto SV % (b). Contenuto S % (c).

4.3.2 Risultati sperimentali su scala pilota

I risultati delle prove sperimentali sono riassunti graficamente nelle Fig. 9-10 in termini di portata di alimentazione giornaliera e contenuto di solidi volatili (Fig.9a), carico organico giornaliero (Fig.9b), rapporto FOS/TAC e pH (Fig.9c), tasso di produzione del biogas e contenuto in metano (Fig.10).

Come mostrato nella Fig.9a la portata di alimentazione è stata aumentata in modo costante durante l'intera fase di avvio per ottenere la completa sostituzione dell'inoculo iniziale. Nelle tre fasi successive si notano fluttuazioni nella portata di alimentazione dovute alle correzioni richieste per tenere sotto controllo il carico organico in funzione delle differenti caratteristiche delle miscele alimentate.

E' noto, infatti, che il carico organico è uno dei parametri che influenzano maggiormente il comportamento dei reattori anaerobici, ma è anche la variabile più importante per il dimensionamento degli impianti su scala industriale.

Per queste ragioni lo studio sperimentale è stato mirato a identificare il valore ottimale del carico organico per ottenere le migliori prestazioni del processo in termini di produzione di biogas e contenuto di metano. Inoltre per raccogliere altre informazioni sull'evoluzione del processo, sono stati determinati con continuità all'interno del reattore il pH e il rapporto FOS/TAC. Il rapporto FOS/TAC è il rapporto tra gli acidi organici volatili (espressi in mg l^{-1} equivalenti di acido acetico) e la capacità tampone alcalina (espressa in mg l^{-1} di CaCO_3). Esso è comunemente impiegato nel monitoraggio dei processi di digestione anaerobica (Hinken *et al.*, 2012, Brambilla *et al.*, 2012). Come mostrato nella Fig.9b, l'OLR è stato incrementato fino a $3,0 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ d}^{-1} \text{ m}^{-3}$ con un corrispondente aumento del rapporto FOS/TAC. Diversi studi presenti nella letteratura riportano che l'intervallo ottimale per il FOS/TAC deve essere situato tra 0,3 e 0,4. Valori superiori a 0,4 potrebbero tradursi in condizioni operative non appropriate per la crescita delle popolazioni microbiche con la conseguente diminuzione della produzione di biogas (Lossie *et al.*, 2008).

Per questa ragione al termine della fase di avvio, raggiunto un valore del rapporto FOS/TAC superiore a 0,4, l'OLR è stato ridotto a un valore di $1,5\text{-}2,0 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ d}^{-1} \text{ m}^{-3}$

La Fig.9c mostra che dopo un periodo di esercizio nel quale il rapporto FOS/TAC aumenta fino a 0,65, la riduzione dell'OLR porta ad una corrispondente riduzione del rapporto FOS/TAC.

Durante la fase di avvio l'andamento del rapporto FOS/TAC è stato direttamente collegato all'incremento graduale nel carico organico, mentre durante le altre tre fasi è stato influenzato fondamentalmente dalla differente composizione chimica dei substrati alimentati e, in particolare, dal contenuto in zuccheri semplici dei residui di frutta. Come mostrato dalla Fig.9c, il rapporto FOS/TAC ha infatti raggiunto spesso valori superiori a 0,4. Tuttavia in questo studio sperimentale è stato riscontrato che impiegando una miscela equilibrata di residui di frutta e vegetali, il processo di digestione anaerobica continua a fornire buone prestazioni (in termini di resa in biogas e contenuto di metano) anche per valori di FOS/TAC fino a 0,5.

I valori molto elevati evidenziati nella Fig.9c ($\text{FOS/TAC} > 1$) sono stati il risultato di specifiche sollecitazioni applicate, alimentando il reattore con significative quantità di substrati con un elevato contenuto in zuccheri semplici.

Il ruolo giocato da questi ultimi può essere spiegato molto bene con i risultati ottenuti nella seconda metà della Fase 2 e della Fase 3. Infatti, intorno al centesimo giorno, la prevalenza nelle miscele alimentate al reattore di un'elevata quantità di meloni (che contengono un'alta percentuale di zuccheri semplici) si è tradotta in una notevole instabilità del processo. Inoltre è stato abbastanza difficoltoso stabilizzare il processo nella successiva Fase 3 perché i FVR disponibili erano ancora costituiti da un'alta

quantità di residui di frutta. D'altra parte la Fig. 9c mostra che il pH non è mai sceso al disotto di 7,0 e questo dimostra la buona capacità tampone dell'intero impianto pilota, probabilmente dovuta alla presenza di una tramoggia di carico di grande capacità. Infatti, nel corso di tutto l'esperimento il volume di riempimento è stato mantenuto tra 0,15 e 0,25 m³ che corrisponde ad un tempo di residenza compreso tra 4 e 8 giorni, con una portata di alimentazione di 30-40 kg d⁻¹. Pertanto la tramoggia di carico funge da reattore di primo stadio per le reazioni di idrolisi e acidogenesi, mentre le reazioni di acetogenesi e metanogenesi hanno luogo all'interno del reattore. Le determinazioni eseguite su diversi campioni di biomassa prelevati dalla tramoggia di carico hanno mostrato valori di pH compresi tra 4,0 e 5,0 confermando questa ipotesi. Inoltre i valori di pH rilevati sono perfettamente in accordo con altri risultati presenti nella letteratura (Gosh *et al.*, 1975). La Fig.10 mostra come, dopo il periodo di avvio, il contenuto in CH₄ nel biogas prodotto è stato nell'intervallo 50-60%, mentre la variazione nella composizione delle miscele alimentate all'impianto abbia portato a tenori di CH₄ inferiori al 45% o superiori al 75%, solamente per brevi periodi di tempo.

La Fig.10 evidenzia come in buone condizioni di processo (rapporto FOS/TAC intorno a 0,4, OLR tra 2,0 e 2,5 kg_{sv} d⁻¹ m⁻³), il GPR è stato compreso tra 1,0 e 1,5 Nm³_{biogas} m⁻³_{reattore} d⁻¹, mentre in condizioni non ottimali è stato inferiore a 1,0 Nm³_{biogas} m⁻³_{reattore} d⁻¹.

In realtà nel corso dell'esperimento l'OLR è stato incrementato fino a 5,0 kg_{sv} d⁻¹ m⁻³, ma solamente se mantenuto nell'intervallo 2,5-3,0 kg_{sv} d⁻¹ m⁻³ il processo è stato stabile e in buone condizioni di efficienza in termini di resa in biogas e contenuto in CH₄.

La Tab.5 sintetizza i valori medi della produzione specifica di biogas (ovvero il volume di biogas per unità di solidi volatili alimentati all'impianto) e la composizione del biogas nel corso delle quattro fasi sperimentali.

Complessivamente lo studio sperimentale ha permesso di evidenziare che la portata di alimentazione ottimale per l'impianto pilota è stata di 35 kg d⁻¹ che ha determinato un tempo di ritenzione idraulica (HRT) di 27 giorni.

Valori superiori della portata di alimentazione determinano l'abbassamento del pH, l'incremento del rapporto FOS/TAC, una bassa produzione di biogas e un basso contenuto in metano.

Il carico organico ottimale è stato compreso tra 2,5 e 3 kg_{sv} d⁻¹ m⁻³ e la produzione specifica media di biogas è stata di 0,78 Nm³ kg⁻¹_{sv}, con una produzione specifica in metano di 0,43 Nm³ kg_{sv}⁻¹. È molto importante notare che questi valori sono abbastanza elevati se confrontati con altri risultati ottenuti in condizioni mesofile e presenti nella letteratura (Azeem *et al.*, 2001, Bohn *et al.*, 2007).

Com'è ben noto, l'impiego del biogas in motori a combustione interna è una tecnologia consolidata. Comunque l'utilizzo di biogas con elevati tenori in H₂S conduce all'acidificazione dell'olio lubrificante e ne riduce la vita utile. Inoltre l'H₂S e il condensato possono causare la corrosione delle tubazioni di trasporto del gas.

Per queste ragioni gli impianti di digestione anaerobica sono dotati di norma di una sezione a monte dei co-generatori dedicata al trattamento di pulizia del biogas (Rasi *et al.*, 2011).

Tuttavia, come mostrato nella Tab.5, il contenuto in H₂S è inferiore al limite di 1000 ppm suggerito per i motori a combustione interna (IEA Bioenergy, TASK 37) e pertanto nel caso dei FVR il trattamento di desolfurazione del biogas potrebbe non essere strettamente necessario.

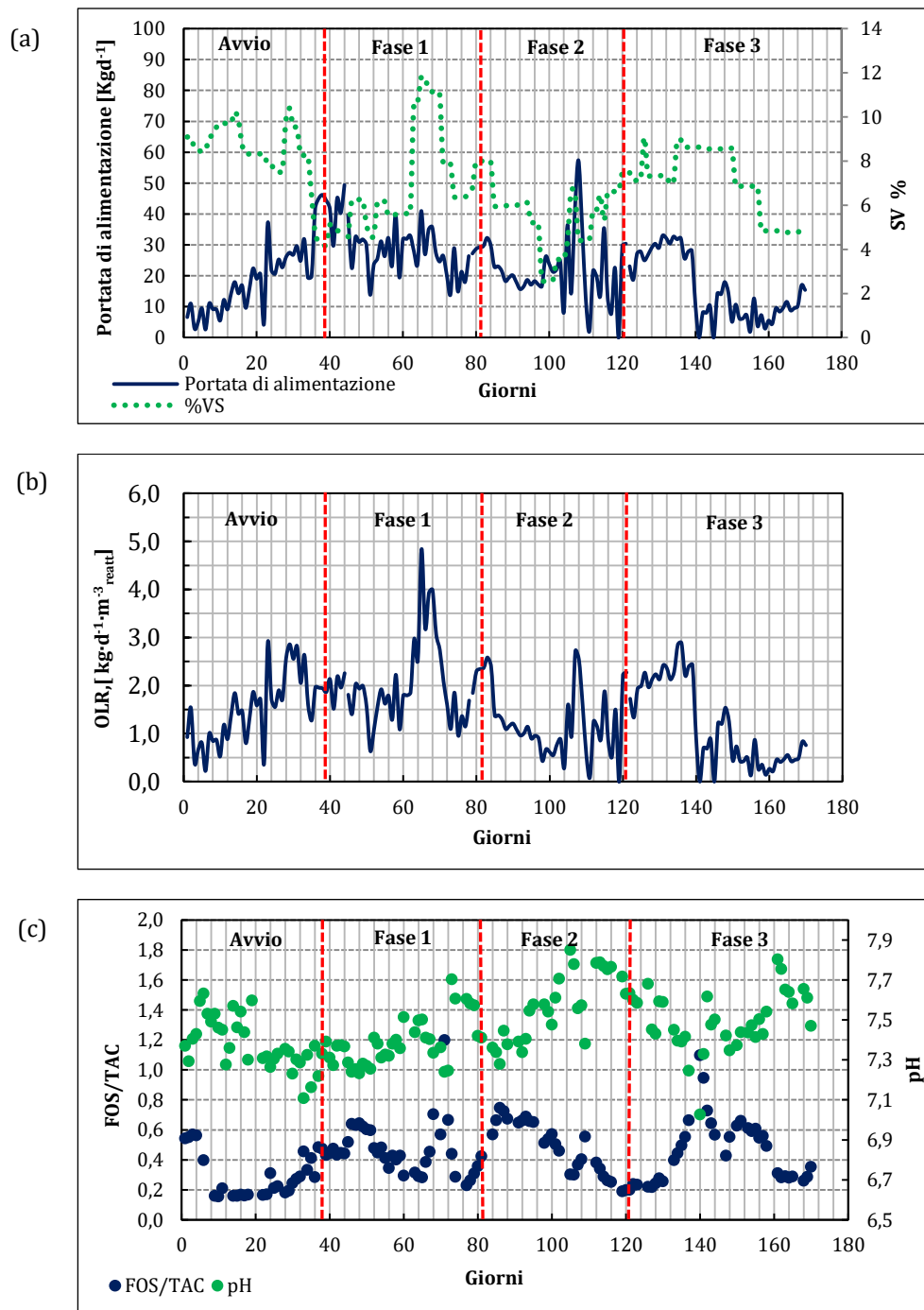


Figura 9: Principali risultati sperimentali su scala pilota. a) Portata di alimentazione e Contenuto in SV % nelle miscele alimentate nelle diverse fasi sperimentali. b) Andamento del carico organico giornaliero. c) Andamento del rapporto FOS/TAC e del pH.

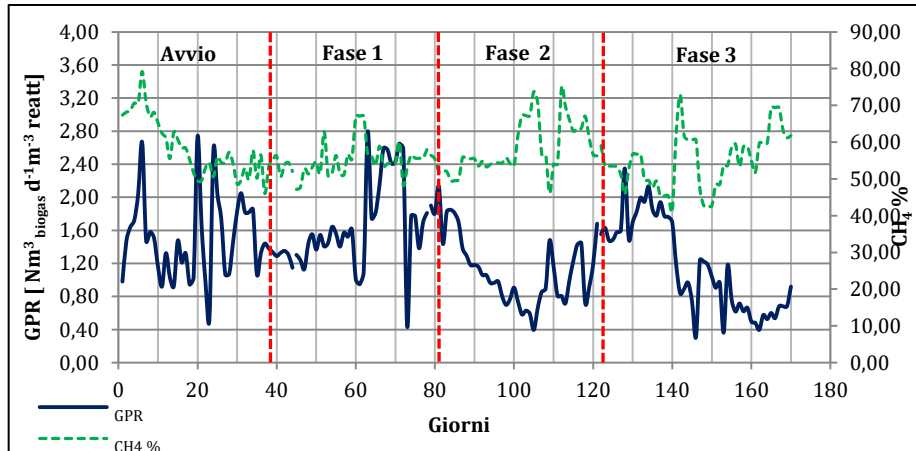


Figura 10: Principali risultati sperimentali su scala pilota. Tasso di produzione del biogas e contenuto in $\text{CH}_4\%$.

Periodo	CH_4 vol %	CO_2 vol %	O_2 vol %	NH_3 ppm	H_2S ppm	H_2O ppm
Avvio	58,2	41,6	0,2	170	444	0,3
Fase 1	54,4	45,4	0,2	99	395	0,1
Fase 2	58,2	41,5	0,3	11	262	0,1
Fase 3	55,0	44,8	0,2	0	43	0,1

Tabella 5: Valori medi della produzione specifica e della composizione media del biogas.

4.3.3 Bilanci di massa e di energia

Nel corso dell'esperimento l'impianto pilota di digestione anaerobica ha trattato 3.550 kg di FVR, con una produzione complessiva di biogas di 246 kg (216 m^3). In realtà è stata impiegata una quantità di materie prime pari a 4.500 kg, ma il digestato da liquami suinicoli usato non può essere incluso nel bilancio in quanto aveva solamente la funzione di inoculo.

La massa di digestato è stata pari a 3.250 kg ed era composta essenzialmente da acqua. Questo perché il biogas si origina dalla fazione dei solidi totali (in particolare dai solidi volatili) del substrato. L'analisi di diversi campioni ha mostrato una quantità di ST media del 2% e un PCS di $13 \text{ MJ kg}_{\text{ss}}^{-1}$

Pertanto durante l'intero periodo di esercizio dell'impianto pilota il 76% circa degli ST contenuti nel substrato è stato convertito in biogas, mentre il tasso di conversione medio degli SV è stato dell'82,5%.

La Fig.11 mostra i quattro principali contributi al bilancio di energia cumulativo dell'impianto pilota di digestione anaerobica. Come si può notare al termine del periodo sperimentale, il contenuto di energia del biogas prodotto è stato circa il 60% dell'energia in ingresso con la biomassa, mentre l'energia residua del digestato è stata

pari al 15%. Il contenuto energetico della biomassa all'interno del reattore è stato pari al 20%.

La Fig.12 mostra le due efficienze di conversione energetica per l'impianto pilota di digestione anaerobica nel corso di tutto il periodo sperimentale. E' stato impiegato un modello bi-esponenziale a quattro parametri (equazione 15) al trattamento dei dati sperimentali per la previsione dei valori di efficienza di conversione energetica nel tempo.

$$\eta_{AD} = a \cdot \text{EXP}(-b \cdot d) + c \cdot \text{EXP}(-e \cdot d) \quad (15)$$

Le equazioni (16) e (17) impiegate per la η_{AD} e la $\eta_{AD,N}$ sono rispettivamente:

$$\eta_{AD} = 50,62 \cdot \text{EXP}(0,001141 \cdot d) - 39,78 \cdot \text{EXP}(-0,0211716) \cdot d \quad (16)$$

$$\eta_{AD,N} = 81,96 \cdot \text{EXP}(-0,000153 \cdot d) + 22,364 \cdot \text{EXP}(-0,0394495) \cdot d \quad (17)$$

Nelle quali d è il tempo in giorni.

La sintesi della stima per entrambe le variabili è riportata nella Tab.6 unitamente alle definizioni dei parametri impiegati. I risultati confermano il buon accordo con i dati sperimentali.

Come mostrato nella figura, η_{AD} aumenta gradualmente nel tempo di esercizio e al termine del periodo sperimentale, il contenuto energetico del biogas ha raggiunto circa il 60% dell'energia in ingresso con il substrato.

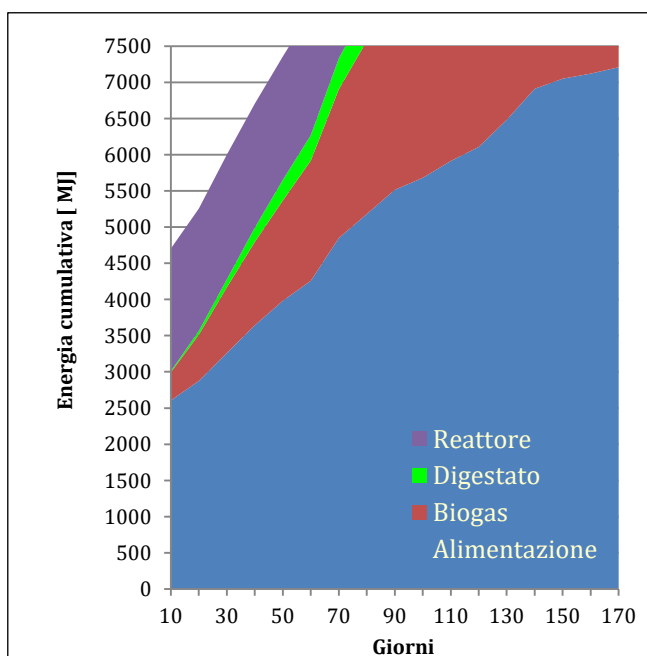


Figura 11: Bilancio di energia cumulativo dell'impianto pilota.

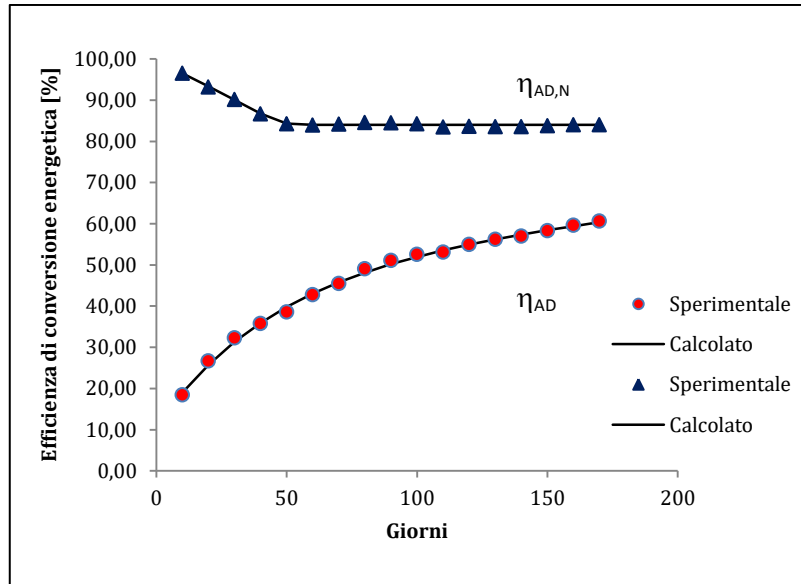


Figura 12: Efficienza di conversione energetica per gli FVR.

	SSE*	MSE*	RMSE*	R-quadro
η_{AD}	5,901828	0,453987	0,673785	0,997611
$\eta_{AD,N}$	6,437474	0,49519	0,49519	0,972525

*SSE = Somma residua dei quadrati degli errori. *MSE = errore quadratico medio.

*RMSE = Deviazione standard dell'errore residuo.

Tabella 6: Sintesi della stima.

Comunque poiché una frazione dell'energia in ingresso con il substrato E_F era ancora contenuta nel reattore, i valori di η_{AD} sottostimano l'efficienza di conversione reale del processo di digestione anaerobica.

Per questa ragione l'efficienza di conversione netta $\eta_{AD,N}$ risulta un parametro più efficace per stimare le prestazioni energetiche e i dati riportati nella Fig.10 dimostrano che il processo di digestione anaerobica è in grado di convertire l'80% circa dell'energia del substrato in energia del biogas. Inoltre, tranne che per il periodo di avvio, $\eta_{AD,N}$ si è mantenuto quasi costante in tutto il periodo di esercizio dell'impianto.

Infine si può osservare come l'efficienza di conversione netta calcolata sia in pieno accordo con la conversione media degli SV riportata in precedenza. Nel corso della fase di avvio e nelle prime due fasi la quantità di substrato inviato alla digestione anaerobica è stata abbastanza simile, mentre nella terza fase è stato possibile trattare solo piccole quantità di FVR a causa dell'instabilità del processo.

Infatti, in quest'ultima fase a causa della composizione del substrato la portata di alimentazione è stata ridotta e il tempo di ritenzione idraulica è notevolmente aumentato rispetto al valore medio di 27 giorni.

La Tab.7 riassume il bilancio di massa e di energia di FVR, biogas e digestato nelle quattro fasi del periodo sperimentale, mentre la Tab.8 riassume i principali parametri delle prestazioni energetiche dell'impianto pilota durante le quattro fasi operative. Si può notare come il consumo di energia elettrica sia abbastanza simile per tutte e quattro le fasi sperimentali, questo perché le condizioni di esercizio e le quantità di FVR alimentate sono state quasi le stesse per tutto lo studio sperimentale.

Periodo sperimentale	FVR		Produzione di biogas		Digestato	
	Kg	MJ	Nm ³	MJ	Kg	MJ
Avvio	943	1829	55	229,5	861	215
Fase 1	941	1458	51	189,9	863	216
Fase 2	952	1189	43	173,5	883	221
Fase 3	715	1018	46	172,5	643	161

Tabella 7: Bilancio cumulativo di massa e energia di FVR, biogas e digestato.

La maggior parte dei consumi elettrici dell'impianto pilota è dovuta al sistema di pompaggio (58% in media) e al tritatore (40%), mentre i due agitatori hanno un impatto leggero sul consumo globale di energia (2%). Facendo riferimento al bilancio termico, la Tab.9 mostra che l'energia termica richiesta dall'impianto pilota è diminuita durante il periodo sperimentale per via dell'aumento della temperatura dell'ambiente esterno.

Peraltro la maggior parte del consumo di calore è da attribuirsi alle perdite dovute all'isolamento del reattore, non del tutto efficiente, mentre il consumo per il riscaldamento del substrato rappresenta solamente una piccola frazione (10-20%) dell'energia termica richiesta complessivamente. La Tab.9 presenta anche una stima approssimativa dell'energia elettrica e termica che potrebbe essere prodotta alimentando il biogas a un co-generatore. In particolare secondo la portata di biogas prodotto, la produzione di energia elettrica è stata stimata considerando un ipotetico co-generatore basato su un motore a combustione interna da 1 kW_e di potenza netta.

Periodo sperimentale	Energia elettrica				Energia termica			
	Consumo		Produzione		Consumo		Produzione	
	kWh	kWh kg ⁻¹	kWh	kWh kg ⁻¹	kWh	kWh kg ⁻¹	kWh	kWh kg ⁻¹
Avvio	47,4	0,050	63,8	0,067	76,5	0,081	207,2	0,220
Fase 1	45,5	0,048	52,8	0,056	47,3	0,050	180,8	0,186
Fase 2	48,3	0,051	48,2	0,049	30,2	0,032	156,7	0,160
Fase 3	37,6	0,053	47,9	0,071	27,4	0,038	155,8	0,232

Tabella 8: Principali prestazioni energetiche dell'impianto di digestione anaerobica pilota.

Ipotizzando un'efficienza elettrica del 20% e un'efficienza termica del 65%.

La produzione potenziale di energia elettrica dell'impianto pilota è stata stimata in 0,06 kWh kg⁻¹. Il confronto di questo valore con quello medio dell'energia elettrica richiesta per il funzionamento degli ausiliari di impianto (circa 0,05 kWh kg⁻¹) conduce ad un bilancio elettrico positivo dell'intero sistema.

Solamente durante la fase 2 il bilancio elettrico risulta leggermente negativo a causa della bassa produzione di biogas dovuta all'impiego di FVR con un elevato contenuto in zuccheri (Fig.8).

La Tab.8, infine, mostra come il bilancio di energia termica sia largamente positivo nel corso dell'intero periodo studiato. Occorre comunque considerare che l'impianto pilota sia stato specificamente progettato solamente a scopo sperimentale e non per la produzione di energia. Per questa ragione i consumi elettrici e termici specifici sono stati più elevati rispetto a quelli di un impianto su scala industriale. Le richieste di energia di un impianto su scala industriale per il trattamento di FVR possono essere ridotte significativamente per gli impianti su scala industriale con la progettazione ottimizzata dei differenti ausiliari di impianto, il migliore isolamento del reattore e la maggiore efficienza di conversione elettrica della sezione di generazione dell'energia.

4.4 Valutazione preliminare delle prestazioni di un impianto su scala industriale

I risultati ottenuti su scala pilota sono stati utilizzati per la valutazione preliminare delle prestazioni di un impianto su scala industriale per il trattamento dei residui di frutta e vegetali prodotti dal Mercato Ortofrutticolo della Sardegna. La Fig.13 mostra un diagramma a blocchi semplificato dell'impianto su scala industriale. L'impianto su scala industriale è basato su un reattore di digestione anaerobica bi-stadio per separare la fase di idrolisi da quella di metanogenesi, come messo in evidenza nella sezione 4.4.2.

L'impianto è dotato di una sezione di stoccaggio suddivisa in due unità separate per frutta e vegetali, in modo da consentire il più possibile la preparazione di miscele bilanciate. Il biogas prodotto alimenta un co-generatore costituito da un motore a combustione interna integrato con una sezione per il recupero del calore.

L'energia termica necessaria al processo di digestione anaerobica è ottenuta ricircolando al reattore una quota dell'acqua calda originatasi nel raffreddamento del co-generatore. Dal co-generatore è anche prelevata una quota dell'energia elettrica, necessaria al funzionamento degli ausiliari di impianto (trituratorie, pompe, agitatori, compressori per il biogas e altre apparecchiature). La Tab.9 riporta le principali assunzioni fatte per la valutazione preliminare delle prestazioni dell'impianto di digestione anaerobica su scala industriale. In accordo con i risultati dello studio sperimentale illustrato in precedenza, l'impianto è stato progettato per trattare una quantità di FVR di 9 t d^{-1} , con un carico organico di $2,5 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ d}^{-1} \text{ m}^{-3}$, un tempo di residenza idraulico di 30 giorni e una produzione specifica metano di $0,43 \text{ Nm}^3 \text{ kg}_{\text{sv}}^{-1}$.

Le assunzioni concernenti le efficienze elettriche e termiche sono basate su valori tipici di unità cogenerative commerciali. Il fabbisogno di energia termica per il processo di digestione anaerobica è stato calcolato come somma del calore richiesto per portare il substrato alla temperatura di processo e per compensare le perdite attraverso le pareti del reattore. Il consumo elettrico specifico di 10 kWh t^{-1} per gli ausiliari di impianto è stato assunto in accordo alle prestazioni dei sistemi commerciali. È interessante notare come questo valore sia pari a un quinto di quello dell'impianto pilota (circa 50 kWh t^{-1}) per via dell'ottimizzazione nella progettazione. I volumi di lavoro complessivi per il primo (45 m^3) e per il secondo reattore (225 m^3) sono stati determinati sulla base della disponibilità giornaliera degli FVR e del tempo di permanenza idraulico necessario alla loro conversione in biogas. Inoltre, per entrambi i reattori, sono stati considerati un rapporto larghezza /altezza di 0,4 e uno spessore di isolamento pari a 0,1 m.

La produzione lorda, elettrica e termica è stata calcolata dalla produzione del biogas, considerando il potere calorifico inferiore del biogas stesso.

La produzione netta di energia elettrica è stata calcolata, sottraendo i consumi degli ausiliari dell'impianto alla produzione lorda. La Tab.10 riporta le prestazioni principali stimate per l'impianto industriale di digestione anaerobica. In accordo con il potere calorifico inferiore del biogas (19,6 MJ Nm⁻³), la stima della produzione giornaliera di metano (290 Nm³ d⁻¹) identifica un co-generatore con una potenza in uscita di 42 kW.

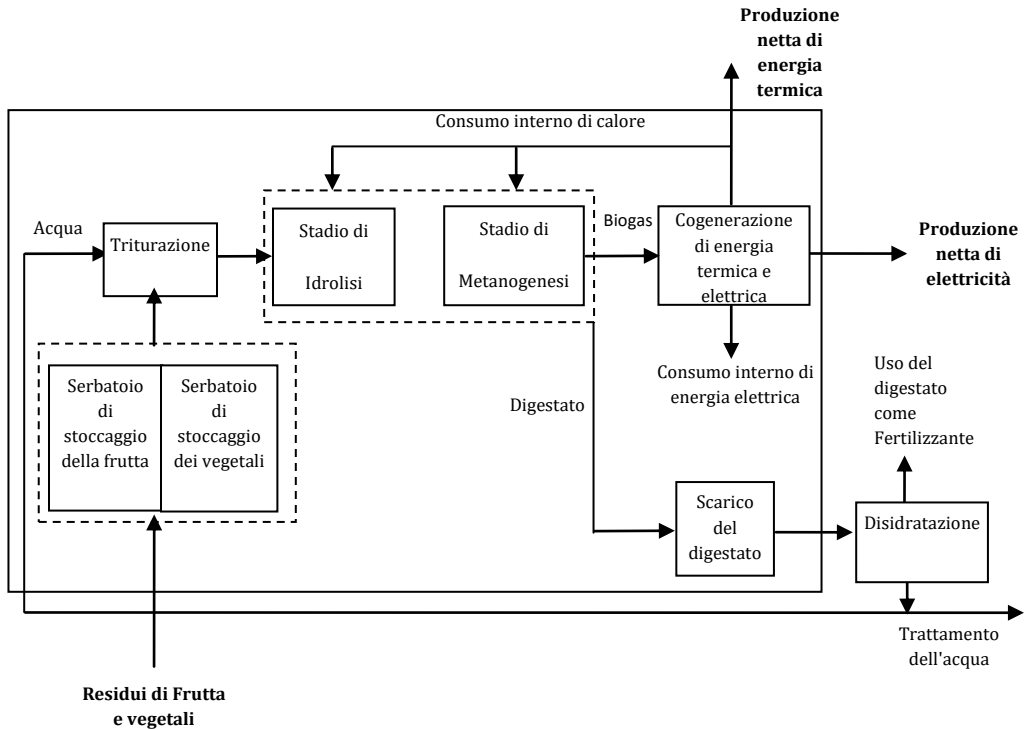


Figura 13: Diagramma di processo dell'impianto su scala industriale.

La produzione netta di energia elettrica è di 911 kWh d⁻¹, con una corrispondente produzione annuale di 306 MW a⁻¹, sufficiente a coprire il 25 % del fabbisogno di energia elettrica del mercato all'ingrosso. Poiché i consumi termici dell'impianto sono abbastanza ridotti, rimangono disponibili 1343 kWh a⁻¹ per altri usi interni o esterni al mercato stesso.

Data la possibilità di utilizzare l'energia elettrica prodotta dal digestore anaerobico per una quota del fabbisogno del mercato ortofrutticolo, è stata eseguita un'analisi economica per valutarne i costi di produzione. Il costo equivalente dell'energia (*CoE*) è stato calcolato mediante il rapporto tra i costi totali annuali (*C_T*) e la produzione annuale netta di energia (*E_N*):

$$CoE = \frac{C_T}{E_N} = \frac{TCI \cdot CCR + C_{O\&M}}{E_N} \quad (18)$$

nella quale:

TCI è il valore dell'investimento, *CCR* è il costo del capitale e *C_{O&M}* rappresentano i costi annuali di esercizio e manutenzione.

Produzione giornaliera di FVR	9 t d ⁻¹
Composizione di FVR	ST=8,7% _{tq} SV=86%TS
Temperatura di processo	35 °C
Tasso di carico organico	2,5 kg _{sv} d ⁻¹ m ⁻³
Produzione specifica di biogas	0,78 Nm ³ kg _{sv} ⁻¹
Produzione specifica di metano	0,43 Nm ³ kg _{sv} ⁻¹
HRT 1° e 2° stadio	5/25 d
Efficienza elettrica/termica del co-generatore	35%/50%
Consumi elettrici degli ausiliari di impianto	10 kWh t _{FVR} ⁻¹
Fattore di utilizzazione del co-generatore	92%

Tabella 9: Dati principali di progetto per un impianto biogas su scala industriale.

Volume complessivo del digestore (1°+2° stadio)	270 m ³
Produzione media di biogas	525,2 Nm ³ d ⁻¹
Produzione media di metano	289,6 Nm ³ d ⁻¹
Produzione di energia primaria	2859,6 kWh d ⁻¹
Potenza in uscita dal co-generatore	41,7 kW
Produzione di energia elettrica lorda	1000,9 kWh d ⁻¹
Produzione di energia termica lorda	1429,8 kWh d ⁻¹
Consumo di energia elettrica	90 kWh d ⁻¹
Consumo di energia termica	86,4 kWh d ⁻¹
Produzione netta di energia elettrica	910,9 kWh d ⁻¹
Energia termica disponibile	1343,4 kWh d ⁻¹

Tabella.10: Principali prestazioni dell'impianto industriale di digestione anaerobica.

Il costo del capitale dipende dal tasso di interesse annuale (7% in questo caso) e dalla durata dell'investimento (20 anni). In base ad un'analisi di mercato il costo dell'investimento è risultato pari a 300.000,00 €, mentre i costi annuali e di manutenzione sono stati valutati pari al 6 % del valore dell'investimento.

L'analisi economica ha mostrato che il costo di produzione dell'energia elettrica di un impianto di digestione anaerobica, della taglia indicata in precedenza, è di 151,0 € MWh che è più basso del costo di acquisto (200,0 €) che sostiene in questo momento il mercato all'ingrosso. Inoltre se almeno il 50% dell'energia termica prodotta dal co-generatore fosse effettivamente impiegato il *CoE* si abbasserebbe a 100,0 €/MWh. Questo nell'ipotesi di impiegare l'energia termica in sostituzione di combustibili fossili.

4.5 I residui dell'industria delle patate

I residui dell'industria di trasformazione delle patate derivano dai processi comunemente impiegati e in particolare dalla surgelazione, dall'essiccamento, dall'inscatolamento e dalla frittura. Questa tipologia di scarti comprende per esempio le bucce e i tuberi con difetti e danni meccanici.

Le *chips* di patate sono il prodotto principale dell'industria degli *snack foods* che è ampiamente diffusa in tutto il mondo. Nel corso della loro produzione è generata una notevole quantità di residui costituita da materie prima e prodotto finito di scarto, bucce e acque di processo.

I liquidi sono in genere avviati agli impianti di trattamento delle acque reflue, mentre i solidi sono smaltiti in impianti di trattamento esterni. Tutti questi residui sono caratterizzati da un elevato contenuto in amido, zuccheri e altri componenti quali oli e grassi vegetali e pertanto il loro trattamento rappresenta un problema dal punto di vista ambientale. Essi presentano, infatti, un'elevata deperibilità e la loro rapida rimozione è pertanto obbligatoria anche se ne determina elevati costi di smaltimento a carico delle industrie di trasformazione. Poiché questi residui presentano un'elevata umidità, possono rappresentare un substrato idoneo al trattamento mediante la digestione anaerobica. Le *chips* di scarto, inoltre, presentano un elevato contenuto in grassi (intorno al 40%) potrebbero portare a un significativo aumento della produzione di biogas e migliorare il recupero di energia dai residui.

Tuttavia a causa del loro tenore elevato in composti organici solubili, la digestione anaerobica dei tuberi e dei loro sottoprodotti industriali può essere molto critica nel caso dell'impiego come singolo substrato.

Diversi autori hanno riportato condizioni instabili di processo nel trattamento di questi residui in condizioni mesofile (Kaparaju *et al.*, 2005) e per il superamento di questo problema hanno impiegato letame suinicolo quale co-substrato. Altri studi riportano i risultati della digestione anaerobica di residui singolarmente e in combinazione con fogliame derivante da barbabietola da zucchero (Kryvoruchko *et al.*, 2009, Parawira *et al.*, 2005). Con la co-digestione è stata ottenuta una resa in metano più elevata rispetto alla semplice digestione del singolo substrato (Parawira *et al.*, 2004). È stata infine studiata la digestione anaerobica in condizioni mesofile di scarti solidi di patate in due sistemi di digestione anaerobica con doppio stadio. Il primo impiegando un reattore a letto solido in connessione con un reattore anaerobico a letto di fango con flusso ascendente (UASB), mentre il secondo era costituito da un reattore a letto solido in connessione con un reattore impaccato con un letto di paglia di grano.

La seconda configurazione ha evidenziato una velocità di degradazione maggiore rispetto al primo, anche se la resa in metano è stata la stessa per entrambi i sistemi (Parawira *et al.*, 2006). Lo stesso autore ha studiato, su scala di laboratorio, la digestione anaerobica di residui solidi di patate con un trattamento bi-stadio in condizioni mesofile e termofile (Parawira *et al.*, 2007). Con la co-digestione è stata ottenuta una resa in metano più elevata rispetto alla semplice digestione del singolo substrato (Parawira *et al.*, 2004). È stata infine studiata la digestione anaerobica in condizioni mesofile di scarti solidi di patate in due sistemi di digestione anaerobica con doppio stadio. Il primo impiegando un reattore a letto solido in connessione con un reattore anaerobico a letto di fango con flusso ascendente (UASB), mentre il secondo era costituito da un reattore a letto solido in connessione con un reattore impaccato con un letto di paglia di grano.

La seconda configurazione ha evidenziato una velocità di degradazione maggiore rispetto al primo, anche se la resa in metano è stata la stessa per entrambi i sistemi

(Parawira *et al.*, 2006). Lo stesso autore ha studiato, su scala di laboratorio, la digestione anaerobica di residui solidi di patate con un trattamento bi-stadio in condizioni mesofile e termofile (Parawira *et al.*, 2007).

Il trattamento anaerobico di residui solidi derivanti dalla trasformazione industriale delle patate è stato studiato in reattori continui a miscelazione completa (CSTR) in regime termofilo (55°C) su scala di laboratorio. In particolare è stato condotto uno studio cinetico per ricavare un semplice modello interpretativo per la progettazione dei reattori (Linke *et al.*, 2006). Lo studio mostra che un incremento del carico organico causa una diminuzione nella produzione di biogas e nel tenore di metano.

Altri lavori sono stati relativi alla produzione di Idrogeno e metano impiegando un processo di digestione anaerobica bistadio (Zhu *et al.*, 2008) e alla degradazione di sostanze solubili nelle acque reflue dell'industria delle patate (Durruty *et al.*, 2013).

In base alle conoscenze dell'autore tutti gli esperimenti sono stati condotti su scala di laboratorio ma nessun esperimento è stato condotto su larga scala o almeno su scala pilota. Attualmente, la digestione anaerobica dei residui prodotti nella trasformazione industriale delle patate, come singolo substrato, è un processo molto impegnativo a causa dell'elevata biodegradabilità di questi materiali che può condurre molto rapidamente ad una forte acidificazione dei reattori con conseguente inibizione dell'attività dei batteri metanigeni.

La produzione italiana di *chips* è pari a 45.000 t a⁻¹, impiega 180.000 t a⁻¹ di materia prima, con residui dovuti alle materie prime che rappresentano il 2-8% del totale e di prodotto finito pari al 5% delle *chips* prodotte. Le acque di processo rappresentano una quota importante dei residui, poiché occorrono 10 l kg⁻¹ patate. In Sardegna esiste un'unica realtà produttiva che trasforma 2000 t a⁻¹ di patate.

Per verificare la possibilità di ottenere energia dai residui nell'industria delle patate, nel presente lavoro sono stati eseguiti due studi su scala pilota in condizioni termofile, dei quali uno relativo al trattamento dei singoli residui solidi (tuberi e bucce), mentre l'altro alla miscela combinata di solidi (tuberi, *chips* e bucce) e liquidi (acque di processo). Sono stati identificati i parametri ottimali del processo per il raggiungimento della maggiore efficienza possibile di conversione energetica.

I risultati dello studio sperimentale sono stati impiegati per la valutazione preliminare delle prestazioni di un impianto di digestione anaerobica su scala industriale.

4.5.1 Materiali e metodi

Le prove per i soli residui solidi e per la miscela combinata di reflui e residui sono state condotte impiegando l'impianto sperimentale, descritto nella sezione 4.2.2, in regime termofilo. I residui solidi e i reflui sono stati prelevati due volte alla settimana presso una linea industriale per la produzione di *chips* localizzata in Sardegna (Terrantica srl).

La metodologia di preparazione e caratterizzazione dei campioni è stata quella descritta nella sezione 4.2.3. Per la preparazione delle miscele combinate di solidi e reflui è stato impiegato un rapporto patate-*chips*-reflui pari a 12:1:3.

I reflui sono stati impiegati per diluire le *chips*, ottenendo una miscela con un contenuto iniziale in ST pari al 24%.

La miscela così preparata è stata aggiunta ai tuberi di scarto e alle bucce residue per avere un substrato con un contenuto di ST iniziale intorno al 22% e immessa nella tramoggia di carico. Nella stessa tramoggia è stata aggiunta una quantità di digestato in modo tale da portare il contenuto in ST a un valore del 7%, tipico per la digestione anaerobica in condizioni *wet*. Non essendo l'impianto dotato di un sistema di riciclo, questo è stato effettuato manualmente.

Campioni di 4-6 kg sono stati prelevati giornalmente dal reattore, mentre campioni della stessa entità, sono stati prelevati per due volte alla settimana dalla miscela in alimentazione e dal digestato in scarico. I campioni sono stati triturati e omogeneizzati con un *cutter*, essiccati a 105°C in stufa termostatica e poi macinati finemente. Le procedure operative e di monitoraggio del processo sono quelle descritte nella sezione 4.3.4 del presente documento.

I bilanci di massa e di energia e i calcoli dell'efficienza di conversione energetica sono stati eseguiti secondo la metodologia indicata nella sezione 4.2.5 di questo documento.

E' stata utilizzata la microscopia elettronica a scansione (SEM) per un'indagine preliminare sulla morfologia delle specie microbiche coinvolte nel processo di digestione anaerobica. Recentemente, infatti, questa tecnica è stata applicata con successo per identificare i gruppi microbici presenti nei reattori impiegati per la digestione anaerobica (Molinuevo-Salces *et al.*, 2012).

L'esperimento è stato avviato inoculando nel reattore 935 kg di digestato proveniente dalla digestione anaerobica dei FVR per fornire un'adeguata popolazione di microrganismi già adattati al trattamento di residui vegetali, sia pure in condizioni mesofile. La temperatura del reattore è stata portata gradualmente (2°C d⁻¹) al valore di 50°C ± 0,5°C ed è stata tenuta costante per tutta la durata dell'esperimento.

Complessivamente l'impianto di digestione anaerobica è stato sottoposto a monitoraggio per 72 giorni, dei quali i primi 48 necessari alla completa sostituzione dell'inoculo con i residui solidi derivanti dall'industria delle patate, mentre i restanti 24 giorni di fase stazionaria che è stata denominata fase 1.

4.5.2 Risultati e discussione

I residui solidi

La composizione chimica media dei residui industriali solidi ha mostrato un tenore in umidità compreso tra il 75% e l'85%, con un rapporto C/N intorno a 30 ed un contenuto in solidi volatili su base secca compreso tra 82 e 90%.

La Fig.14a-d sintetizza i risultati più importanti in termini di composizione del biogas, rapporto FOS/TAC, carico organico giornaliero, tasso di produzione del biogas e contenuto in metano.

Come mostrato nella Fig.14a, la portata di alimentazione è aumentata costantemente nella fase di avvio fino a ottenere la completa sostituzione dell'inoculo iniziale.

Nella fase successiva si osservano fluttuazioni nel carico organico giornaliero che sono dovute alle azioni correttive rese necessarie dal controllo del carico organico.

La Fig.14b mostra come il carico organico giornaliero sia stato aumentato fino a 2,0 kg_{sv} d⁻¹ m⁻³, con un corrispondente aumento del rapporto FOS/TAC. Appena questo ha superato il valore di 0,40 il carico organico giornaliero è stato ridotto a 1,5-2,0 kg_{sv} d⁻¹ m⁻³.

I risultati sperimentali mostrano come, anche per questi residui, quando sono stati raggiunti valori di FOS/TAC di 0,50 il processo, si è ancora mantenuto stabile in termini di produzione biogas e contenuto in metano. La Fig.14c mostra l'andamento del GPR.

In buone condizioni di processo (FOS/TAC intorno a 0,40 e OLR non superiore a 2,0 kg_{sv} d⁻¹ m⁻³) il GPR è variato tra 1,1 e 1,3 Nm³_{biogas} m⁻³_{reattore} d⁻¹, mentre in condizioni non ottimali il GPR è inferiore a 1,0 m⁻³_{reattore} d⁻¹.

La Fig.14d mostra l'andamento della composizione del biogas. Come si può notare il contenuto in CH₄ è variato tra il 43,4% e il 63,1%, con un valore medio di 54,7% nella fase 1, mentre la CO₂ è variata tra il 37,4% e il 56,8%.

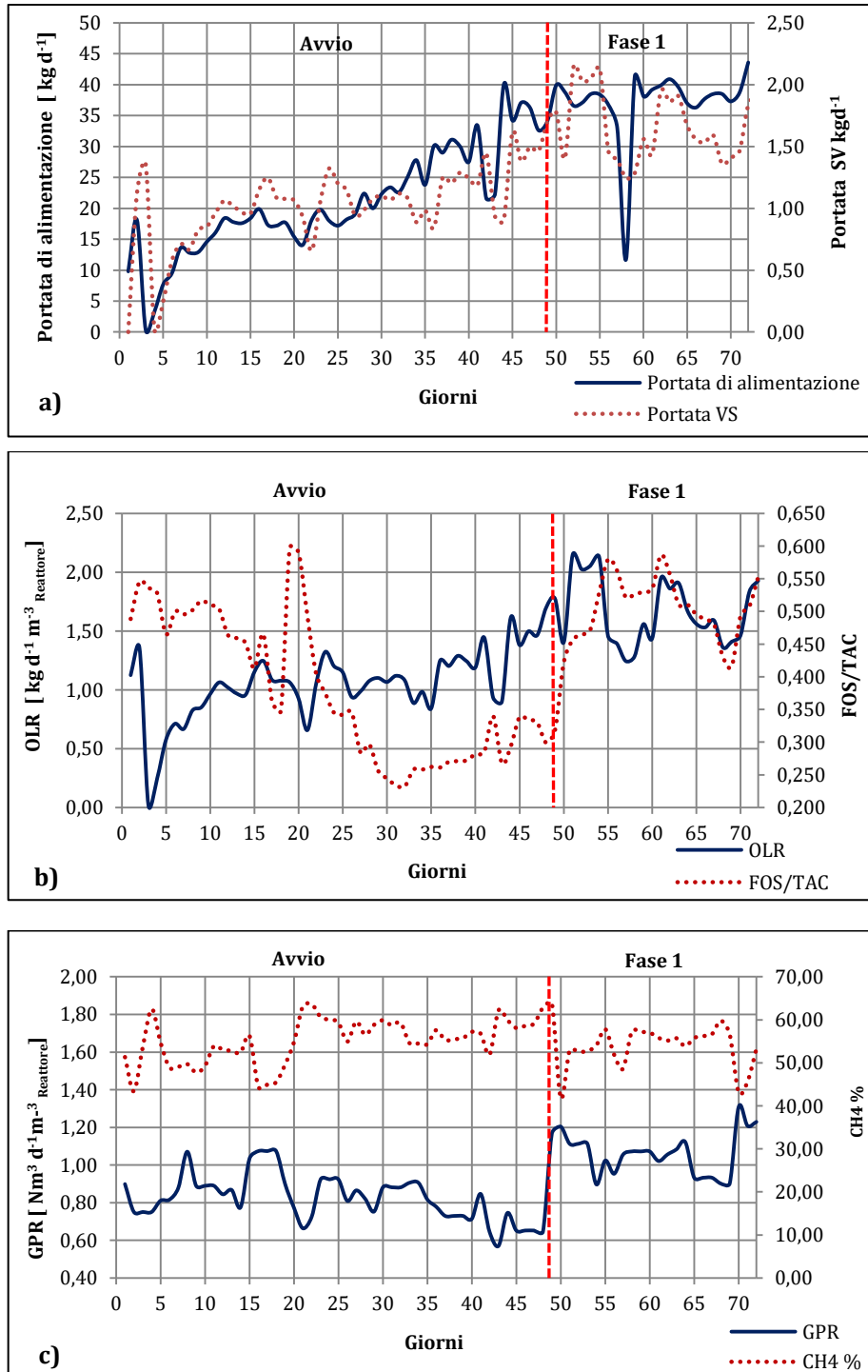


Figura 14: Principali risultati su scala pilota. a) Portata di alimentazione e portata di VS. b) Carico organico e FOS/TAC. c) Tasso di produzione del biogas.

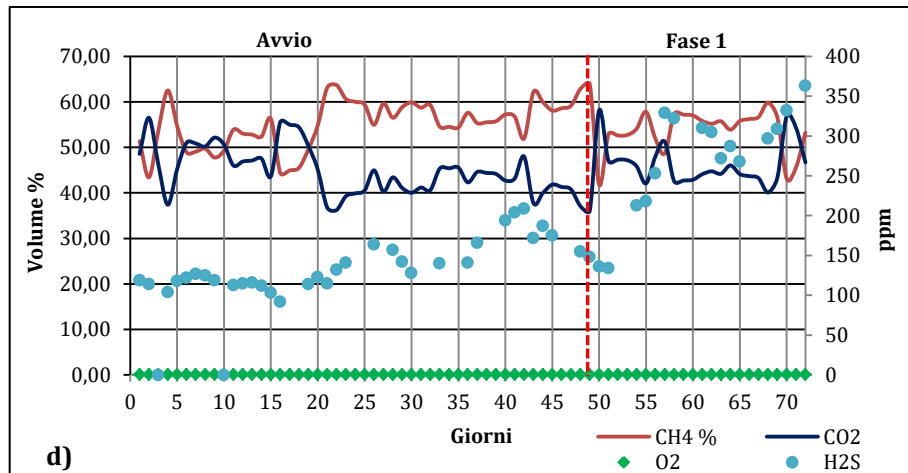


Figura 14: Principali risultati su scala pilota. d) Contenuto % CH₄.

Nel corso dell'intero studio sperimentale l'idrogeno solforato nel biogas ha raggiunto un contenuto massimo di 363 ppm, comunque inferiore al limite di 1000 ppm suggerito per l'uso diretto del biogas nei motori a combustione interna. La stabilità del processo è stata raggiunta con un OLR di circa 2,0 kg_{sv} d⁻¹ m⁻³. Questo corrisponde a una portata di alimentazione massima di 40 kg d⁻¹, con un HRT di 24 giorni.

Il valore massimo di GPR riscontrato è stato pari a 1,3 Nm³_{biogas} m_{reattore}⁻³ d⁻¹ con una produzione specifica di metano di 0,429 Nm³ kg_{sv}⁻¹.

In condizioni di processo stabili il 70% dei solidi volatili è stato convertito in biogas. Rispetto al caso dei FVR si registra un tasso di conversione inferiore di oltre 10 punti percentuali, probabilmente a causa della forte presenza di amido che risulta di più lenta degradazione e della presenza molto limitata di zuccheri semplici.

Il calcolo dell'efficienza di conversione energetica netta $\eta_{AD,N}$ mostra che il processo di digestione anaerobica in condizioni di termofilia dei residui solidi è in grado di convertire il 75 % circa dell'energia del substrato in energia del biogas (Fig.15).

Anche in questo caso un modello bi-esponenziale a quattro parametri (equazione 12) si adatta bene alla previsione dei valori di efficienza di conversione energetica nel tempo. Le equazioni (19) e (20) impiegate per la η_{AD} e la $\eta_{AD,N}$ sono rispettivamente:

$$\eta_{AD} = -998064,5 \cdot EXP(-0,0430872 \cdot d) + 998814,57 \cdot EXP(-0,0430844) \cdot d \quad (19)$$

$$\eta_{AD,N} = 0,0011 \cdot EXP(0,106321 \cdot d) + 91,15 \cdot EXP(-0,0028047) \cdot d \quad (20)$$

La sintesi della stima per entrambe le variabili è riportata nella Tab.11. I risultati confermano il buon accordo con i dati sperimentali.

Infine si può osservare come l'efficienza di conversione netta calcolata sia ancora una volta in pieno accordo con la conversione media degli SV riportata in precedenza.

La Tab.12 riassume i valori medi della produzione specifica di biogas e di metano. E' interessante notare come i valori della produzione specifica di biogas e di metano non siano troppo differenti rispetto a quelle ottenute con i FVR.

	SSE	MSE	RMSE	R-quadro
η_{AD}	6,87159	2,29053	1,51345	0,985898
$\eta_{AD,N}$	0,938837	0,312946	0,559415	0,992007

Tabella 11: Sintesi della stima.

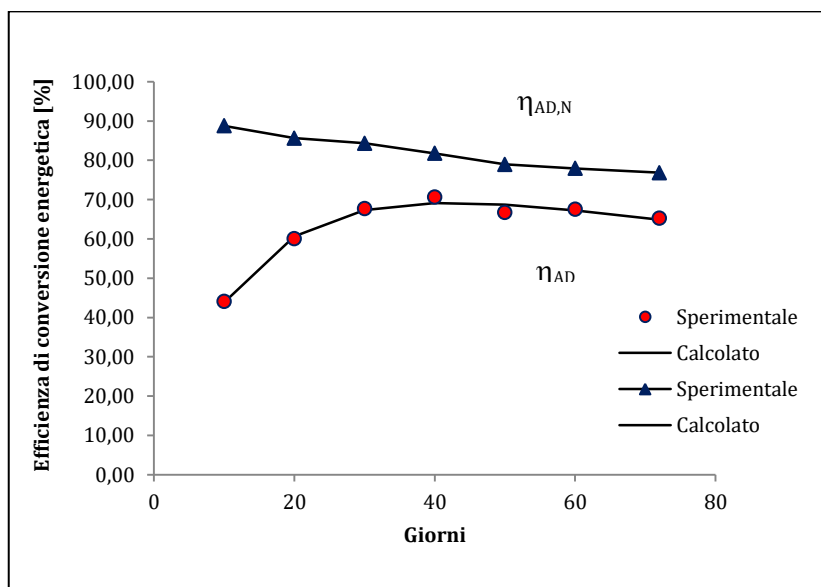


Figura 15: Efficienza di conversione energetica per i residui solidi.

Per questa ragione la digestione anaerobica in condizioni termofile dei residui solidi dell'industria delle patate come singolo substrato può essere una tecnologia utile e vantaggiosa sia dal punto di vista energetico che ambientale.

La Fig.16 mostra le immagini ottenuti con la SEM del materiale presente nella tramoggia di carico (A), nella testa (B) e nella coda (C) del reattore. Per ciascuno dei tre campioni sono state realizzate due immagini con diverso ingrandimento. Nella tramoggia sono predominanti batteri sotto forma di cocci e bastoncelli. In testa al reattore, sembrano predominare i batteri a forma di bastoncino allungato. In coda al reattore sono presenti batteri sotto forma di bastoncelli allungati.

Comunque è necessario condurre uno studio specifico approfondito per ottenere un'identificazione corretta dei diversi tipi di batteri coinvolti nel processo.

Periodo sperimentale	Produzione specifica di biogas $\text{Nm}^3 \text{kg}_{sv}^{-1}$	Produzione specifica di metano $\text{Nm}^3 \text{kg}_{sv}^{-1}$
Avvio	0,91	0,50
Fase 1	0,68	0,37

Tabella. 12: Valori medi della produzione specifica del biogas e del metano.

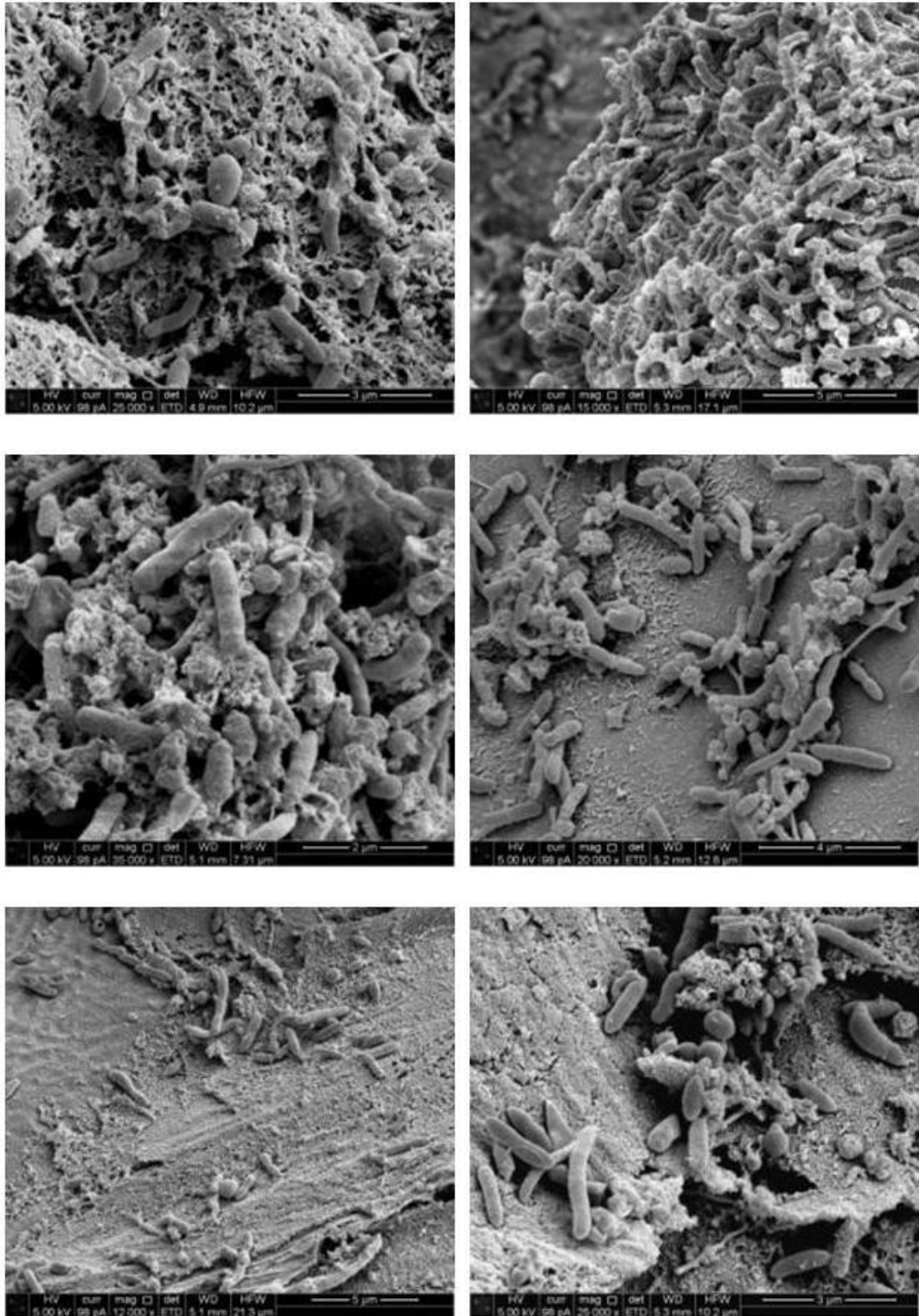


Figura16: Immagini SEM con due diversi ingrandimenti. a) Tramoggia di carico. b) Testa del reattore. Coda del reattore. (Immagini realizzate da Elodia Musu e Simona Podda, Laboratorio di Tele microscopia Sardegna Ricerche)

La miscela combinata di solidi e reflui

L'esperimento è incominciato utilizzando come inoculo digestato proveniente dal precedente trattamento dei residui solidi. Le caratteristiche chimiche dell'inoculo sono mostrate nella Tab.13.

		Umidità %	ST %	SV % _{SS}	Ceneri % _{SS}
Inoculo	Media	98,22	1,78	70,69	26,89
	Deviazione Standard	0,332	-	0,787	2,244

Tabella 13: Caratteristiche chimiche dell'inoculo.

La temperatura del reattore è stata mantenuta costante al valore di $50^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ per tutta la durata dell'esperimento. La fase di avvio è durata 50 giorni, nel corso della quale si è ottenuta la completa sostituzione dell'inoculo iniziale con la miscela combinata preparata come indicato nella sezione 4.5.1.

Il periodo tenuto completamente sotto monitoraggio è durato 116 giorni, includendo la fase di avvio. Nel periodo sperimentale sono state identificate tre fasi: la fase di avvio (50 giorni), la fase stazionaria (24 giorni) determinata in base al HRT, la fase finale (42 giorni) nella quale è stato raggiunto il valore massimo per il carico organico. Il rapporto di riciclo del digestato è stato mantenuto al valore di 0,32.

Sono stati determinati giornalmente i ST all'interno del reattore, per valutare la concentrazione della sostanza organica nel digestore. Sono stati determinati due volte alla settimana i contenuti di ST e SV nella miscela alimentata per verificare i valori del carico organico previsto e, con la stessa frequenza, nel digestato per valutare l'efficienza di conversione della sostanza organica. Nella Tab.14 sono riassunti i risultati dell'analisi prossima dei diversi residui e reflui derivanti dalla linea di trasformazione delle patate.

		ST %	SV % _{SS}	Ceneri % _{SS}
Patate	Media	21,16	82,15	4,35
	Deviazione Standard	3,613	1,017	0,404
Chips	Media	97,90	85,33	4,13
	Deviazione Standard	0,040	0,163	0,161
Acque reflue	Media	0,66	78,41	14,27
	Deviazione Standard	0,099	3,267	0,641

Tabella 14: Analisi prossima dei residui del processo di produzione delle *chips*.

I valori corrispondenti degli SV sul materiale tal quale sono pari rispettivamente al 17,4% per i tuberi, all'83,6% per le *chips* e allo 0,5% per le acque di processo. A livello industriale il rapporto tra tuberi e *chips* di scarto è normalmente di 12:1.

La Tab.15 mostra i valori sul tal quale di ST e SV per i singoli componenti e per la miscela, preparata secondo i rapporti indicati nella sezione 4.5.

	ST%	SV%
Patate	21,16	17,39
Chips	97,90	83,54
Acque di processo	0,66	0,52
Miscela di alimentazione	24,97	21,27

Tabella 15: Valori di TS e SV nei residui e nella miscela di alimentazione.

La Tab.16 mostra i valori di PCS e PCI sia sul materiale secco sia sul tal quale per i tuberi, le *chips* e la miscela di *chips* e acque di processo.

	PCS MJ·kg _{ss} ⁻¹	PCI _{ss} MJ·kg _{ss} ⁻¹	PCI _{tq} MJ·kg _{ss} ⁻¹
Patate	17,02	15,58	3,30
Chips	26,18	24,36	23,84
Chips e acque di processo	24,18	22,48	5,61

Tabella 16: Potere calorifico superiore e inferiore per i residui della produzione delle chips.

Come si può osservare i valori di PCS e PCI delle *chips* e delle *chips* con le acque di processo differiscono del 7,6% e questo è in linea con l'elevato contenuto in ST delle *chips* stesse. I valori di PCI sono abbastanza differenti per via dell'elevato contenuto umido delle patate e della miscela *chips*-acque di processo.

I valori di ST e SV per la miscela di alimentazione e per il digestato sono riportati nella Tab.17.

		ST %	SV %
Miscela di alimentazione	Media	7,13	83,11
	Deviazione standard	1,807	3,467
Digestato	Media	3,27	69,49
	Deviazione standard	0,379	2,832

Tabella 17: Valori di ST e SV nell'alimentazione e nel digestato.

I valori degli SV nella miscela di alimentazione e nel digestato sono mostrati nella Fig.17. Si può notare come il digestato mantenga valori costanti di SV in tutto l'arco sperimentale con un valore minimo dell'1,6% e uno massimo del 2,6%.

I SV nell'alimentazione sono invece variati tra il 4,4% e il 9,8%. In queste condizioni è stata calcolata un'efficienza media di conversione del 65,0%, con un intervallo tra il 48,0% e l'84,0%. La composizione elementare della miscela di alimentazione e del digestato è mostrata nella Tab.18. Il tenore in Carbonio, su base secca, è mediamente del 47,8% nell'alimentazione e del 35,2% nel digestato, mentre il tenore di Azoto è del 3,48%. Il rapporto C/N è pari a 13,73 e questo conferma l'attitudine di questo substrato alla conversione energetica mediante la digestione anaerobica.

Il contenuto di Azoto non varia in modo significativo nel digestato e questa caratteristica ne può consentire l'uso successivo quale ammendante e migliorante per il suolo (Albuquerque *et al.*, 2013). Questo risultato trova la spiegazione nel fatto che l'Azoto, dopo digestione anaerobica, è presente in diverse forme e, a meno di una trascurabile perdita sotto forma di ammoniaca nel biogas, mantiene complessivamente una concentrazione costante.

Il contenuto in carbonio residuo ancora elevato (35,22%) ne suggerisce anche il possibile impiego in altri processi di conversione energetica (Kratzeisen *et al.*, 2010).

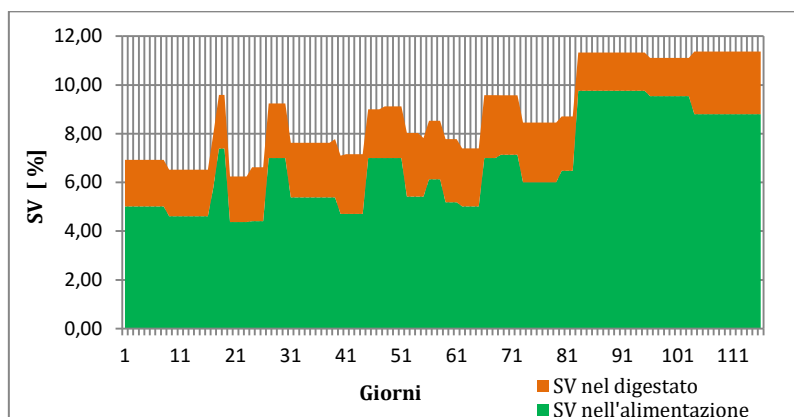


Figura 17: Andamento dei solidi volatili nell'alimentazione e nel digestato.

		C/N	C _{ss} %	H _{ss} %	N _{ss} %
Miscela di alimentazione	media	13,73	47,77	6,50	3,48
	Deviazione Standard	-	4,53	0,82	0,85
Digestato	media	9,05	35,22	5,00	3,89
	Deviazione Standard	-	2,06	0,45	0,03

Tabella 18: Composizione elementare della miscela di alimentazione e del digestato.

Come risultato della degradazione del substrato e della produzione di biogas, rispetto al contenuto energetico iniziale, si ha una diminuzione del PCI dell'ordine del 27% su base secca, mentre una diminuzione del 63% sul tal quale, come mostrato nella Tab.19.

	PCS MJ·kg _{ss} ⁻¹	PCI MJ·kg _{ss} ⁻¹	PCI MJ·kg _{tg} ⁻¹
Miscela di alimentazione	19,27	17,92	1,27
Digestato	14,25	13,14	0,47

Tabella 19: PCS e PCI della miscela di alimentazione e del digestato.

La Fig.18a mostra l'andamento dell'OLR nel corso di tutto l'esperimento. L'incremento nell'OLR determina una crescita del rapporto FOS/TAC nel corso della fase stazionaria (Fig.18b).

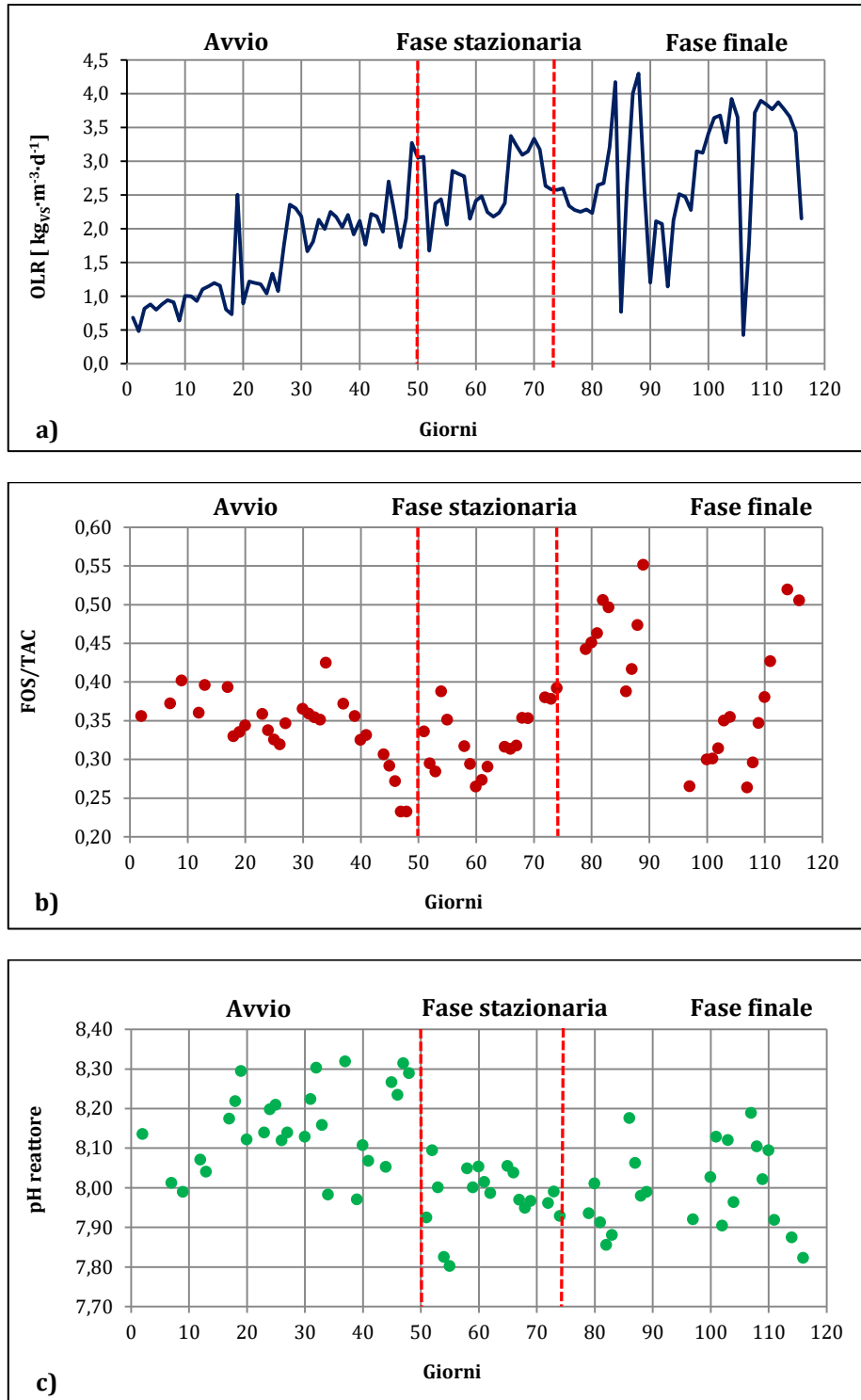


Figura 18: Principali parametri del reattore. a) Carico organico. b) FOS/TAC. c) pH nel reattore.

Come si può vedere l'OLR è stato aumentato gradualmente da un valore iniziale di $0,69 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mediante l'aumento della portata di alimentazione. Il valore massimo nella portata della miscela di reflui e residui ($40,0 \text{ kg d}^{-1}$) è stato raggiunto al 50° giorno e tenuto costante per 24 giorni che corrispondono esattamente al tempo di ritenzione idraulica (HRT). Durante questo periodo, identificato come fase stazionaria, è stato mantenuto un OLR medio di $2,65 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, mentre il rapporto FOS/TAC è variato tra 0,264 e 0,392 e quindi nella regione di massima stabilità del processo. Nella fase stazionaria sono stati rilevati diversi picchi di OLR con un valore massimo di $3,38 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, con un incremento del FOS/TAC fino a 0,4. Un abbassamento dell'OLR fino a $2,28 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ non ha comunque prodotto effetti immediati, data l'inerzia del sistema biologico. Il FOS/TAC è infatti salito fino a 0,506 tra il 76° e l'80° giorno.

Un successivo aumento dell'OLR fino a $4,17 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ha prodotto un ulteriore aumento del FOS/TAC fino a 0,551 nell'89° giorno. Solamente dopo che l'OLR è stato abbassato portandolo a un valore di $1,2 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, il FOS/TAC è nuovamente tornato a valori inferiori a 0,3. Aumentando nuovamente l'OLR fino al raggiungimento di $3,92 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ al 104° giorno, fino il FOS/TAC è risalito fino a 0,519 nel 114° giorno.

In base a queste osservazioni si può dire che il carico organico ottimale per mantenere il processo nelle condizioni di massima stabilità è pari a $2,6 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, valori intorno a $3,0 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ hanno determinato l'insorgere di situazioni di instabilità.

D'altronde occorre dire che OLR elevati sono tipici in genere degli impianti industriali per cui si è comunque ritenuto di dovere operare in condizioni simili. In ogni caso anche con valori di OLR significativamente elevati l'incremento del FOS/TAC è stato inferiore al previsto. Nel processo di trattamento dei FVR e dei residui solidi di patate come singolo substrato, infatti, la risposta del sistema in termini di variazione in aumento del FOS/TAC è stata più rapida e intensa (Pistis *et al.*, 2013, Scano *et al.*, 2014). Nella Fig.18c è mostrato l'andamento del pH all'interno del reattore che evidenzia una leggera diminuzione di questo parametro all'aumento del FOS/TAC, soprattutto nella fase finale. Comunque nel corso di tutto l'esperimento il pH è stato intorno a 8,0 o superiore, mostrando una buona capacità tampone del sistema.

Il pH all'interno della tramoggia di carico è sempre stato intorno a 6,4 con piccole variazioni. Questa sezione dell'impianto pilota ha manifestato anche in questo caso un ruolo importante per il mantenimento della stabilità di processo. Infatti, i residui dell'industria di trasformazione delle patate sono facilmente degradabili e all'interno della tramoggia si acidificano rapidamente nel tempo di permanenza che si è adottato nell'esperimento (3-4 giorni) per via della produzione di acidi volatili.

Questi ultimi compaiono nel primo stadio del processo biochimico di degradazione anaerobica e la loro formazione nella tramoggia previene l'acidificazione del reattore come è stato già mostrato in un altro lavoro (Scano *et al.*, 2014).

Nella Fig.19a-c sono mostrati l'andamento della composizione del biogas, della portata e della produzione specifica di biogas e di metano.

Il contenuto in metano è costantemente superiore al 50 %. Il tasso di produzione di biogas e metano è cresciuto nella fase di avvio tra il 1° ed il 50° giorno. E' poi rimasto costante nel corso della fase stazionaria (50°-75° giorno) e nella fase finale, anche se in questo periodo ha mostrato diverse oscillazioni sia nel tasso di produzione sia nella composizione del biogas.

Nel 34°giorno, per esempio, il valore di FOS/TAC era pari a 0,425, mentre nei 10 giorni precedenti è stato di 0,345.

In accordo con questi valori, il tasso di produzione di biogas è stato di $1,606 \text{ Nm}^3 \text{ d}^{-1}$ con una concentrazione in volume di CH_4 del 46,3%, mentre nei 10 giorni precedenti era stato di $1,052 \text{ Nm}^3 \text{ d}^{-1}$ con una concentrazione in volume di CH_4 del 63,6%.

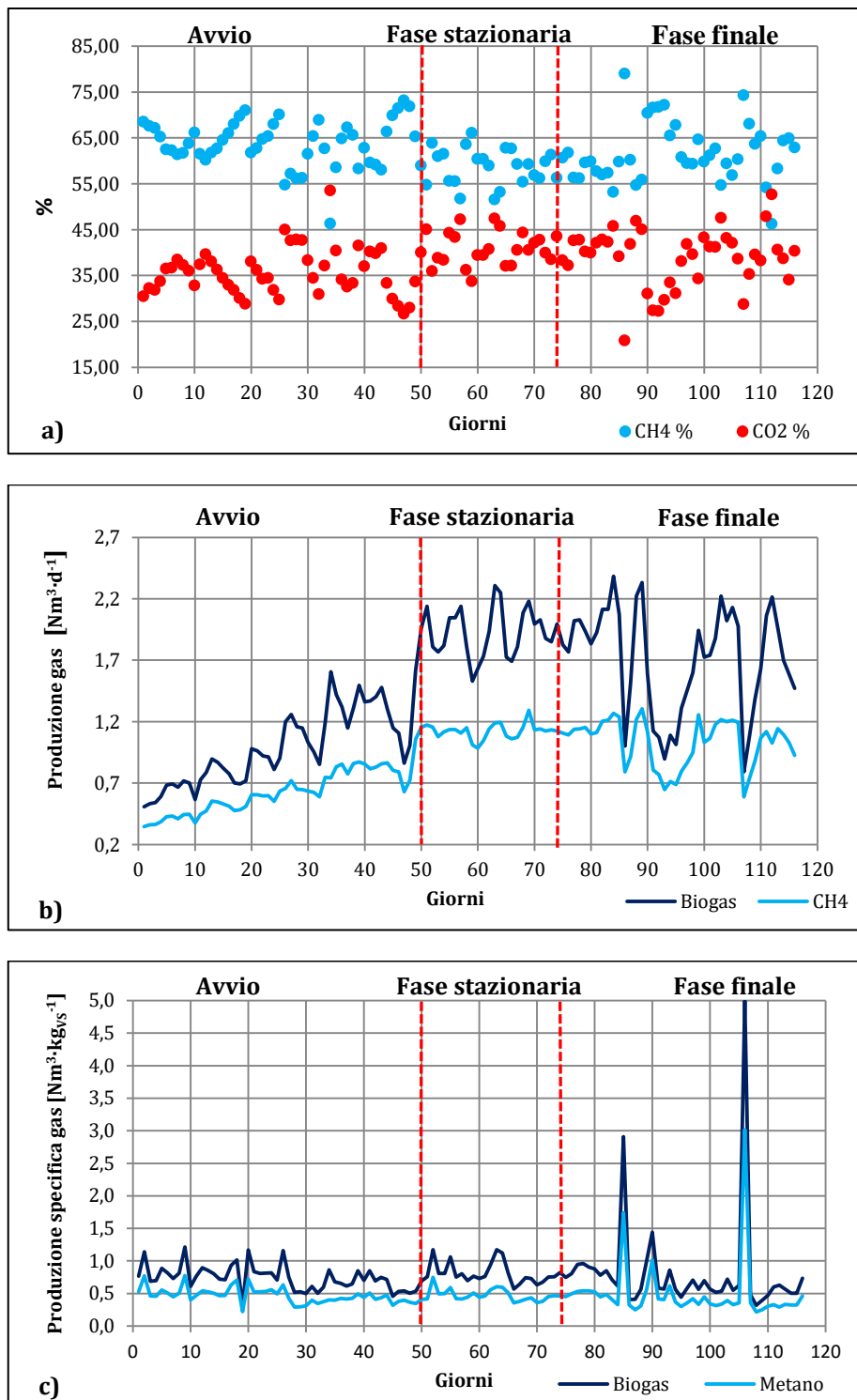


Figura 19: Principali parametri del processo. a) Composizione del biogas. b) Produzione di biogas e metano c) Produzione specifica di biogas e CH₄.

L'incremento nella produzione del biogas è dovuto fondamentalmente all'incremento della CO₂ passata dal 36,3% al 53,5%.

Nella Tab.20 sono riassunti i principali parametri di processo unitamente alle prestazioni ottenute con l'impianto pilota. La fase stazionaria ha mostrato il valore di GPR più elevato con 1,92 Nm³ d⁻¹.

Tra le tre fasi descritte, la fase stazionaria è quella nella quale si registrano i valori inferiori della deviazione standard a riprova della stabilità di processo raggiunta. Infatti, sia nella fase di avvio che nella fase finale sono stati rilevati valori di deviazione standard più elevati e produzioni medie di biogas inferiori. Gli stessi risultati sono stati osservati per la produzione di metano che ha raggiunto nella fase stazionaria il valore di 1,12 Nm³ d⁻¹ e la minore deviazione standard.

Il contenuto medio di metano nel biogas è stato del 63,8% durante la fase di avvio, del 58,8% nella fase stazionaria e del 61,7% nella fase finale.

		Avvio giorni 1-49	Fase stazionaria giorni 50-75	Fase finale giorni 76-116
OLR kg _{sv} m ⁻³ ·d ⁻¹	Media	1,55	2,65	2,84
	Deviazione standard	0,663	0,441	0,964
FOS/TAC	Media	0,341	0,327	0,400
	Deviazione standard	0,045	0,041	0,089
GPR Biogas Nm ³ ·d ⁻¹	Media	0,99	1,92	1,71
	Deviazione standard	0,305	0,195	0,433
GPR CH₄ Nm ³ ·d ⁻¹	Media	0,62	1,12	1,03
	Deviazione standard	0,174	0,061	0,194
CH₄ %	Media	63,8	58,8	61,7
	Deviazione standard	5,119	3,795	6,453
SGP Biogas Nm ³ ·kg _{sv} ⁻¹	Media	0,74	0,81	0,66
	Deviazione standard	0,191	0,161	0,213
SGP CH₄ Nm ³ ·kg _{sv} ⁻¹	Media	0,47	0,47	0,40
	Deviazione standard	0,118	0,089	0,139

Tabella 20: Principali parametri di processo e prestazioni ottenute.

Nonostante la fase stazionaria presenti la concentrazione inferiore di metano rispetto alle altre due fasi, i bassi valori di deviazione standard indicano ancora una volta piccole fluttuazioni e una notevole stabilità del processo. Dal punto di vista della conversione energetica, questa stabilità nella composizione rappresenta un aspetto sicuramente positivo.

La produzione specifica di biogas e metano (SGP) si esprime come volume di gas prodotto per unità di massa di SV alimentati. La SGP del biogas è stata di 0,81 Nm³ kg_{sv}⁻¹ nel corso della fase stazionaria e rappresenta il valore maggiore rilevato.

La SGP media per il metano è stata di 0,47 Nm³ kg_{sv}⁻¹ e risulta uguale a quella registrata nella fase di avvio e superiore a quella nella fase finale. Tuttavia i valori di deviazione standard indicano ancora una volta che i valori inferiori si sono avuti per la fase stazionaria.

Il calcolo dell'efficienza di conversione energetica netta $\eta_{AD,N}$ mostra che il processo di digestione anaerobica in condizioni di termofilia della miscela combinata è in grado di convertire il 77% circa dell'energia del substrato in energia del biogas (Fig.20).

Anche in questo caso, un modello bi-esponenziale a quattro parametri (equazione 12) si adatta bene alla previsione dei valori di efficienza di conversione energetica nel tempo. Le equazioni (21) e (22) impiegate per la η_{AD} e la $\eta_{AD,N}$ sono rispettivamente:

$$\eta_{AD} = 2936954,5 \cdot EXP(-0,0054969 \cdot d) - 2936959 \cdot EXP(-0,0054973) \cdot d \quad (21)$$

$$\eta_{AD,N} = 65,79 \cdot EXP(0,001463 \cdot d) + 29,51 \cdot EXP(-0,0525997) \cdot d \quad (22)$$

La sintesi della stima per entrambe le variabili è riportata nella Tab.21. I risultati confermano il buon accordo con i dati sperimentali.

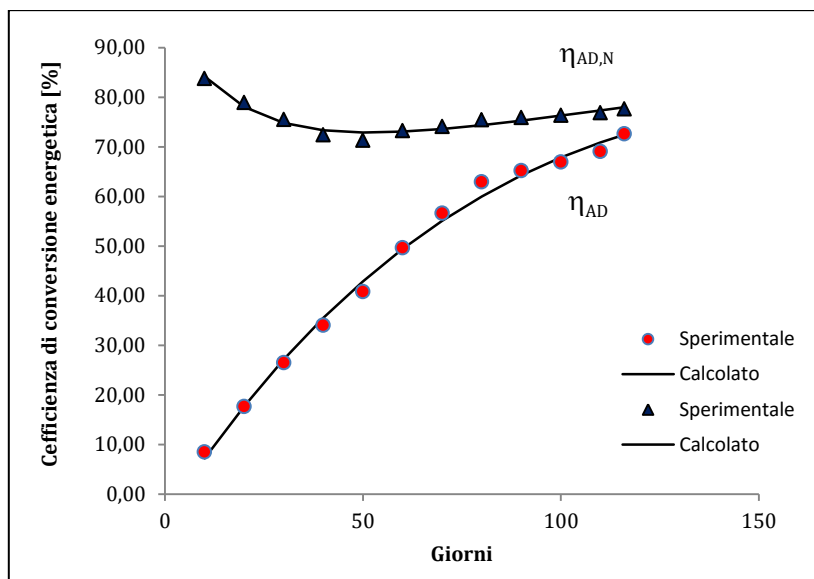


Figura 20: Efficienza di conversione energetica per la miscela combinata.

	SSE	MSE	RMSE	R-quadro
η_{AD}	24,98555	3,123193	1,767256	0,99519
$\eta_{AD,N}$	6,98195	0,872744	0,934208	0,941669

Tabella 21: Sintesi della stima.

Confrontando i risultati del trattamento della miscela combinata con quelli ottenuti nella digestione anaerobica in condizioni termofile dei soli residui solidi (tuberi difettosi e bucce) sono evidenti differenze in termini di carico organico giornaliero applicato che è in questo caso molto più elevato. Infatti, i singoli residui solidi hanno consentito un carico massimo di $2 \text{ kg}_{sv} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, contro i $2,65 \text{ kg}_{sv} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ per la miscela combinata. Inoltre è stata rilevata una minore produzione specifica di metano e biogas. La miscela combinata mostra anche una concentrazione superiore di metano. Tutti i risultati del confronto sono riportati nella Tab.22.

Come si può notare, sia la produzione di biogas sia quella di metano risultano decisamente più elevate per la miscela combinata (>30%), lo stesso avviene per la produzione specifica anche se in una misura più limitata (>15%).

Durante l'intero esperimento l'impianto pilota di digestione anaerobica ha trattato 3.611 kg di miscela combinata (oltre a 935 kg di inoculo iniziale) con una produzione complessiva di biogas di 168 Nm³.

	Patate	Miscela combinata
OLR [kg _{sv} ·m ⁻³ ·d ⁻¹]	2,0	2,65
GPR Biogas [Nm ³ ·d ⁻¹]	1,29	1,92
GPR CH₄ [Nm ³ ·d ⁻¹]	0,70	1,12
CH₄ %	54,7	58,8
SGP Biogas Nm ³ ·kg _{sv} ⁻¹	0,68	0,81
SGP CH₄ Nm ³ ·kg _{sv} ⁻¹	0,37	0,47

Tabella 22: Confronto tra i risultati del trattamento dei residui solidi e della miscela combinata.

Per valutare la produzione di biogas su scala industriale, i risultati sperimentali sono stati impiegati per la determinazione preliminare delle prestazioni di un impianto di trattamento industriale di piccola taglia, progettato specificamente per trattare i residui di un'impresa che trasforma 2000 t a⁻¹ di patate.

L'impianto è basato su un reattore bistadio come suggerito dai risultati dello studio sperimentale. Inoltre l'impianto comprende tre serbatoi di stoccaggio separati per le patate tal quali, le *chips* e le acque di processo separatamente.

Il biogas prodotto alimenta un'unità di cogenerazione basata su un motore a combustione interna integrato con una sezione per il recupero di calore. L'energia termica richiesta dal processo di digestione anaerobica è fornita da una quota dell'acqua calda prodotta dal co-generatore. L'energia elettrica necessaria al funzionamento degli ausiliari di impianto deriva sempre dalla medesima unità. L'impianto di generazione di energia elettrica mediante la digestione anaerobica è stato dimensionato per trattare una quantità di scarti di patate equivalenti pari a 3 t d⁻¹, considerando la conversione di *chips* e acque di processo in patate secondo il loro contenuto in ST.

Sono stati assunti un OLR di 2,65 kg_{sv} m⁻³ d⁻¹ e una SGP CH₄ di 0,78 Nm³ kg_{sv}⁻¹ come ottenuto sperimentalmente.

Le assunzioni concernenti le efficienze elettriche e termiche si sono basate sui valori tipici per le unità commerciali. Il fabbisogno di energia termica è stato determinato su base giornaliera tenendo conto del calore necessario a mantenere il reattore alla temperatura di processo (50°C) e per compensare le perdite di energia termica del reattore stesso. I consumi elettrici specifici degli ausiliari di impianto (10 kWh·t⁻¹) sono stati assunti in base alle caratteristiche ed alle prestazioni dei sistemi commerciali.

Sono state considerate un'efficienza elettrica del 35% e un'efficienza termica del 50% del co-generatore (con riferimento al PCI).

La produzione di energia elettrica netta è stata calcolata sottraendo i consumi elettrici interni dall'energia complessivamente prodotta dal co-generatore. I risultati complessivi sono riportati nella Tab.23.

Produzione di biogas	418 Nm ³ · d ⁻¹
Produzione di metano	243 Nm ³ · d ⁻¹
Produzione di energia primaria da biogas	2428 kWh d ⁻¹
Potenza in uscita del co-generatore	101 kW
Potenza elettrica del co-generatore	35 kW _e
Potenza termica del co-generatore	51 kW _t
Produzione di energia elettrica lorda	850 kWh d ⁻¹
Produzione di energia termica lorda	1214 kWh d ⁻¹
Produzione di energia elettrica netta	820 kWh d ⁻¹

Tabella 23: Principali prestazioni dell'impianto di digestione anaerobica su scala industriale.

Considerando un PCI per il biogas di 22,17 MJ Nm⁻³ una prima stima identifica un'unità di cogenerazione con una potenza elettrica in uscita di 35 kW_e e una potenza termica di 51 kW_t. Assumendo che i consumi elettrici di una linea di produzione di *chips* di patate siano di 0,69 kWh kg⁻¹ che corrispondono a 4140 kWh d⁻¹, l'impianto su scala industriale potrebbe permettere di coprire il 20% del fabbisogno elettrico dell'impresa.

4.6le colture dedicate e i residui dell'industria casearia e olearia

L'impiego di colture dedicate per l'alimentazione di impianti di digestione anaerobica non è nuovo e studi sul loro potenziale metanigeno sono stati condotti già da molti anni. Tuttavia l'impiego delle colture dedicate non è stato mai considerato economicamente fattibile e occasionalmente sono stati impiegati in co-digestione residui agricoli e materiali di scarto con l'obiettivo di conferire stabilità al processo.

Le politiche di incentivazione delle fonti rinnovabili di energia attuate in tutta l'Europa e la disponibilità di agevolazioni sotto forma di forti incentivi economici o esenzioni dalle imposte ha determinato la realizzazione di numerosi impianti di digestione anaerobica basati sulle colture dedicate. In Germania, per esempio, dal 1990, anno nel quale erano presenti 100 impianti, si sono raggiunti nel 2010 i 6000 impianti, dei quali il 90-95% fa uso di colture dedicate che in diversi impianti sono impiegate come singolo substrato (Murphy *et al.*, 2011). In Sardegna la gran parte dei 30 impianti a biogas presenti utilizza per l'alimentazione il trinciato di mais (silomais) come singolo substrato ed in alcuni casi in miscela con il triticale. Attualmente, la maggior parte delle colture dedicate è sviluppata come monocoltura intensiva e questo porta a fenomeni di erosione del suolo e ad un consumo rapido dei nutrienti nel terreno. Le colture dedicate richiedono livelli rilevanti di prodotti agrochimici (fertilizzanti, pesticidi), parzialmente reintegrati, nel caso dei fertilizzanti, dal riciclo del digestato, inoltre hanno bisogno di imponenti quantitativi di acqua. Le colture dedicate richiedono anche un'elevata disponibilità di superficie coltivabile che, per esempio per i citati impianti della Sardegna si attesterebbe intorno agli 11.000 ha nel caso dell'impiego di trinciato di mais e triticale. Infine il costo delle materie prime prodotte in questa regione è

particolarmente elevato, con un'incidenza pari al 45% circa dei ricavi nel caso specifico del trinciato di mais, o ancora più elevata nel caso dell'uso anche del triticale.

Diversi studi presenti in letteratura riguardano la valutazione della possibile sostituzione delle colture dedicate con scarti organici (Schievano *et al.*, 2009), all'ottimizzazione di miscele di scarti agroindustriali da destinare alla co-digestione (Álvarez *et al.*, 2010), all'impiego di letame suino con scarti colturali (Cuetos *et al.*, 2011), all'uso di letame, di fanghi di depurazione, alla frazione umida dei rifiuti solidi urbani come principali substrati (Mata-Alvarez *et al.*, 2014). Uno studio prende in esame specificamente la co-digestione di letame con residui agricoli e colture dedicate eseguendo prove in parallelo sia su scala pilota sia industriale in condizioni termofile (Cavinato *et al.*, 2010).

Una possibile soluzione al problema in Sardegna può essere rappresentata dalla sostituzione della coltura dedicata maggiormente impiegata (trinciato di mais) con una miscela di biomasse residuali delle quali si ha un'ampia disponibilità nella regione. Queste sono rappresentate fondamentalmente dalla scotta residua del processo di preparazione della ricotta, dalle acque di vegetazione e dalle sanse residue dal processo di estrazione dell'olio e dal letame originato dagli allevamenti ovini.

Queste biomasse residuali e in particolare le prime due rappresentano un enorme problema ambientale per la regione che peraltro è il primo produttore di latte ovino italiano.

Un primo obiettivo di questo studio sperimentale è quello di giungere a un elevato grado di sostituzione del trinciato di mais con una miscela di scotta, sanse denocciolate, acque di vegetazione e letame.

Un secondo obiettivo è quello di individuare le condizioni ottimali di processo di co-digestione. Un terzo obiettivo è quello di valutare le prestazioni di un impianto industriale, alimentato con le miscele preparate secondo le formulazioni individuate.

4.6.1 Materiali e metodi

Le prove per il solo trinciato di mais e per la miscela con i residui sono state condotte impiegando l'impianto sperimentale, descritto nella sezione 4.2.2, in regime mesofilo.

Il trinciato di mais, le sanse, le acque di vegetazione, la scotta e il letame sono stati forniti dalla società Olmeo proprietaria di un impianto di digestione anaerobica della potenza di 1 MW. La metodologia di preparazione e caratterizzazione dei campioni è stata quella descritta nella sezione 4.2.3.

Le miscele sono state preparate utilizzando il 30% di trinciato di mais (silomais) e il rimanente 70% costituito da scotta, acque di vegetazione, sansa denocciolata e letame in diverse proporzioni in modo da ottenere un carico organico variabile tra 2,5 e 5,5 $\text{kg}_{\text{sv}}\text{d}^{-1}$. Sono state impiegate due modalità di trattamento: miscelazione e triturazione con un *cutter*, miscelazione semplice. Le caratteristiche chimiche medie dei costituenti delle miscele alimentate al reattore sono riportate nella Tab.24.

L'ultima colonna riporta anche il rapporto di equivalenza, in base agli SV su tal quale, con riferimento al silomais e considerato uguale a 1 per quest'ultimo. Si può notare come le acque di vegetazione e la scotta siano equivalenti rispettivamente all'11% ed al 16% del silomais, ma la loro funzione risulta molto positiva perché oltre a fornire l'apporto di sostanze più facilmente degradabili, hanno anche la funzione di diluenti dal momento che è stato adottato un processo in condizioni comprese tra umido e semi-secco. Il diagramma ternario riportato nella Fig.21 consente la localizzazione della miscela di alimentazione nel piano in base ai valori di ST, SV e C/N.

La miscela è in media caratterizzata da valori di SV pari al 33,7%, di SV pari al 26,9% e da un rapporto C / N pari a 56,95.

	Carbonio %	Idrogeno %	Azoto %	C/N	Umidità %	ST %	SV %	EQ. Silomais SVtq
Silomais 1	45,09	5,94	0,18	245,2	64,39	35,6	28,69	1
Silomais 2	46,07	6,04	1,45	31,87	64,03	35,96	29,93	0,95
Sansa	49,21	6,25	0,11	462,5	63,89	36,11	30,76	1,04
Scotta	35,23	5,27	1,33	26,45	94,09	5,9	4,74	0,16
Letame	36,95	4,17	2,47	14,94	75,35	24,65	16,11	0,56
Triticale	47,5	6,08	0,97	48,97	75,4	24,6	18,54	0,95
Acque di veg.	42,24	5,27	1,44	29,33	96,00	4,00	3,24	0,11

Tabella 24: Caratteristiche chimiche dei costituenti delle miscele alimentate al reattore.

Le miscele così preparate sono state immesse nella tramoggia di carico. Il rapporto di ricircolo è stato mantenuto al valore di 0,15 reimmettendo il digestato in tramoggia. Campioni della massa di 4-6 kg sono stati prelevati giornalmente dal reattore, mentre campioni della stessa entità, sono stati prelevati, per ciascuna miscela alimentata, dalla tramoggia di carico e dal serbatoio del digestato. I campioni sono stati triturati e omogeneizzati con un *cutter*, essiccati a 105°C in stufa termostatica e poi macinati finemente.

Le procedure operative e di monitoraggio del processo sono quelle descritte nella sezione 4.3.4 del presente documento.

I bilanci di massa e di energia e i calcoli dell'efficienza di conversione energetica sono stati eseguiti secondo la metodologia indicata nella sezione 4.2.5 di questo documento.

L'esperimento è stato avviato inoculando nel reattore 950 kg di digestato proveniente dall'impianto industriale di digestione anaerobica alimentato con trinciato di mais, per fornire un'adeguata popolazione di microrganismi già adattati al trattamento.

Le caratteristiche chimiche dell'inoculo sono mostrate nella Tab.25 mentre nella Tab.26 sono riportati i valori di PCS e PCI sul materiale secco.

	Umidità %	ST %	SV_{ss} %	Ceneri_{ss} %
Inoculo	92,93	7,07	73,76	19,66

Tabella 25: Caratteristiche chimiche dell'inoculo.

Come si può notare sia la sansa sia le acque di vegetazione presentano dei valori di PCS e PCI elevati per via dei residui di olio che le accompagnano. La temperatura del reattore è stata portata gradualmente (2°C d⁻¹) al valore di 40°C ± 0,5°C ed è stata tenuta costante per tutta la durata dell'esperimento.

L'esperimento è stato suddiviso in tre fasi temporali: avvio, fase stazionaria con triturazione, fase stazionaria senza triturazione.

Le ultime due fasi sono state ulteriormente suddivise in due sottofasi. Complessivamente l'impianto di digestione anaerobica è stato sottoposto a monitoraggio per 102 giorni.

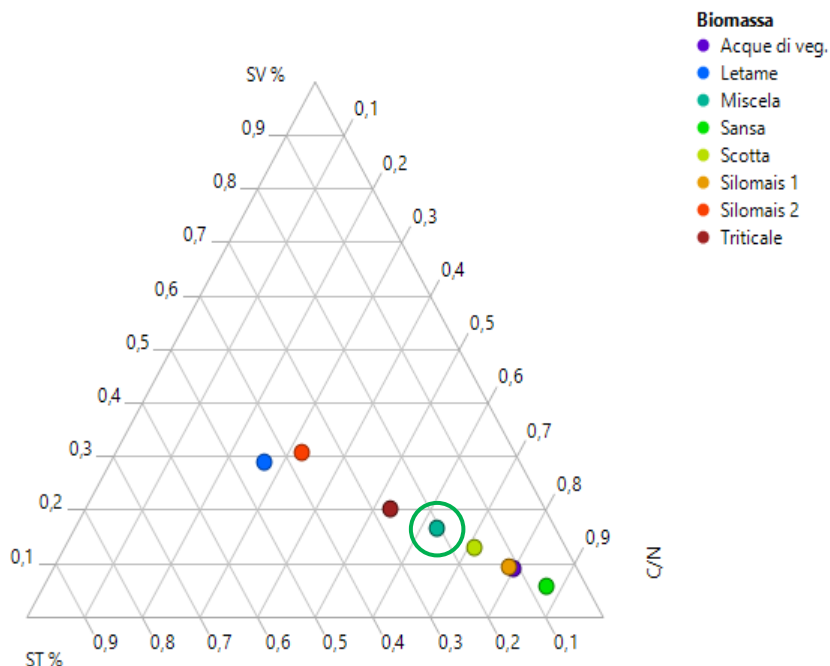


Figura 21: Localizzazione della miscela nel diagramma ternario ST-SV-C/N.

Substrato	PCS MJ·kg _{SS} ⁻¹	PCI MJ·kg _{SS} ⁻¹
Sansa denocciolata	22,71	21,35
Silomais	18,33	17,01
Scotta TQ	13,13	11,96
Acque di vegetazione	17,56	16,40
Letame	14,38	13,45

Tabella 26: Valori del potere calorifico superiore e inferiore per i diversi substrati.

4.6.2 Risultati e discussione

Sono stati determinati settimanalmente i ST all'interno del reattore, per valutare la concentrazione della sostanza organica nel digestore. Sono stati determinati settimanalmente i contenuti di ST e SV nella miscela alimentata per verificare i valori del carico organico previsto e, con la stessa frequenza, nel digestato per valutare l'efficienza di conversione della sostanza organica. I valori medi relativi a tutti i campioni sono mostrati nella Tab.27. La composizione elementare della miscela di alimentazione e del digestato è mostrata nella Tab.28. Il tenore in Carbonio su base secca è mediamente del 47,12% nell'alimentazione e del 42,70% nel digestato, mentre il tenore di Azoto è del 2,3%. Il contenuto di Azoto nel digestato ne suggerisce, ancora una volta, l'uso come ammendante (Albuquerque *et al.*, 2013).

		ST %	SV %	SV/ST %
Miscela di alimentazione	media	11,109	8,936	80,44
	Deviazione Standard	1,632	1,215	2,249
Reattore	media	6,022	4,468	80,730
	Deviazione Standard	0,452	0,407	2,259
Digestato	media	4,191	3,011	80,730
	Deviazione Standard	1,114	0,904	2,207

Tabella 27: Valori di ST e SV nell'alimentazione, nel reattore e nel digestato.

Il contenuto elevato di carbonio residuo ne indica, in linea teorica, un possibile impiego in altri processi di conversione energetica (Kratzeisen *et al.*, 2010). Nella Fig.22 sono riportati gli andamenti dei solidi volatili, nel periodo sperimentale, nell'alimentazione, del reattore e nel digestato, unitamente al tasso percentuale di abbattimento. I SV nell'alimentazione sono variati tra il 7,09% ed il 12,14%, mentre i SV nel digestato tra un minimo del 2,93% ed un massimo del 6,68%. In queste condizioni si riscontra una percentuale di abbattimento media del 66,19 %, con un valore minimo del 50,74% e uno massimo dell'80,51%. La Fig.23 mostra l'andamento dei parametri OLR e portata di alimentazione al reattore. Dopo il carico dell'impianto con il digestato derivante dall'impianto industriale, la fase di avvio si è protratta per 16 giorni, nel corso dei quali si è impiegata una portata di alimentazione fino a 23 kg d⁻¹ ed un OLR intorno a 3,0 kg_{sv} m⁻³ d⁻¹. La prima fase stazionaria è durata 26 giorni nel corso dei quali si è ottenuta la completa sostituzione del materiale inoculato con la miscela, raggiungendo una portata media di 36,6 kg d⁻¹ ed un valore di OLR medio pari a 3,601 kg_{sv} m⁻³ d⁻¹. La seconda fase è durata 20 giorni con una portata media di 47 kg d⁻¹ ed un valore di OLR medio di 4,298 kg_{sv} m⁻³ d⁻¹.

		C/N	C _{ss} %	H _{ss} %	N _{ss} %
Miscela di alimentazione	media	20,48	47,12	5,84	2,30
	Deviazione Standard	-	1,493	0,265	0,438
Digestato	media	12,61	42,70	4,93	3,39
	Deviazione Standard	-	3,351	0,651	0,874

Tabella 28: Composizione elementare della miscela di alimentazione e del digestato.

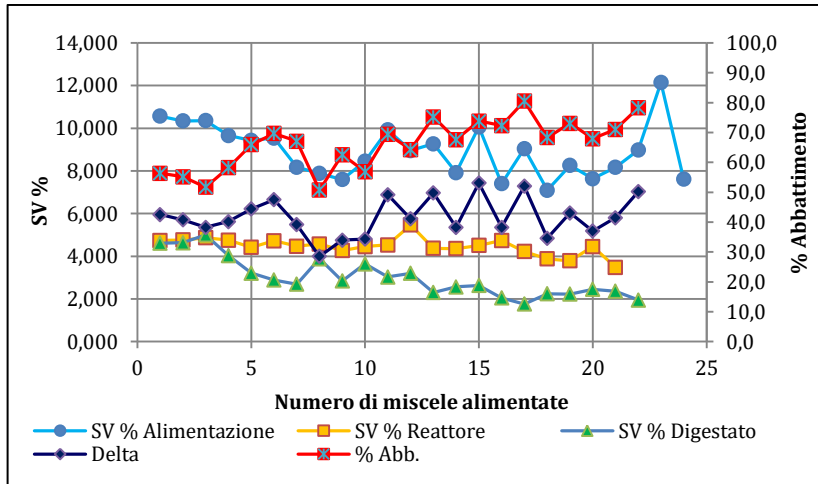


Figura 22: Andamento dei solidi volatili nelle diverse fasi del processo.

La terza fase, nella quale la miscela non è stata triturata, è durata 23 giorni con una portata media di 42 kg d^{-1} ed un OLR medio di $3,438 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. E' seguita poi un'ultima fase della durata di 17 giorni, nella quale, date le ampie oscillazioni del parametro FOS/TAC (Fig.24), peraltro sempre con valori inferiori al limite di 0,40 indicato come massimo per la stabilità del processo (Lossie *et al.*, 2008), la portata media è stata ridotta intorno ai 32 kg d^{-1} con un OLR intorno ai $3,14 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

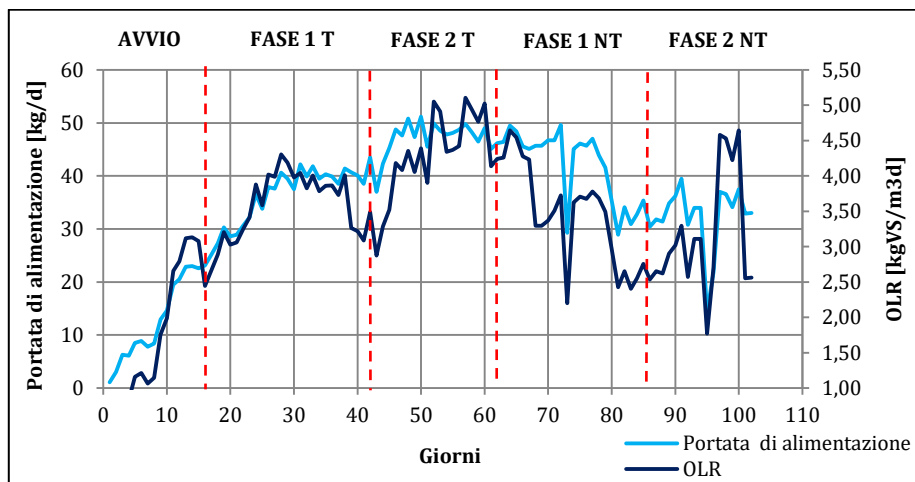


Figura 23: Andamento della portata di alimentazione al reattore e del carico organico.

Si può dire comunque che valori di OLR intorno a $3,50 \text{ kg}_{\text{sv}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ siano perfettamente adeguati per il trattamento di questo substrato. Nella Fig.25a-b è mostrato l'andamento della portata e della produzione specifica di biogas e di metano, mentre nella Fig.26a-b quello della composizione del biogas. Il contenuto in metano è sempre stato superiore al 50%, con un valore medio del 54,53% (Fig.26). La concentrazione di H_2S si è mantenuta sempre a valori inferiori a 250 ppm, con la gran parte delle rilevazioni inferiori a 200 ppm, mentre la concentrazione di NH_3 è sempre stata inferiore a 150 ppm (Fig.27).

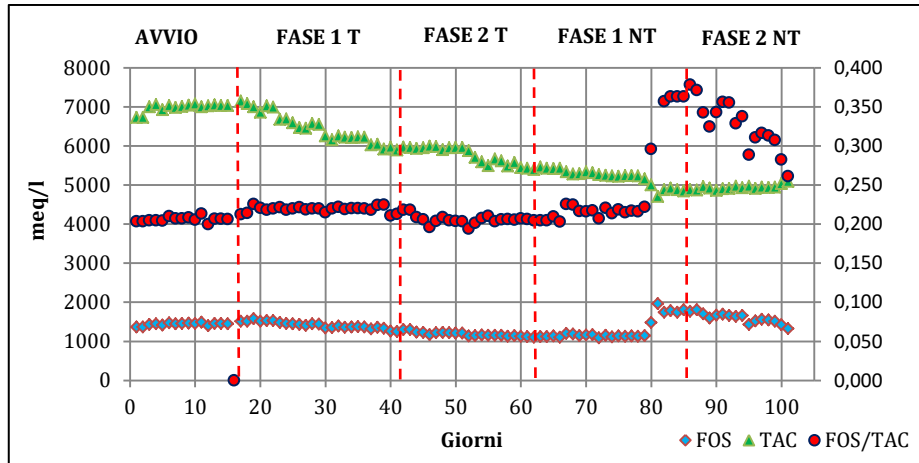
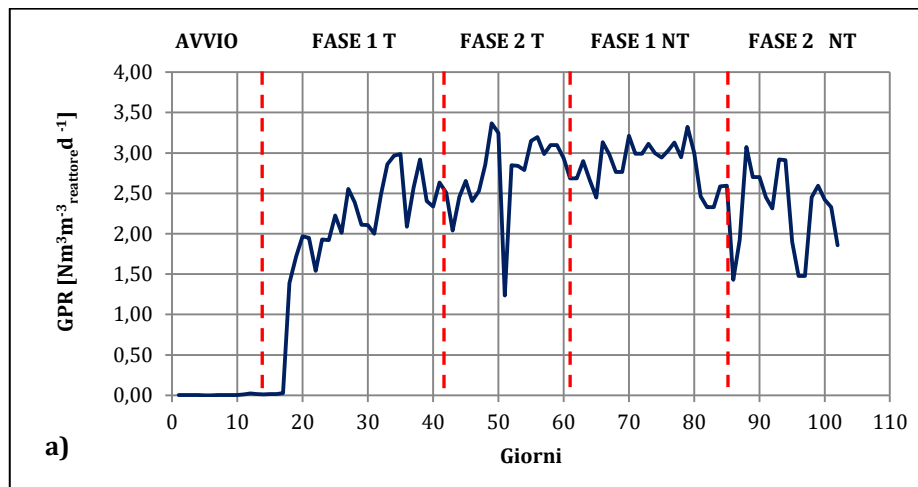
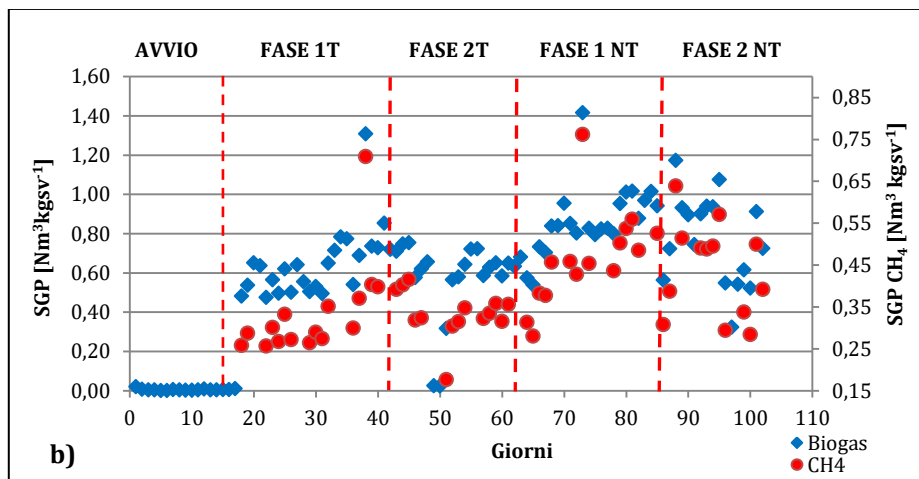


Figura 24: Andamento dei parametri FOS, TAC e FOS/TAC.



a)



b)

Figura 25: a) Tasso di produzione del biogas, b) Produzione specifica del biogas.

Il tasso di produzione di biogas e metano è stato molto basso per i primi 16 giorni per portarsi poi su valori compresi tra 2,5 e 3,0 $\text{Nm}^3 \text{m}^{-3} \text{reattore} \text{d}^{-1}$ tra il 17° e il 42° giorno. E' poi rimasto pressoché costante nel corso delle Fasi 2T e 1NT (43°-85° giorno), mentre nella fase 2NT è sceso a valori inferiori ai 2 $\text{Nm}^3 \text{m}^{-3} \text{reattore} \text{d}^{-1}$. In accordo con questi dati, dall'81° giorno il FOS/TAC è variato notevolmente rispetto ai giorni precedenti portandosi fino ad un valore massimo di 0,417, ma mantenendosi su valori costantemente superiori a 0,3, mentre nei giorni precedenti era intorno 0,22. Questo sembra indicare che con la tipologia del substrato impiegato, i valori indici della stabilità del processo, siano decisamente più bassi rispetto a quanto riportato nella letteratura (Lossie *et al.*, 2008).

La fase 1NT ha mostrato il valore di GPR medio più elevato con 2,739 $\text{Nm}^3 \text{d}^{-1}$, risultando anche complessivamente la più stabile. Si nota un valore di FOS/TAC più elevato rispetto alle tre fasi differenti, ma questo è da imputare alle ampie oscillazioni rilevate dall'81° giorno. Gli stessi risultati sono stati osservati per la produzione di metano che ha raggiunto nella fase 1NT il valore di 1,48 $\text{Nm}^3 \text{d}^{-1}$.

Il contenuto medio di metano nel biogas è stato del 56,09% durante la fase di avvio, del 54,08% e del 54,45% nelle fasi 1T e 2T, del 53,93% e del 53,99% nelle fasi 1NT e 2NT. Dal punto di vista della conversione energetica la stabilità nella composizione del biogas rappresenta un aspetto certamente positivo. La SGP del biogas è stata di 0,86 $\text{Nm}^3 \text{kg}_{\text{sv}}^{-1}$ nel corso della fase 1NT e rappresenta il valore maggiore rilevato. La SGP media per il metano è stata di 0,464 $\text{Nm}^3 \text{kg}_{\text{sv}}^{-1}$ nella fase 1NT e rappresenta anche in questo caso il valore maggiore misurato.

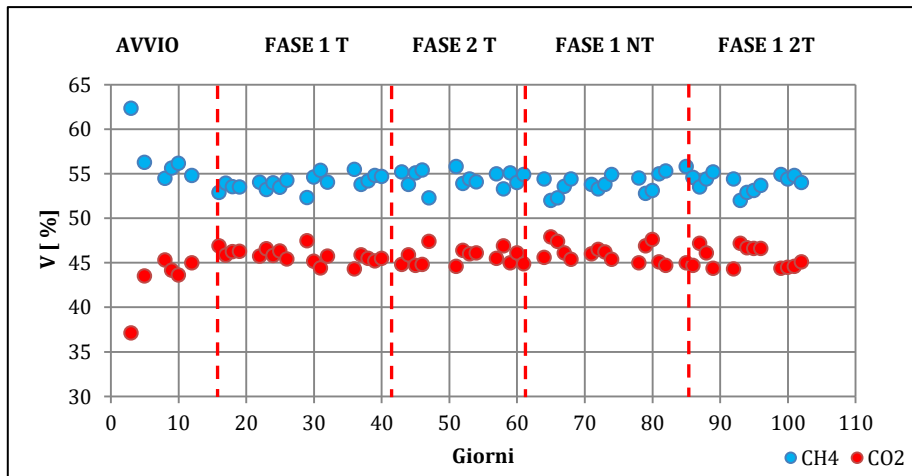
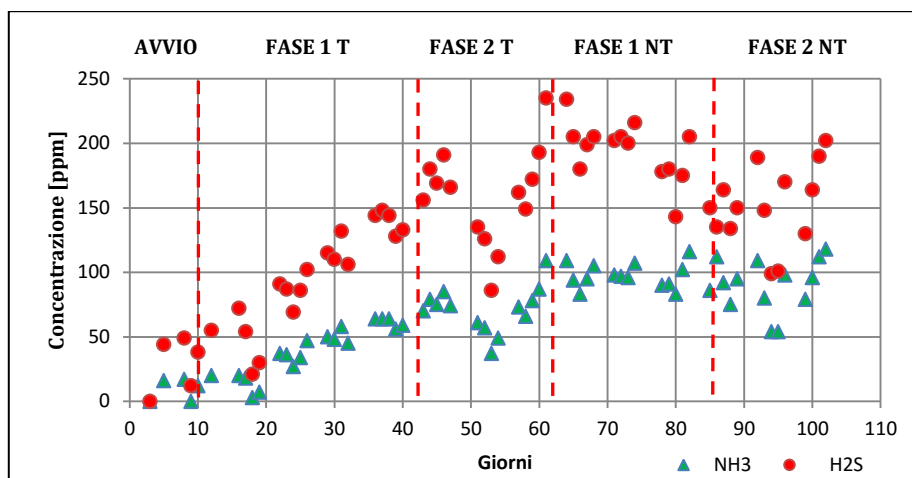


Figura 26: Composizione del biogas.

Nella Tab.29 sono riassunti i principali parametri di processo unitamente alle prestazioni ottenute con l'impianto pilota. Osservando i valori di carico organico applicato si nota come le migliori condizioni produttive si abbiano con un valore intorno a 3,5 $\text{kg}_{\text{sv}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$, valori inferiori determinano una certa diminuzione del GPR, mentre valori superiori sono responsabili di forti oscillazioni nel parametro FOS/TAC con notevoli ripercussioni sulla stabilità del processo. Il calcolo dell'efficienza di conversione netta $\eta_{\text{AD,N}}$ mostra che il processo di digestione anaerobica in condizioni di mesofilia della miscela combinata è in grado di convertire il 64% circa dell'energia del substrato in energia del biogas (Fig.28). Questo è in accordo con il tasso di abbattimento percentuale medio riscontrato per gli SV.

Figura 27: Concentrazione di NH₃ e H₂S.

		Avvio Giorni 1-16	Fase 1T Giorni 17-42	Fase 2T Giorni 43-62	Fase 1 NT Giorni 63-85	Fase 2 NT Giorni 85-102
OLR kg _{sv} ·m ⁻³ d ⁻¹	Media	1,738	3,601	4,298	3,438	3,14
	Deviazione standard	1,01	0,447	0,595	0,703	0,847
FOS/TAC	Media	0,206	0,219	0,205	0,251	0,326
	Deviazione standard	0,003	0,003	0,005	0,06	0,03
GPR Biogas Nm ³ d ⁻¹	Media	0,007	2,176	2,337	2,739	2,290
	Deviazione standard	0,006	0,813	0,877	0,269	0,505
GPR CH₄ Nm ³ d ⁻¹	Media	0,0043	1,103	1,365	1,480	1,189
	Deviazione standard	0,004	0,517	0,253	0,141	0,280
CH₄ %	Media	56,09	54,08	54,45	53,93	53,99
	Deviazione standard	2,996	0,78	0,946	1,106	0,917
SGP Biogas Nm ³ kg _{sv} ⁻¹	Media	0,005	0,623	0,562	0,860	0,768
	Deviazione standard	0,004	0,212	0,211	0,177	0,227
SGP CH₄ Nm ³ kg _{sv} ⁻¹	Media	0,0004	0,281	0,330	0,464	0,438
	Deviazione standard	0,0009	0,160	0,201	0,114	0,096

Tabella 29: Principali parametri di processo e prestazioni ottenute.

Le equazioni (23) e (24) impiegate per la, η_{AD} e la $\eta_{AD,N}$ sono rispettivamente:

$$\eta_{AD} = 44,77 \cdot \text{EXP}(0,001137 \cdot d) - 101,79 \cdot \text{EXP}(-0,0467436) \cdot d \quad (23)$$

$$\eta_{AD,N} = 53,22 \cdot \text{EXP}(0,001674 \cdot d) - 268,698 \cdot \text{EXP}(-0,0467436) \cdot d \quad (24)$$

La sintesi della stima per entrambe le variabili è riportata nella Tab.30. I risultati confermano il buon accordo con i dati sperimentali. Tuttavia si può notare come le curve di efficienza energetica presentino un andamento differente da quelle ottenute per i FVR, i residui solidi delle patate e la miscela combinata di reflui liquidi chips e patate di scarto. In questo caso, infatti, l'efficienza di conversione energetica è pari a 0 o comunque a valori inferiori al 2 % per almeno 20 giorni. Questo è dovuto a una produzione di biogas pressoché nulla per almeno 18 giorni, come confermato dall'andamento del GPR riportato nella Fig.25a.

Il sistema mostra una fase di latenza prolungata, probabilmente dovuta ai tempi di adattamento alle condizioni di processo dei microrganismi, che si protrae per un lungo periodo di tempo, trascorso il quale la produzione di biogas si incrementa con una notevole velocità.

	SSE	MSE	RMSE	R-quadro
η_{AD}	5,01177	1,00235	1,00117	0,99705
$\eta_{AD,N}$	4,502093	0,900419	0,948904	0,996515

Tabella 30: Sintesi della stima.

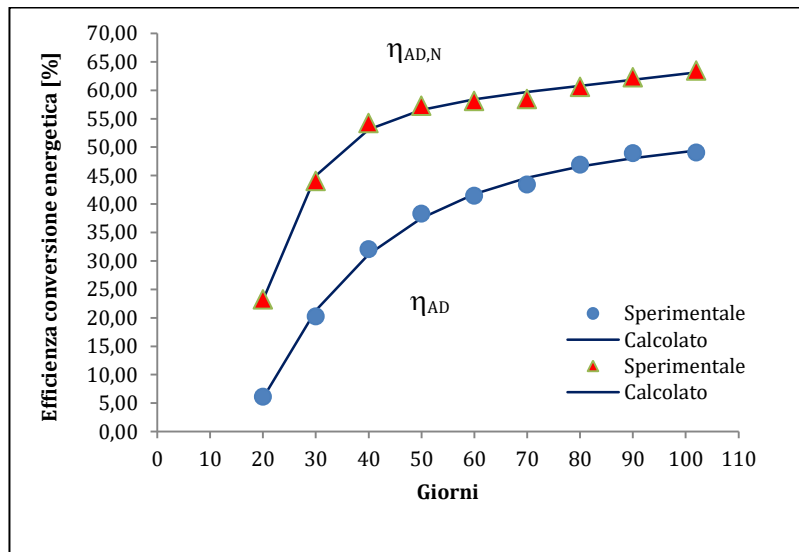


Figura 28: Efficienza di conversione energetica.

Poiché sono state condotte prove sia in condizioni di triturazione della miscela di alimentazione sia sulla miscela tal quale (condizione dell'impianto industriale), è stata eseguita un'analisi della varianza per valutare l'eventuale effetto di questo trattamento. Nella Fig.29 è riportato il GPR, suddiviso per miscele triturate e non, nel corso di tutto l'esperimento, mentre nella Fig.30 è riportata la distribuzione per classi di portata del biogas.

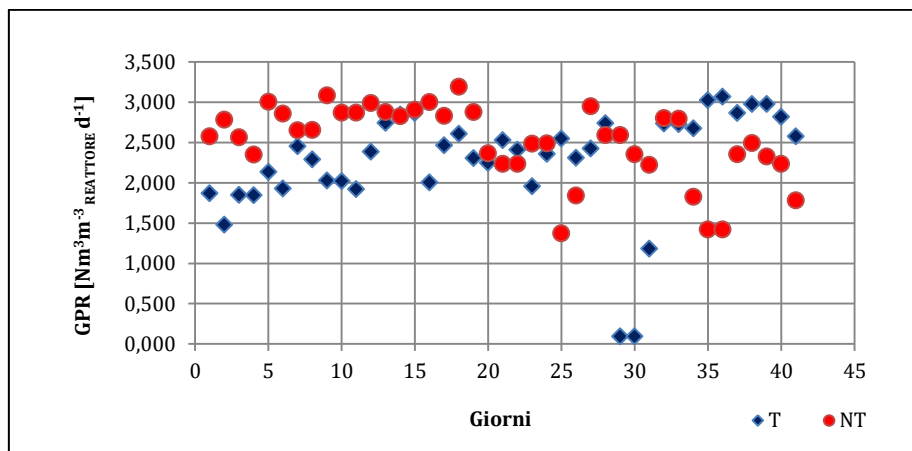


Figura 29: Tasso di produzione di biogas in condizioni di triturazione e non.

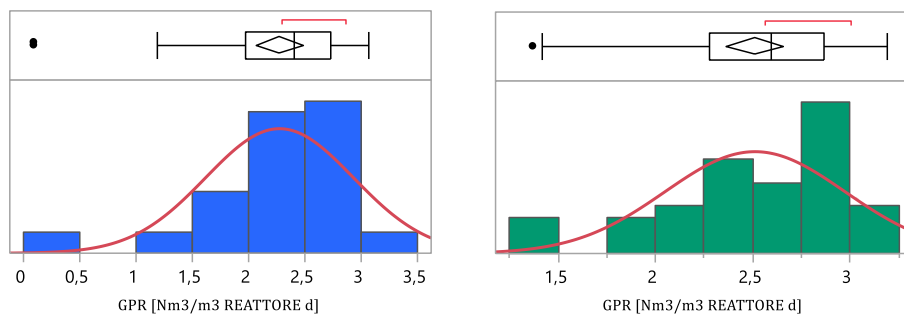


Figura 30: Distribuzione del GPR per classi di portata a) con triturazione, b) senza triturazione.

Nella Tab.31, infine sono riportati i dati relativi all'analisi della varianza ad un fattore.

SQ	Gdl	MQ	F	Valore di significatività	F critico
1,11492	1	1,11492	3,43271	0,06760	3,96035
25,98349	80	0,32479			
27,09841	81				

Tabella 31: Risultati dell'analisi della varianza ad un fattore.

I risultati non consentono di affermare se ci sia una reale differenza tra la produzione di biogas con o senza triturazione e se l'operazione di triturazione rappresenti un reale vantaggio, con questa miscela di substrati, per il processo di digestione anaerobica. Tuttavia, come si vedrà più avanti, con l'analisi discriminante lineare, le Fasi 1T e 2T e le Fasi 1NT e 2NT risultano nettamente distinte, anche se questo non fornisce alcuna informazione sulla differenza tra le produttività di biogas.

Nella Tab.32, infine è eseguito un confronto tra le prestazioni dell'impianto pilota e quelle di un impianto industriale, dotato di un co-generatore della potenza di 1 MW, alimentato con la stessa miscela di biomasse impiegata per le prove sperimentali. Il confronto è anche illustrato graficamente nella Fig.31, considerando per l'impianto pilota la sola Fase 3.

	Impianto Industriale	Fase 1 (Avvio)	Fase 2 (1T+ 2T)	Fase 3 (1 NT+ 2NT)
Portata di alimentazione [t d ⁻¹]	50	0,0366	0,047	0,042
Portata dei Solidi Volatili [kg d ⁻¹]	14.350	3,457	4,126	3,3
OLR [kg _{sv} m ⁻³ d ⁻¹]	1,993	3,601	4,298	3,438
HRT [d]	58	26	20	23
Produzione Biogas [Nm ³ d ⁻¹]	11.808	2,176	2,337	2,739
GPR [Nm ³ m ⁻³ reattore *d ⁻¹]	1,64	2,266	2,434	2,846
SGP Biogas [Nm ³ kg _{sv} ⁻¹]	0,823	0,623	0,562	0,86
SGP CH₄ [Nm ³ kg _{sv} ⁻¹]	0,412	0,281	0,33	0,464

Tabella 32: Confronto delle prestazioni dell'impianto industriale e dell'impianto pilota.

Per quanto concerne l'OLR, l'impianto industriale impiega un carico organico nettamente inferiore a quello impiegato su scala pilota. Infatti, il tempo di permanenza impiegato nell'impianto industriale è molto più lungo rispetto a quello impiegato su scala pilota. Il tasso di produzione del biogas (Nm³ m⁻³ reattore *d⁻¹) è molto superiore su scala pilota (dal 38% al 75%). La produzione specifica di biogas è più elevata, su scala pilota, soprattutto nella fase senza triturazione (Fase 3), mentre è inferiore nelle altre fasi (avvio, Fase 2). La stessa situazione si osserva per la produzione specifica di metano. Il dato più interessante riguarda il tempo di permanenza e di conseguenza il volume del reattore industriale che appare sicuramente sovradimensionato rispetto alle esigenze di processo.

Infatti, se si prende in considerazione il tempo più lungo osservato sperimentalmente (26 giorni) se ne deduce agevolmente che il volume del reattore industriale dovrebbe essere ridotto di almeno il 50 %, senza considerare il possibile incremento di OLR. Se si considera il tempo di permanenza minimo rilevato su scala sperimentale, si può giungere a un ridimensionamento del 60%, sempre senza considerare il possibile incremento dell'OLR.

Tenendo conto che la gran parte degli impianti di DA della regione è costruita con i medesimi criteri di quello in studio, è possibile ipotizzare, con questa miscela di substrati, un ridimensionamento analogo per giungere a una razionalizzazione completa degli impianti stessi (azione che peraltro qualche gestore di impianto ha incominciato ad intraprendere).

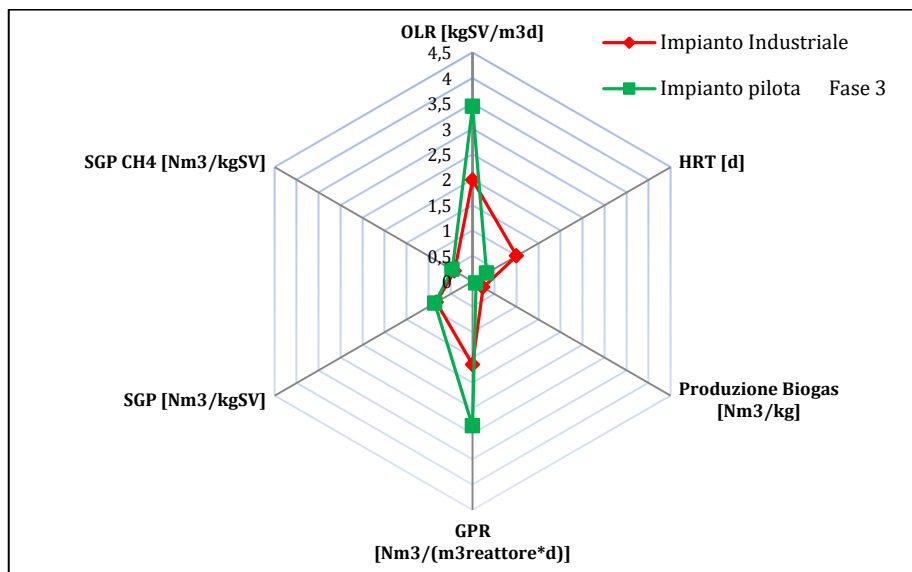


Figura 31: Confronto delle prestazioni dell'impianto industriale con quelle dell'impianto pilota nella Fase 3.

4.7 L'applicazione di tecniche statistiche multivariate per l'analisi del processo

L'analisi delle componenti principali (ACP) è una tecnica statistica multivariata comunemente applicata per trasformare un insieme di dati contenenti variabili correlate e incorrelate tra loro in un numero ridotto di variabili incorrelate tra loro e definite componenti principali.

L'analisi discriminante lineare (ADL) è una tecnica di classificazione multivariata che trasforma un insieme di dati in uno spazio di dimensioni inferiori e che ne permette la separazione in gruppi massimizzando la varianza tra i gruppi, ma minimizzando la varianza all'interno dei gruppi stessi.

La prima componente principale è una combinazione lineare di tutte le variabili della matrice di dati che spiega la maggior parte della varianza dei dati, mentre le altre componenti principali ne spiegano la massima parte rimanente.

LaACP è stata applicata in diversi lavori sulla digestione anaerobica con scopi diversi quali: il rilevamento del raggiungimento dello stato stazionario in processi di digestione anaerobica (Ruiz *et al.*, 2005), il monitoraggio del processo (Indriawati *et al.*, 2012), l'analisi di alcuni dati chimici e fisici quali pH, ST, acidi grassi volatili, alcalinità, produzione di biogas, ammoniaca e metano (Ros *et al.*, 2013), integrazione con tecniche di spettroscopia nel vicino infrarosso (NIR) per il monitoraggio del processo (Reed *et al.*, 2013, Pervin *et al.*, 2013), la valutazione degli effetti degli acidi grassi volatili sui batteri metanogenici (Franke-Whittle *et al.*, 2014), la valutazione dell'importanza per il

processo di alcuni elementi minerali (Li *et al.*, 2014), lo studio degli effetti dell'ammoniaca nella sanificazione dei fanghi (Scaglia *et al.*, 2014).

L'analisi discriminante lineare (ADL) e la ACP sono state anche impiegate per il monitoraggio della fase avvio di un digestore anaerobico pilota (Brambilla *et al.*, 2012). Tuttavia nessuno studio ha preso in considerazione contemporaneamente tutte le variabili necessarie alla gestione dei reattori e indici della stabilità di processo.

Nelle analisi successive sono state impiegate tredici variabili U%, ST%, SV%, OLR, pH, FOS, TAC, rapporto FOS/TAC, CH₄%, CO₂%, GPR_Biogás, GPR_CH₄, SGP_CH₄, impiegate nel corso di tutta l'attività sperimentale.

La matrice dei dati è stata prima standardizzata e poi sono stati costruiti i *biplots* utilizzando i *loadings* e gli *scores* derivanti dalla ACP, impiegando le prime due componenti principali. I *loadings* consistono nelle variabili prescelte, mentre gli *scores* sono relativi ai giorni di operatività dell'impianto pilota. I *biplots* hanno permesso di interpretare le relazioni tra le diverse variabili (Gabriel *et al.*, 1971). Tutte le analisi statistiche sono state eseguite impiegando il software GenStat (VSN International GenStat per Windows 16^a edizione, 2013) e R, un ambiente software per la statistica e la grafica (R core Team, 2013).

L'analisi discriminante lineare è stata applicata fundamentalmente per individuare eventuali differenze nelle diverse fasi nel trattamento di frutta e vegetali e nel trattamento delle miscele sostitutive del silomais.

La Tab.33 mostra il risultato della *cross-validation* delle 4 fasi considerate nell'analisi ADL delle quattro fasi individuate nel corso della digestione anaerobica delle miscele di frutta e vegetali (par.4.2).

La percentuale di riconoscimento delle fasi considerate è stata soddisfacente soprattutto per la prima e l'ultima fase del periodo sperimentale (10% di classificazione corretta). La seconda fase ha mostrato una percentuale di riconoscimento inferiore (82,4%) dovuta a 5 casi classificati erroneamente ed attribuiti alla Fase 3 e uno alla Fase 1. Una classificazione superiore è stata ottenuta per la Fase 1 (93,8% di classificazione corretta) nella quale solamente 2 casi relativi alla fase di Avvio sono stati classificati erroneamente. La Fig.32 mostra come i 4 gruppi siano distinti chiaramente. In particolare la Funzione 1, rappresentata dall'asse orizzontale, discrimina tra la fase di Avvio, la Fase 1 e la Fase 2, mentre la Funzione 2, rappresentata dall'asse verticale, discrimina tra la Fase 2 e la Fase 3.

Questi risultati sono spiegati dalla tipologia di substrato alimentata all'impianto pilota. Nelle prime fasi sono stati predominanti i vegetali (circa il 70% del totale), mentre nell'ultima fase è stata rilevante la percentuale di frutta (circa il 60%).

I risultati della ADL confermano che nel corso dell'esperimento si possono identificare quattro fasi distinte dovute sostanzialmente alla composizione delle biomasse residuali. Infatti, l'ultima fase, nella quale i residui presentano una quantità molto elevata di frutta, è differente da quelle nei quali è invece presente una quantità elevata di vegetali. Poiché le prestazioni energetiche di un processo di digestione anaerobica sono largamente influenzate dalla composizione del substrato alimentato, è molto importante tenere conto di questo fatto nella progettazione e nella gestione degli impianti. La Fig.33 è relativa all'analisi condotta per gli esperimenti condotti con e senza triturazione delle miscele di silomais con altre biomasse residuali.

Come si può notare sia la fase di avvio sia le due fasi (per un totale di quattro periodi) con e senza triturazione risultano nettamente distinte, indicando due trattamenti complessivamente differenti sulla base delle 13 variabili prese in considerazione.

Questo naturalmente non consente di affermare quale delle due fasi sia migliore o peggiore dal punto di vista delle prestazioni energetiche dell'impianto e se effettivamente sia proficuo o meno condurre l'operazione di triturazione.

Gruppo calcolato	Avvio	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Numero
Gruppo attuale					
Avvio	41 (100%)	0	0	0	41
Fase 1	2	30 (93,8%)	0	0	32
Fase 2	0	1	28 (82,4%)	5	34
Fase 3	0	0	0	40 (100%)	40
Numero	43	31	28	45	147

Tabella 33: Cross-validation delle quattro fasi.

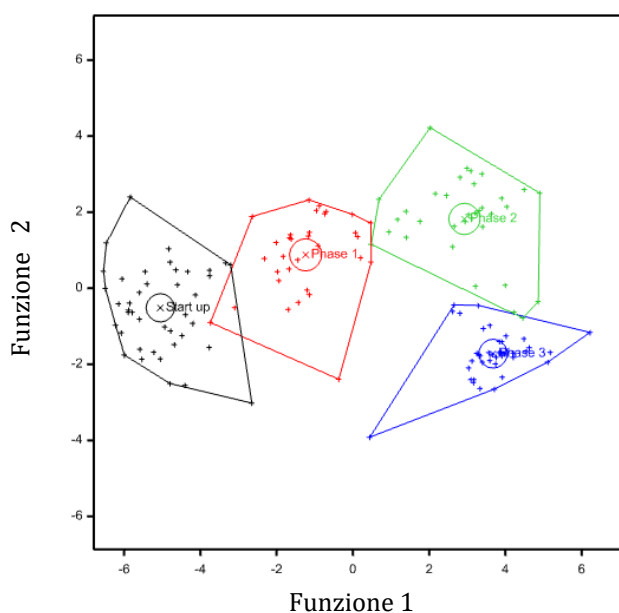


Figura 32: Proiezione delle fasi in monitoraggio nel piano descritto dalle due funzioni discriminanti per gli FVR.

Anche se osservando i dati della Tab.32 si può notare come le prestazioni dell'impianto pilota siano uguali o superiori a quelle dell'impianto industriale solamente nella fase nella quale non è condotta la triturazione.

I *biplots* delle prime due componenti principali di tutte le 13 variabili monitorate (*loadings*) e dei giorni di esercizio dell'impianto pilota (*scores*) per tutti i substrati trattati (FVR, patate, miscele combinate, miscele di silomais con altre biomasse residuali) sono riportati nella Fig.34a-d. I *biplots* mostrano che la produzione di metano (GPR_{CH₄}) è altamente correlata con i solidi totali (ST%) e i solidi volatili SV%.

Il tasso di produzione del biogas (GPR_{Biogas}) e il carico organico (OLR) sono strettamente correlati con gli ST% e gli SV%. Il rapporto tra gli acidi organici volatili e la capacità tampone alcalina (FOS/TAC) sono molto correlati con gli acidi organici volatili (FOS). Valori di FOS/TAC compresi tra 0,3 e 0,4 sono in generale associati con

elevati valori di SGP_{CH_4} e GPR_{CH_4} , mentre valori elevati del FOS/TAC sono associati con un'elevata produzione di CO_2 (Lossie *et al.* 2008).

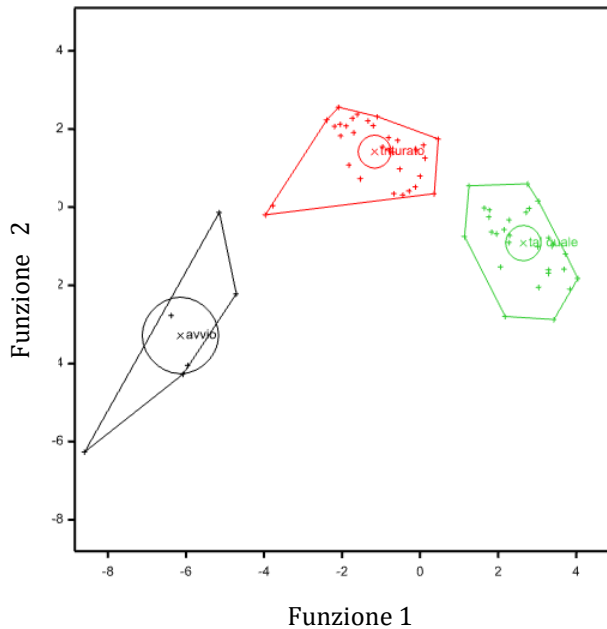


Fig.33: Proiezione delle fasi in monitoraggio nel piano descritto dalle due funzioni discriminanti per le miscele di silomais e biomasse residuali.

Per quasi tutti i substrati il FOS/TAC è influenzato fondamentalmente dal FOS che risulta altamente correlato con esso, piuttosto che dal parametro TAC che risulta in tutti gli esperimenti sempre abbastanza costante. Nel caso delle miscele di silomais con le biomasse residuali, la correlazione è minore, ma in questo caso è stato mantenuto un rapporto FOS/TAC piuttosto basso (circa 0,210) per cui l'effetto del FOS è risultato inferiore. Elevati valori di FOS sono comunque associati con bassi valori di SGP_{CH_4} e GPR_{CH_4} . La percentuale di metano ($CH_4\%$) è sempre correlata negativamente alla percentuale di anidride carbonica ($CO_2\%$) e sembra non essere dipendente dal GPR_{CH_4} . Il parametro OLR è correlato positivamente con GPR_{Biogas} , GPR_{CH_4} e $CO_2\%$, mentre è correlato negativamente con $CH_4\%$.

Il pH è fortemente correlato con il TAC che esprime la capacità tampone del sistema, mentre è correlato negativamente con il FOS/TAC.

I risultati della PCA hanno permesso di identificare chiaramente le variabili più significative dal punto di vista del processo che sono rappresentate da SV e OLR. La variabile SV è legata direttamente alla sostanza organica convertibile in biogas, ma anche la composizione risulta molto importante. Infatti se nella composizione del substrato sono presenti sostanze facilmente degradabili si ha la produzione di biogas con elevate percentuali di CO_2 .

Si ha inoltre un incremento della pressione del reattore e si nota la formazione di schiume. L'OLR è strettamente connesso agli SV e rappresenta l'ammontare di questi ultimi alimentato giornalmente al reattore: un incremento nell'OLR determina un incremento degli SV e di conseguenza un aumento nella produzione di biogas.

E' pertanto necessario applicare valori di OLR ben studiati per ottimizzare le prestazioni del processo di digestione anaerobica.

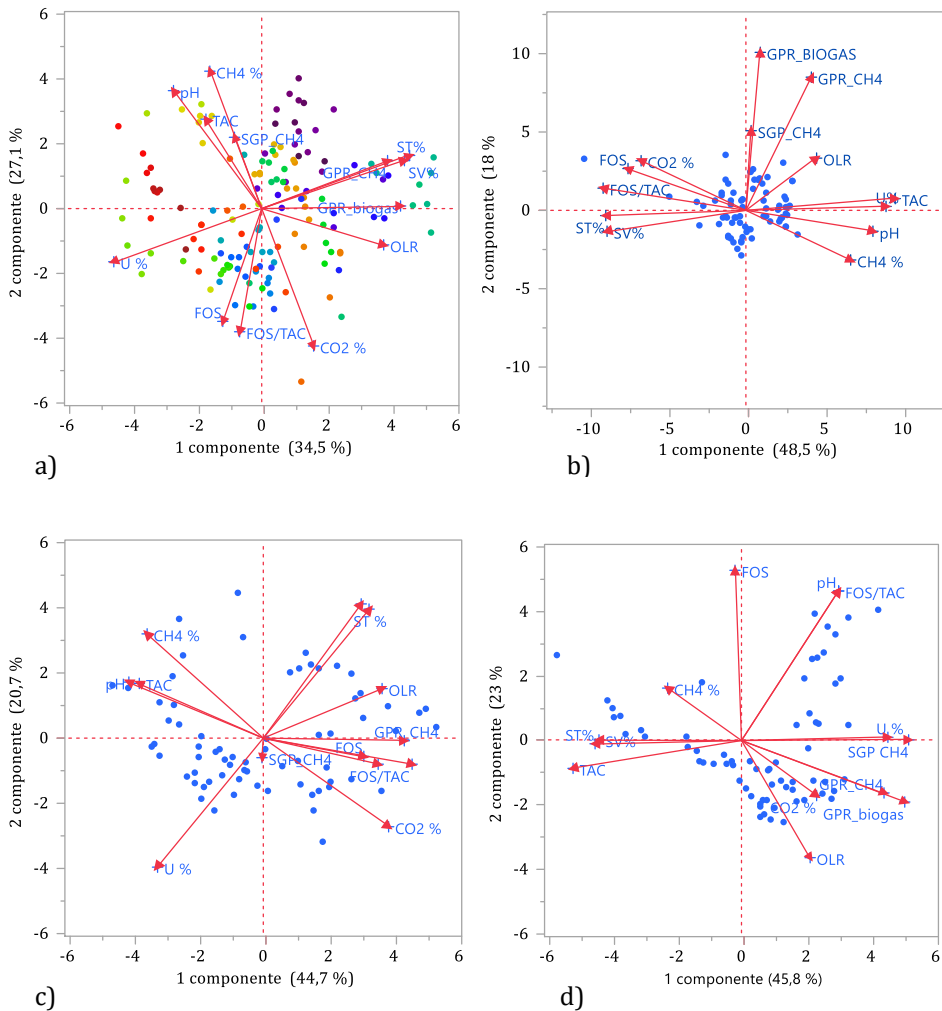


Figura 34: *Biplots* relativi ai diversi substrati, a) FVR, b) Patate, c) Residui industria patate, d) Miscela di silomais con biomasse residuali.

La risposta del processo alle variabili in ingresso al sistema è data dalle variabili in uscita rappresentate da FOS/TAC, GPR_Biogas, GPR_CH₄, CO₂%. Infatti gli incrementi del rapporti FOS/TAC sono associati con gli incrementi dell'OLR e con elevati valori di CO₂. La degradazione degli SV determina una rapida produzione di acidi grassi volatili e quindi un incremento del parametro FOS ed una forte produzione di CO₂.

La percentuale di CO₂, confrontata con la concentrazione di CH₄, aumenta se gli SV sono costituiti da sostanze facilmente degradabili quali gli zuccheri con particolare riferimento a quelli semplici.

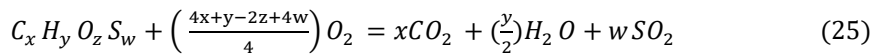
In base a queste considerazioni, le variabili maggiormente significative per il processo di digestione anaerobica sembrano essere l'OLR, il FOS/TAC e il GPR_Biogas.

Tuttavia un monitoraggio appropriato del processo richiede la determinazione della composizione del biogas per ottimizzare il processo di digestione anaerobica e interpretare l'andamento delle variabili più importanti coinvolte.

4.8 Previsione della composizione dei prodotti di combustione del biogas

L'impiego dei residui agricoli e agro-industriali per l'alimentazione degli impianti di digestione anaerobica ha certamente un impatto positivo sull'economia del processo, ma è anche importante considerare l'impatto ambientale dei gas emessi nella combustione del biogas. Si manifesta quindi l'esigenza di prevedere la composizione dei fumi di combustione del biogas sia per un corretto dimensionamento dei digestori che per minimizzarne l'impatto ambientale. In questo lavoro, per ottenere informazioni sulla composizione dei fumi di combustione del biogas, proveniente dalla digestione anaerobica dei substrati relativi agli esperimenti descritti in precedenza, è stato utilizzato l'approccio dell'analisi all'equilibrio termodinamico, impiegando per le simulazioni il software CEA (*Chemical Equilibrium with applications*), pubblicato dalla NASA nel 1996 (Mc Bride *et al.* 1994,1996).

Sono stati considerati l'equazione chimica generale per la combustione completa (25) e il rapporto combustibile/aria ϕ (26).



$$\phi = \frac{\frac{f}{a}}{\left(\frac{f}{a} \right)_{stech}} \quad (26)$$

Nella quale $\frac{f}{a}$ indica il rapporto aria/combustibile, mentre il rapporto a pedice identifica la stessa grandezza in condizioni stechiometriche.

I dati in ingresso al programma di simulazione sono stati la composizione del biogas, misurata con l'impiego di quattro substrati differenti e il rapporto aria/combustibile variabile tra quello stechiometrico e il 100% di eccesso di aria. L'obiettivo è stato quello di determinare le condizioni ottimali di combustione.

I dati relativi alla composizione del biogas espressa in percentuale in massa sono riportati nella Tab.34 per i diversi substrati alimentati al reattore. I risultati per il monossido di carbonio, il diossido di Carbonio, l'ossido di Azoto e il diossido di Zolfo sono riportati nelle Tabb.35-38. Si fa comunque notare come la quantità di tutte queste sostanze nei fumi di combustione sia fortemente condizionata dal tempo di reazione e quindi la concentrazione all'equilibrio è indicativa, ma non rappresentativa della loro reale concentrazione. Tuttavia essa rappresenta comunque un'informazione preliminare sull'andamento del processo di combustione del biogas.

Il rapporto di equivalenza ottimale è compreso tra 0,85 e 0,89, corrispondente a un eccesso d'aria compreso tra il 12% e il 17%. Si può osservare come i valori più elevati per la CO_2 si registrino per i residui delle patate, mentre i valori minori per i residui della trasformazione industriale delle patate.

Per il CO i valori inferiori si rilevano per i residui delle patate, mentre quelli maggiori per i residui della lavorazione industriale delle patate.

	FVR	Residui di patate	Residui industria delle Patate	Miscele silomais
CH₄ [% P/P]	54,1325	54,6879	58,5618	54,4372
CO₂ [% P/P]	45,1768	45,0900	40,9335	45,1978
O₂ [% P/P]	0,1990	0,0930	0,0996	0,2074
NH₃ [% P/P]	0,0985	-	0,0014	0,0469
H₂S [% P/P]	0,3931	0,1290	0,4037	0,1107
H₂O [% P/P]	0,0001	0,0001	0,0001	-
PCI Biogas MJ Nm ⁻³	27,33	27,49	29,22	27,43

Tabella 34: Composizione e potere calorifico del biogas dei diversi substrati.

Φ	FVR			
	CO ₂	CO	NO	SO ₂
	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³
0,50	126	0	0,830	0,443
0,67	164	0,048	2,269	0,599
0,77	186	0,306	3,101	0,673
0,80	193	0,505	3,258	0,698
0,83	199	0,855	3,363	0,723
0,85	203	1,123	3,383	0,722
0,87	206	1,495	3,354	0,748
0,89	209	1,983	3,300	0,747
0,91	212	2,645	3,170	0,773
0,93	215	3,572	2,992	0,772
0,95	217	4,880	2,726	0,797
0,98	219	7,263	2,274	0,796
1	218	9,644	1,887	0,822

Tabella 35: Concentrazione degli inquinanti nei fumi di combustione del biogas derivato da FVR.

Ø	Residui di patate			
	CO ₂	CO	NO	SO ₂
	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³
0,50	154	0	0,946	0,158
0,67	190	0,044	2,426	0,203
0,77	211	0,278	3,197	0,222
0,80	217	0,457	3,343	0,220
0,83	224	0,770	3,409	0,244
0,85	227	1,020	3,414	0,243
0,87	230	1,352	3,382	0,242
0,89	233	1,776	3,300	0,240
0,91	236	2,373	3,169	0,239
0,93	239	3,194	2,965	0,264
0,95	241	4,349	2,690	0,262
0,98	242	6,449	2,232	0,260
1	241	8,553	1,845	0,259

Tabella 36: Concentrazione degli inquinanti nei fumi di combustione del biogas derivato da residui di patate.

Ø	Residui industria delle patate			
	CO ₂	CO	NO	SO ₂
	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³
0,50	122	0	0,850	0,440
0,67	159	0,048	2,333	0,572
0,77	180	0,318	3,177	0,646
0,80	186	0,528	3,346	0,645
0,83	192	0,878	3,451	0,670
0,85	196	1,158	3,459	0,696
0,87	199	1,542	3,442	0,695
0,89	202	2,030	3,375	0,721
0,91	205	2,715	3,258	0,720
0,93	207	3,654	3,067	0,745
0,95	209	4,985	2,789	0,744
0,98	211	7,391	2,337	0,770
1	210	9,784	1,950	0,769

Tabella 37: Concentrazione degli inquinanti nei fumi di combustione del biogas derivato da residui dell'industria delle patate.

ϕ	Miscele di silomais con biomasse residuali			
	CO ₂	CO	NO	SO ₂
	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³	g Nm ⁻³
0,50	126	0	0,824	0,137
0,67	164	0,048	2,281	0,163
0,77	187	0,306	3,101	0,188
0,80	193	0,517	3,270	0,188
0,83	199	0,867	3,363	0,188
0,85	203	1,135	3,383	0,214
0,87	206	1,507	3,366	0,214
0,89	209	1,995	3,300	0,213
0,91	212	2,657	3,183	0,213
0,93	215	3,584	2,992	0,213
0,95	217	4,892	2,726	0,213
0,98	219	7,286	2,275	0,239
1	219	9,679	1,887	0,239

Tabella 38: Concentrazione degli inquinanti nei fumi di combustione del biogas derivato da miscele di silomais con biomasse residuali

La temperatura adiabatica di combustione è dell'ordine di 2053,16 K, parametro fondamentale per la scelta dei materiali della camera di combustione e per il suo dimensionamento (Fig.35).

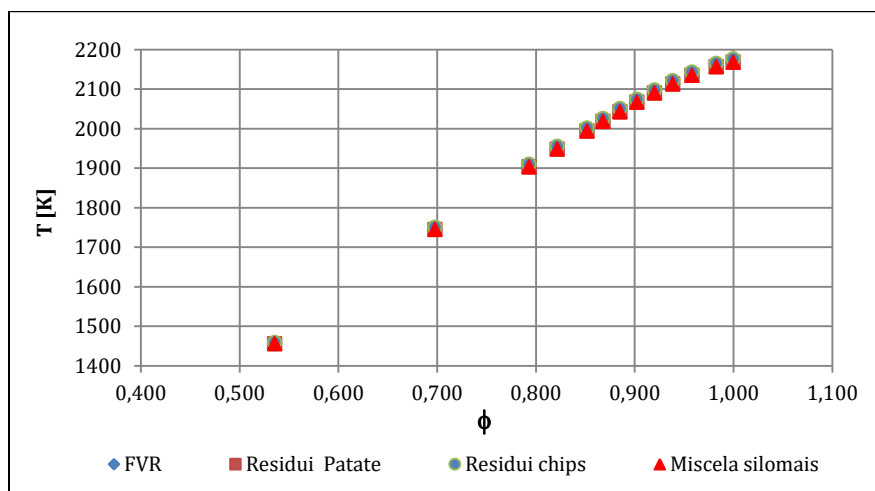


Figura 35: Temperatura adiabatica di combustione per i differenti substrati.

Gli andamenti delle concentrazioni in volume per il monossido di carbonio, il diossido di carbonio, il monossido di azoto e il diossido di zolfo sono riportati nella Fig 36a-d.

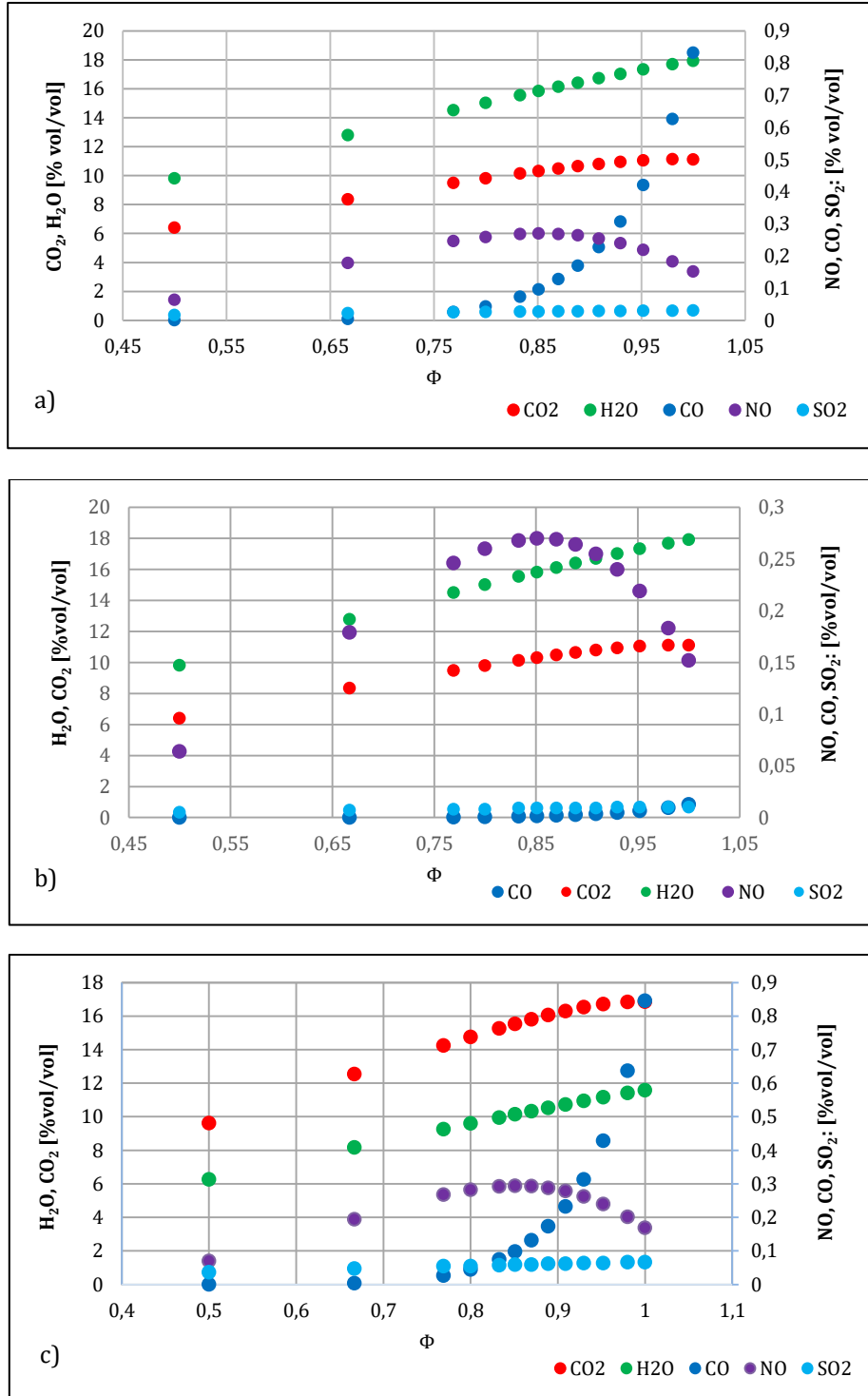


Figura 36: Concentrazione degli inquinanti nei fumi, a) FVR, b) Residui di patate, c) residui dell'industria delle patate.

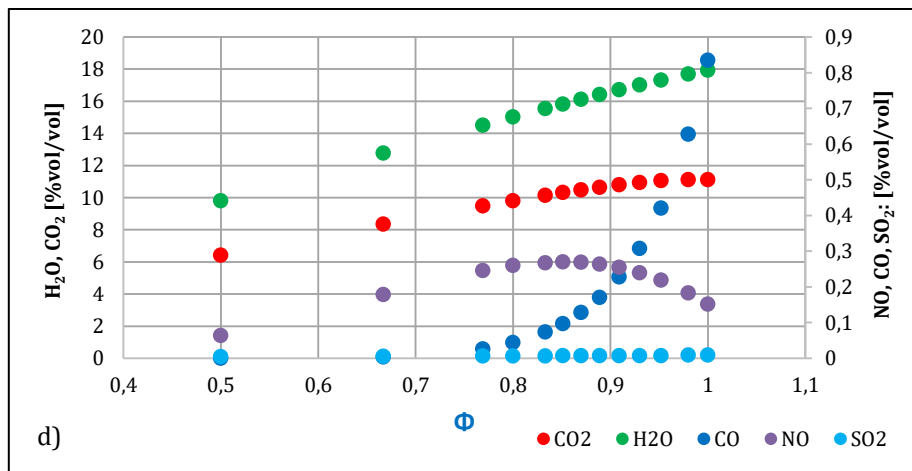


Figura 36: Concentrazione degli inquinanti nei fumi, d) Miscele di silomais e biomasse residuali.

I valori maggiori di NO si rilevano per i residui della trasformazione industriale delle patate. I FVR, invece, presentano i valori più elevati di SO₂. Il rapporto di equivalenza ottimale è compreso tra 0,85 e 0,89, corrispondente a un eccesso d'aria compreso tra il 12% e il 17%.

La concentrazione della CO₂ si attesta intorno al 10-11% per tutti i substrati. La concentrazione di NO tra lo 0,25% e lo 0,27% per tutti i substrati. Le concentrazioni più elevate di SO₂ si sono ottenute per i FVR e i residui della trasformazione industriale delle patate.

Se si confrontano i valori delle concentrazioni dei singoli inquinanti e in particolare del monossido di carbonio e degli ossidi di Azoto con i limiti imposti dalle norme (D.lgs. N°152, Al. I alla parte V, parte III, paf. 1,3 Tab.a) si osserva come siano tollerati valori massimi di 800 mg Nm⁻³ e 500 mg Nm⁻³ rispettivamente per gli impianti di potenza ≤ 3 MW. Questi valori a prima vista sembrano essere ampiamente superati da quelli previsti dalla simulazione all'equilibrio. Tuttavia considerando che l'equilibrio difficilmente si raggiunge negli impianti reali e che comunque i co-generatori sono dotati di sistemi di abbattimento degli inquinanti (convertitori catalitici trivalenti) è abbastanza improbabile, in condizioni normali di esercizio, raggiungere e superare questi limiti.

4.9 Conclusioni

La digestione anaerobica è un processo di conversione biochimica particolarmente adatto al trattamento dei residui agricoli e agroindustriali presenti in Sardegna. La composizione di questi residui per via del rapporto C/N in genere <30 e l'elevato contenuto di sostanze volatili consentono di ottenere con queste biomasse elevate produzioni specifiche di biogas e di conseguenza di energia. L'efficienza di conversione energetica per i differenti substrati impiegati nelle prove su scala pilota ha mostrato valori compresi tra il 64% e l'80% in funzione delle caratteristiche specifiche del substrato. L'impiego delle biomasse residuali, ampiamente diffuse nella regione, consente di alimentare gli impianti esistenti evitando il ricorso a colture dedicate con il conseguente minore consumo del territorio che può, più proficuamente essere destinato a colture d'interesse alimentare.

L'analisi delle componenti principali ha messo in evidenza come per il controllo del processo di digestione anaerobica siano fondamentali principalmente due parametri e cioè i solidi volatili (SV) e il tasso di carico organico (OLR). Tenendo sotto controllo queste due variabili è possibile condurre il processo in condizioni di elevata stabilità e con elevate produzioni di biogas.

E' molto importante, pertanto, preparare miscele per l'alimentazione degli impianti con specifiche caratteristiche e con un rapporto equilibrato tra i diversi componenti.

Le caratteristiche del biogas, che presenta in genere bassi contenuti di H_2S , ne consentono l'impiego diretto in motori a combustione interna.

Le prestazioni degli impianti industriali presenti in Sardegna possono essere sensibilmente migliorate in termini di riduzione dei tempi di processo, mantenendone inalterati i consumi di biomassa e le produttività

Capitolo 5

Le biomasse forestali hanno un largo impiego nella produzione di energia termica in vaste zone del pianeta. La quota maggiore di biomasse combustibili proviene dai boschi ed è rappresentata direttamente dalla legna derivante dall'abbattimento degli alberi o dai residui derivanti dalle operazioni di manutenzione dei boschi stessi. La costruzione di una filiera biomasse forestali-energia, tuttavia deve tenere conto di tutta una serie di aspetti tecnici, economici e ambientali.

In questo capitolo è presentato uno studio condotto in Ogliastra, per la valutazione della disponibilità e distribuzione delle biomasse forestali, mirato alla pianificazione di una filiera energetica specifica.

Per lo svolgimento dello studio è stata implementata una metodologia di ricognizione e valutazione delle risorse forestali basata su metodo GIS con l'uso della carta del suolo integrata con la carta della vegetazione.

Le biomasse forestali sono state sottoposte a una caratterizzazione chimico-fisica ed energetica per la valutazione del potenziale energetico del territorio. La scelta della migliore tecnologia di conversione energetica è stata eseguita mediante l'applicazione di un metodo multi attributo (MADM).

La filiera delle biomasse forestali

Le biomasse forestali sono una delle più antiche fonti di energia e ancora oggi rappresentano il combustibile principale per i paesi poveri in via di sviluppo, soprattutto nelle zone rurali.

La Commissione Europea ha preparato ultimamente un rapporto sullo scenario dello sviluppo dei sistemi energetici, con un orizzonte temporale del 2050. In accordo con questo documento la combustione delle biomasse per la produzione di energia aumenta nel tempo ed esse dovrebbero avere in futuro un incremento crescente nell'impiego quale combustibile negli impianti per la produzione di energia termica, stimato tra il 16% nel 2020 e il 26% nel 2050 (Capros *et al.*, 2013).

Una delle azioni più efficaci per raggiungere i valori di soglia stimati consiste nell'uso dei residui agro-forestali, tenendo conto dello sviluppo sostenibile dei territori.

Questo concetto è stato introdotto nella definizione di "gestione sostenibile delle foreste" da parte della Commissione Interministeriale per la Protezione delle Foreste in Europa (Helsinki Resolution H1).

Il punto di partenza per pianificare la catena di fornitura biomasse legnose-energia e per conseguire la gestione sostenibile delle foreste è rappresentato dalla valutazione della disponibilità delle biomasse.

Per raggiungere questo scopo in diverse parti del mondo sono state sviluppate numerose metodologie per valutare le estensioni delle foreste, la copertura vegetale e la quota percentuale di impiego a fini energetici.

La stima più importante eseguita in Italia è rappresentata dall'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi di Carbonio-INFC, riferita al 2005 e pubblicata nel 2012, (Tabacchi *et al.*, 2011). In questo momento è in corso il terzo inventario con l'obiettivo di aggiornare le informazioni sulle superfici forestali secondo la definizione FAO di bosco e altre caratteristiche qualitative quali parte vivente, percentuale di legni secchi, tasso di rigenerazione, quantità di residui e suolo (UN-ECE/FAO, 2000, FAO, 2000).

In Italia, in base all'inventario del 2005, la biomassa epigea occupa una superficie di circa 10.467.533 ha, dei quali 8.759.200 ha sono foreste e 1.708.333 ha sono altre aree boscate con un indice di boscosità del 34,7%.

Nel Sud dell'Italia la percentuale di foreste è più bassa rispetto al resto del territorio e le formazioni legnose più rilevanti sono rappresentate dagli arbusteti.

In Sardegna le foreste occupano circa 583.472 ha (24,2% della superficie totale) e le altre aree boscate (arbusteti, macchia mediterranea) coprono 629.778 ha (26,1% della superficie totale della Sardegna).

Le foreste della Sardegna e le aree boscate sono sia di proprietà privata che pubblica. Le foreste pubbliche sono gestite dall'Ente Foreste della Sardegna, un ente regionale che ha il compito di conservare e sviluppare le aree sopra descritte.

Per la stima delle biomasse forestali disponibili a livello locale è molto importante avere le informazioni più dettagliate e aggiornate sulla distribuzione spaziale delle risorse per le diverse classi forestali. Infatti, la pianificazione corretta di una catena di fornitura richiede dati reali e affidabili.

Un elemento chiave per una corretta pianificazione della catena di fornitura biomasse legnose-energia è la scelta della metodologia per la valutazione delle biomasse disponibili, poiché questa influenza in modo importante i risultati (Orrù *et al.*, 2013).

È pertanto di notevole rilevanza scegliere il modello di stima più adatto, oppure crearne uno nuovo e più appropriato per la zona in studio. Oltre a questo, è importante conoscere le caratteristiche chimiche, fisiche ed energetiche delle biomasse.

Questi parametri permettono di avere i dati necessari alla scelta della tecnologia di conversione energetica più appropriata e sono indispensabili per la progettazione degli impianti.

Le caratteristiche più importanti che devono essere determinate sono:

- il contenuto in umidità del materiale fresco;
- la percentuale di sostanze volatili, ceneri e carbonio fisso (analisi prossima);
- la composizione elementare ovvero il tenore in C, H, N, O, S (analisi ultima)
- il potere calorifico inferiore e superiore.

Così come l'umidità, anche le ceneri influenzano negativamente il potere calorifico per via dei composti insolubili e incombustibili che le costituiscono e che sono coinvolti nella formazione del *char* (Demirbaş *et al.*, 1998, Demirbaş *et al.*, 2002). Inoltre lo smaltimento delle ceneri presenta costi elevati e questo ha un impatto rilevante sulla gestione degli impianti di conversione energetica.

I dati chimici e fisici permettono di prevedere il comportamento delle biomasse nel corso dei processi di conversione energetica e di stimare anche le emissioni inquinanti (per esempio NO_x, SO_x, CO, CO₂).

Generalmente il contenuto in umidità al momento del taglio può essere elevato e superiore al 60 %, ma nel corso della stagionatura all'aria aperta si ha un'evaporazione dell'acqua in funzione della temperatura dell'ambiente. In queste condizioni l'umidità delle biomasse raggiunge uno stato di equilibrio con l'umidità relativa dell'ambiente (Piazza *et al.* 2005).

Tanto più elevata, è l'umidità delle biomasse, tanto maggiore è l'energia necessaria all'essiccamento per ottenere il grado di umidità necessario per alcuni processi di conversione (pirolisi, gassificazione) e questo rappresenta uno svantaggio dal punto di vista economico.

Il potere calorifico superiore (PCS) rappresenta l'energia liberata durante la combustione totale di un'unità di massa o di volume di un combustibile e comprende il calore latente di evaporazione dell'acqua, mentre il potere calorifico inferiore (PCI) non ne tiene conto, dal momento che non sempre è possibile utilizzarlo.

La determinazione del potere calorifico unitamente alla quantità di biomasse disponibile in uno specifico territorio consente di calcolare il potenziale energetico del

territorio stesso. Fondamentalmente le sostanze volatili e il carbonio fisso forniscono una misura della facilità di accensione di un combustibile (Mc Kendry, 2002).

Il Carbonio, l'Idrogeno e l'Ossigeno, sono importanti per la combustione, mentre l'Azoto e lo Zolfo sono legati alla formazione di inquinanti di incrostazioni, di ceneri e a fenomeni di corrosione degli impianti. Inoltre, un livello elevato di vapori inorganici sviluppati nel corso della combustione dipende da una quantità rilevante di Ossigeno e composti organici volatili (VOC). D'altra parte maggiore è il contenuto in carbonio, maggiore risulta il potere calorifico delle biomasse (Jenkins *et al.*, 1998).

Di seguito è descritto uno studio condotto nelle aree forestali dell'Ogliastra focalizzato sullo sviluppo di catene di approvvigionamento biomasse legnose-energia sostenibili. Sono stati considerati fondamentalmente la stima delle biomasse disponibili a fini energetici (usando un sistema GIS con l'aggiunta della carta della vegetazione) e la caratterizzazione chimica, fisica ed energetica delle biomasse. Combinando questi dati è stato possibile calcolare la distribuzione spaziale delle biomasse, la disponibilità annua e il potenziale energetico massimo del territorio in questione.

L'uso di un criterio decisionale multi attributo (MADM) ha consentito di identificare la migliore tecnologia di conversione energetica utilizzabile in Ogliastra.

5.1 Le biomasse forestali nella Provincia dell'Ogliastra

L'Ogliastra è localizzata geograficamente nella parte orientale della Sardegna e ha una superficie di 1.854 km² dei quali il 40,7% sono aree boscate (Fig.37). L'Ogliastra rappresenta la regione con la maggiore superficie boscata della Sardegna (Fig.38) e l'intero territorio è suddiviso in 23 distretti comunali. Quasi il 60% del territorio presenta pendenze tra 0 e il 20%, il 34% circa tra il 20 e il 40%, mentre il restante 6% manifesta pendenze elevate (40-60%) e molto elevate (>60%).

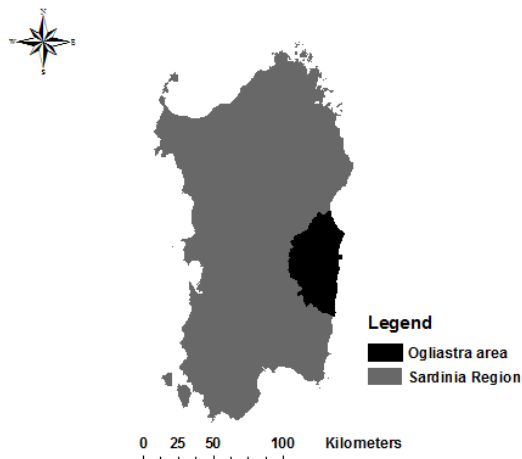


Figura 37: Localizzazione geografica della regione studiata.

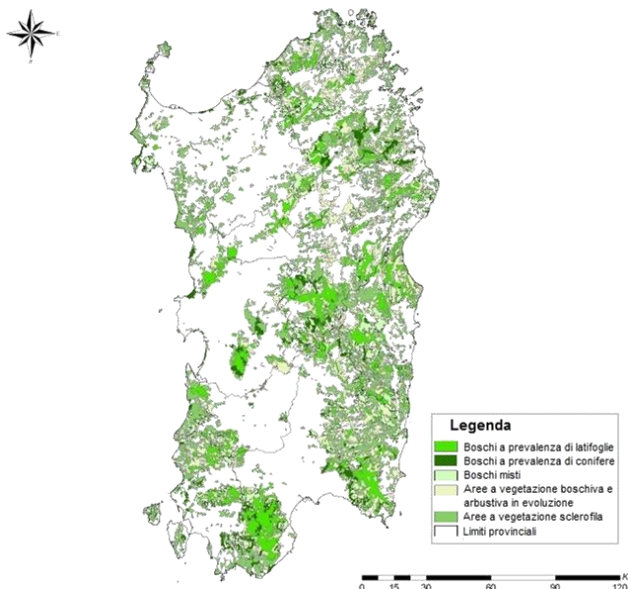


Figura 38: Carta delle zone boscate della Sardegna (Fonte Sardegna Ricerche,2008).

Lo studio del territorio dell'Ogliastra si è basato sull'analisi della carta dell'uso del suolo, strumento cartografico, realizzato nell'ambito del Progetto CORINE Land Cover dell'Unione Europea, che rappresenta lo stato attuale di utilizzo del territorio.

La carta dell'uso del suolo divide il territorio in cinque grandi classi (1° livello):

- Territori modellati artificialmente
- Territori agricoli
- Territori boscati e ambienti seminaturali
- Territori umidi
- Corpi idrici.

Impiegando questa classificazione, si arriva al IV livello di approfondimento della carta, che descrive nel dettaglio le tipologie di uso del suolo riscontrate.

La carta dell'uso del suolo dell'Ogliastra deriva da quella della Regione Sardegna (scala 1:25.000, edizione 2008), aggiornata ed integrata con i dati provenienti da cartografie di diversa origine, rese disponibili da 7 Comuni che rappresentano il 42% del territorio provinciale.

La scala di restituzione della carta dell'uso del suolo relativa a questi Comuni è 1:10.000, mentre l'unità minima cartografata è di 2.500 m².

Nella carta dell'uso del suolo della Provincia Ogliastra si distinguono due aree: la parte centro-meridionale del territorio, derivata dalla cartografia regionale, in scala 1:25.000, e la parte centro-settentrionale, derivata dalla cartografia comunale, in scala 1:10.000.

L'analisi delle classi principali del 1° livello nel quale è distinto l'uso del territorio ha fornito i dati riportati nella Fig.39.

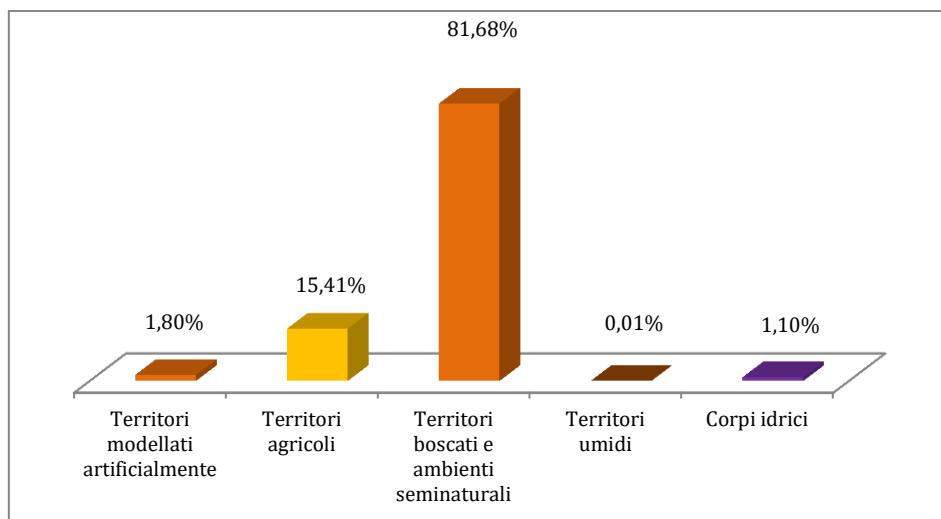


Figura 39: Distribuzione percentuale delle classi di uso del suolo di 1° livello nella Provincia Ogliastro.

Come si può notare oltre l'80% del territorio è caratterizzato dalla presenza di "Territori boscati e ambienti seminaturali", il 15% del suolo provinciale è utilizzato per fini agricoli, l'1,8% è costituito da territori modellati artificialmente, mentre la restante parte è formata da "Territori umidi" e "Corpi idrici".

Globalmente l'Ogliastro presenta 62 categorie di uso del suolo. La rappresentazione delle 16 categorie più importanti è riportata nella Fig.40.

Dal punto di vista della produzione di biomasse agroforestali impiegabili ai fini energetici, sono stati presi in esame i territori agricoli e i territori boscati e gli ambienti seminaturali.

Dall'esame dei dati si nota come le superfici costituite da seminativi in aree non irrigue e quelle concernenti le colture temporanee, occupano complessivamente oltre il 4% della superficie totale del territorio provinciale.

Le colture permanenti (vite, olivo e frutteti) sono rappresentate in misura minore rispetto alle colture temporanee, tuttavia non sono trascurabili.

I sistemi colturali e particellari complessi e le aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti rappresentano il 3,3% dei terreni agricoli e sono un indice della parcellizzazione del territorio.

Se ne evince una frammentazione dell'assetto fondiario, che determina una difficile gestione di queste aree ai fini della produzione agricola e quindi anche di biomasse dedicate e residuali.

Per quanto concerne i territori boscati e gli ambienti seminaturali, predominano la macchia mediterranea con circa 54.070 ha (pari al 35,7% del totale) e i boschi di latifoglie (principalmente leccete) per un totale di circa 41.060 ha (27,1%).

La macchia mediterranea non può essere impiegata integralmente per la produzione di biomasse nel breve periodo perché costituisce una cenosi in evoluzione verso sistemi arborei più produttivi. I sistemi più maturi e complessi, invece, possono essere utilizzati nel medio periodo, in parte per favorire le specie arboree quali il leccio, la roverella e la sughera.

Tuttavia il grado di utilizzo di questi è differente in funzione del tipo di governo del bosco: nelle *fustaie* l'impiego è attuato mediante diradamenti leggeri o tagli di carattere

fitosanitario, consentendo un prelievo medio del 20÷30%; nei *cedui*, invece, si attuano interventi anche nel breve periodo con un prelievo medio del 50%.

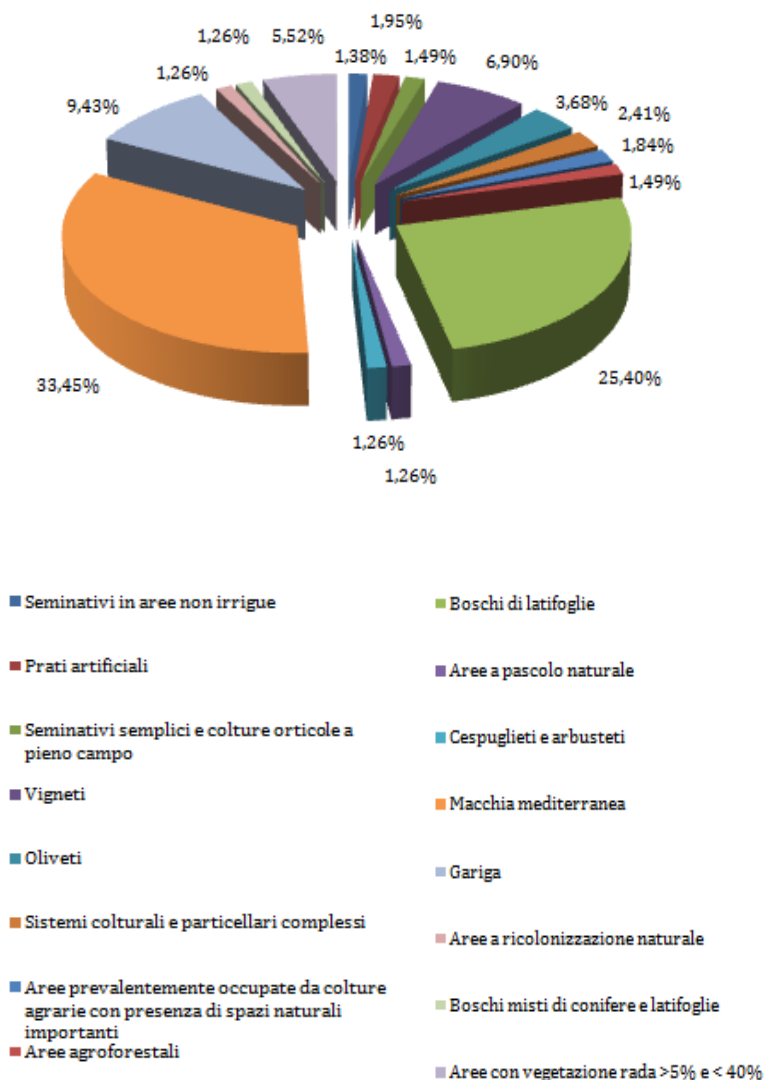


Figura 40: Distribuzione percentuale delle principali classi dell'uso del suolo nella Provincia Ogliastra.

Gli impianti artificiali di conifere e latifoglie ricoprono una superficie totale pari a 14.246 ha (7,7% del territorio provinciale). Essi, nella maggior parte dei casi, sono rappresentati da conifere mediterranee e, raramente, da conifere alloctone e latifoglie. Mediamente, si considera un grado di impiego pari al 50÷60%. Nella Fig.41 è riportata la distribuzione delle principali categorie forestali nei territori esaminati.

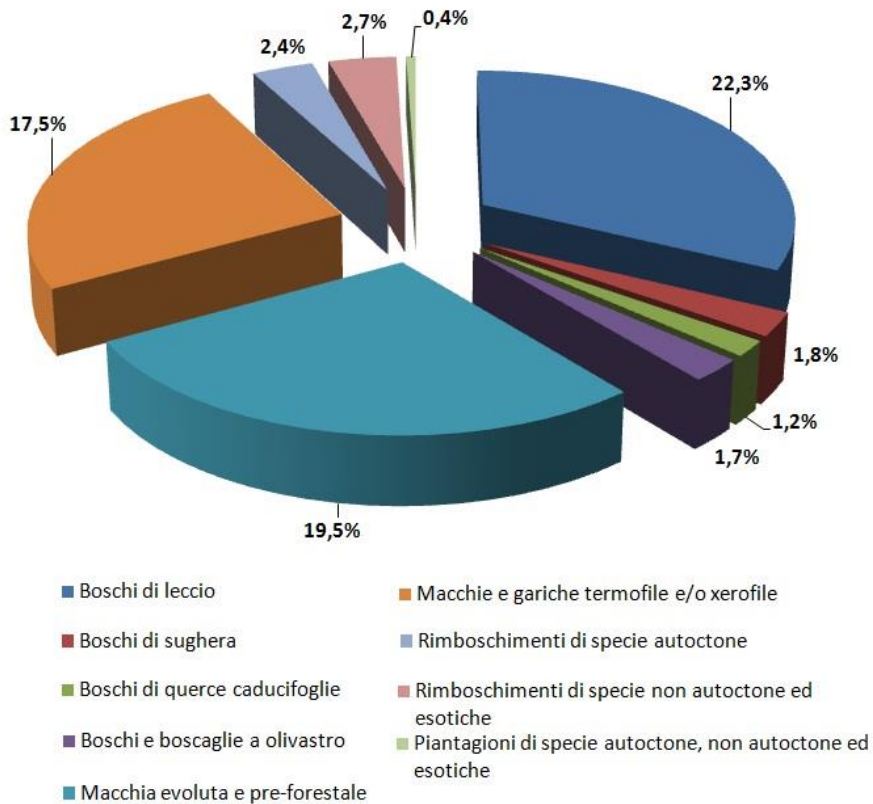


Figura 41: Distribuzione percentuale delle principali categorie forestali nei territori comunali esaminati.

5.2 Stima della ritraibilità della biomassa per fini energetici

Per individuare con la massima precisione possibile le formazioni forestali che effettivamente costituiscono la biomassa ritraibile dal territorio in esame, è stata impiegata anche la carta della copertura vegetale.

Questo strato informativo consente, infatti, di ottenere informazioni più approfondite rispetto alla carta dell'uso del suolo e di evidenziare gli aspetti selvicolturali e le diverse potenzialità energetiche di ogni formazione.

Per la realizzazione della carta della copertura vegetale è stato definito un sistema di categorie miste, in grado di includere le più comuni formazioni isolate.

La sovrapposizione della carta dell'uso del suolo e della carta della vegetazione ha consentito di verificare quale quota di una determinata classe d'uso del suolo può essere effettivamente impiegata per la produzione delle biomasse.

Il valore così ottenuto è stato utilizzato per calcolare i coefficienti di utilizzo specifico, indispensabili per valutare i valori superficiali delle diverse classi d'uso del suolo. Per esempio, è stato possibile stimare quale percentuale della classe bosco di latifoglie è costituita da specie realmente sfruttabili ai fini energetici.

I dati emersi dalla lettura della carta della vegetazione hanno confermato in parte quanto emerso dai dati dell'uso del suolo. In particolare è stato evidenziato che le formazioni pre-forestali rappresentano la percentuale più rilevante tra le diverse formazioni vegetali.

Tra le "macchie" si mette in risalto la forte presenza delle categorie "Macchie e garighe termofile e/o xerofile" e "Macchia evoluta e pre-forestale".

Complessivamente, tali formazioni costituiscono oltre il 35% del territorio esaminato.

La categoria "Macchia evoluta e pre-forestale" può dare un contributo alla produzione di biomasse nel breve e medio periodo, mentre la categoria "Macchie e garighe termofile e/o xerofile" potrebbe risultare importante solo nel lungo periodo, a condizione che le condizioni del suolo siano favorevoli.

La categoria boschi di leccio costituisce una delle formazioni più rappresentate; infatti, si rinviene nel 22% circa del territorio dei 7 Comuni analizzati.

La categoria boschi di sughera comprende alcune "sottocategorie forestali" che differenziano le formazioni, in cui la sughera si rinviene allo stato puro o consociata con altre specie legnose. In alcuni casi le biomasse potrebbero essere prelevate dalle componenti leccio o roverella, mentre in altri casi, invece, si possono ipotizzare solamente tagli di carattere fitosanitario o di carattere selettivo con l'eliminazione delle piante non più produttive. Secondo queste considerazioni, per la categoria "Boschi di sughera" si può assumere un tasso di prelievo del 20% rispetto alla massa legnosa totale di queste formazioni.

Le categorie definite "impianti artificiali di conifere e latifoglie", nella carta della copertura vegetale sono rappresentate come rimboschimenti e piantagioni.

Le conifere autoctone presentano un accrescimento inferiore rispetto alle alloctone e possono anche essere impiegate per produzioni di materiali alimentari (pinoli) e questo suggerisce di orientarsi, a fini energetici, verso le specie alloctone.

Per garantire un impiego sostenibile delle formazioni boschive è stata valutata la loro capacità produttiva annuale, rappresentata dall'incremento medio annuo per ettaro.

I valori dell'incremento medio di volume utilizzati nella presente stima sono stati ottenuti con riferimento ai dati del Piano Forestale Ambientale Regionale (PFAR 2007), modificati mediante l'analisi dai dati dendrometrici forniti dall'Ente Foreste e dai tecnici operanti nel settore forestale. I dati auxonometrici ricavati localmente sono derivati dai rilievi e dagli studi eseguiti nelle stesse formazioni forestali. Per determinare le aree effettivamente idonee alla produzione, al prelievo e all'impiego energetico del materiale legnoso, è stata proposta e applicata una metodologia basata sull'analisi GIS degli strati informativi a disposizione: la carta dell'uso del suolo e la carta delle pendenze. E' stata ottenuta una carta rappresentativa degli ambiti forestali che possono essere destinati alla produzione di biomasse per l'utilizzo energetico. L'impiego di altri strati informativi, quale la carta della viabilità, non esaminata nel presente studio, può permettere di eseguire delle valutazioni più dettagliate, dal punto di vista della fattibilità economica.

La carta delle pendenze è stata ottenuta da un modello digitale del terreno (MDT) con una risoluzione di 10 m². Sono state individuate, sull'intero territorio, le aree con una pendenza omogenea con una superficie minima di 2.000 metri quadrati e le classi d'uso del suolo che rappresentano possibili bacini di produzione di biomassa forestale (Tab.39). Attraverso particolari elaborazioni, gli strati informativi "uso del suolo" e "pendenza" sono stati sovrapposti, in modo da ottenere un terzo strato informativo, il quale possiede le informazioni riguardanti le classi di uso del suolo di interesse energetico e le classi di pendenza. In base a queste informazioni, sono state predisposte le classi di vocazionalità, che hanno consentito di individuare i diversi gradi attitudinali delle formazioni forestali relativamente ad un loro potenziale utilizzo a fini energetici.

Uso del suolo	Superficie [ha]
3111 - Boschi di latifoglie	32.300,1
3112 - Arboricoltura con essenze forestali di latifoglie	91,2
31121 - Pioppeti, saliceti, eucalipteti ecc. Anche in formaz. miste	1.510,3
31122 - Sugherete*	1.093,3
31123 - Castagneti da frutto*	16,3
31124 - Altro*	74,5
3121 - Bosco di conifere	5.394,5
3122 - Arboricoltura con essenze forestali di conifere	1.129,4
313 - Boschi misti di conifere e latifoglie	1.789,6
Totale	43.399,2

Tabella 39: Classi di uso del suolo potenzialmente impiegabili per la produzione di biomasse di origine forestale nella Provincia dell'Ogliastra.

La carta dell'uso del suolo è riportata nella Fig.42, mentre la carta delle pendenze è riportata nella Fig.43. I diversi gradi di vocazione sono distinti nel modo seguente:

- Vocazione massima: pendenza 0%-20%
- Vocazione media: pendenza 20%-40%
- Vocazione minima: pendenza 40%-60%
- Vocazione nulla: pendenza superiore al 60%.

Il risultato è una carta delle aree vocate per la produzione e l'utilizzo di biomasse di origine forestale.

Le aree con "vocazione massima", infatti, sono caratterizzate da condizioni complessive favorevoli allo sviluppo della vegetazione e agli interventi necessari per l'impiego.

Le superfici a "vocazione media" presentano suoli meno profondi, maggiore rocciosità e, in generale, i costi di utilizzazione sono più alti. Le aree a vocazione minima sono caratterizzate da suoli superficiali, con rocciosità diffusa e costi elevati di asportazione delle biomasse. Tali aree sono al limite della fattibilità economica per ogni tipo di sfruttamento delle biomasse forestali.

Le *classi di vocazione* sono così definite:

- classe 1: rappresenta le aree con vocazione massima, in quanto le più idonee dal punto di vista logistico (pendenza <20%)
- classe 2: identifica le aree con vocazione media, caratterizzate da pendenze comprese tra il 20% e il 40%
- classe 3: identifica le aree con vocazione minima, con pendenza tra il 40% e il 60%, nelle quali le utilizzazioni si riducono alle sole aree facilmente accessibili.
- Ottenuta la carta delle aree vocate per la produzione e l'utilizzo della biomassa forestale, è stato predisposto un modello che consente di ottenere la stima delle biomasse presenti nell'area impiegando diversi parametri. Il "*coefficiente di utilizzo specifico*" tiene conto del fatto che non tutte le specie o le formazioni vegetali rilevate nella classe d'uso del suolo sono adatte per la produzione di biomasse.

- Detto coefficiente è fondamentale per correggere alcune generalizzazioni implicite nell'attribuzione della classe dell'uso del suolo.

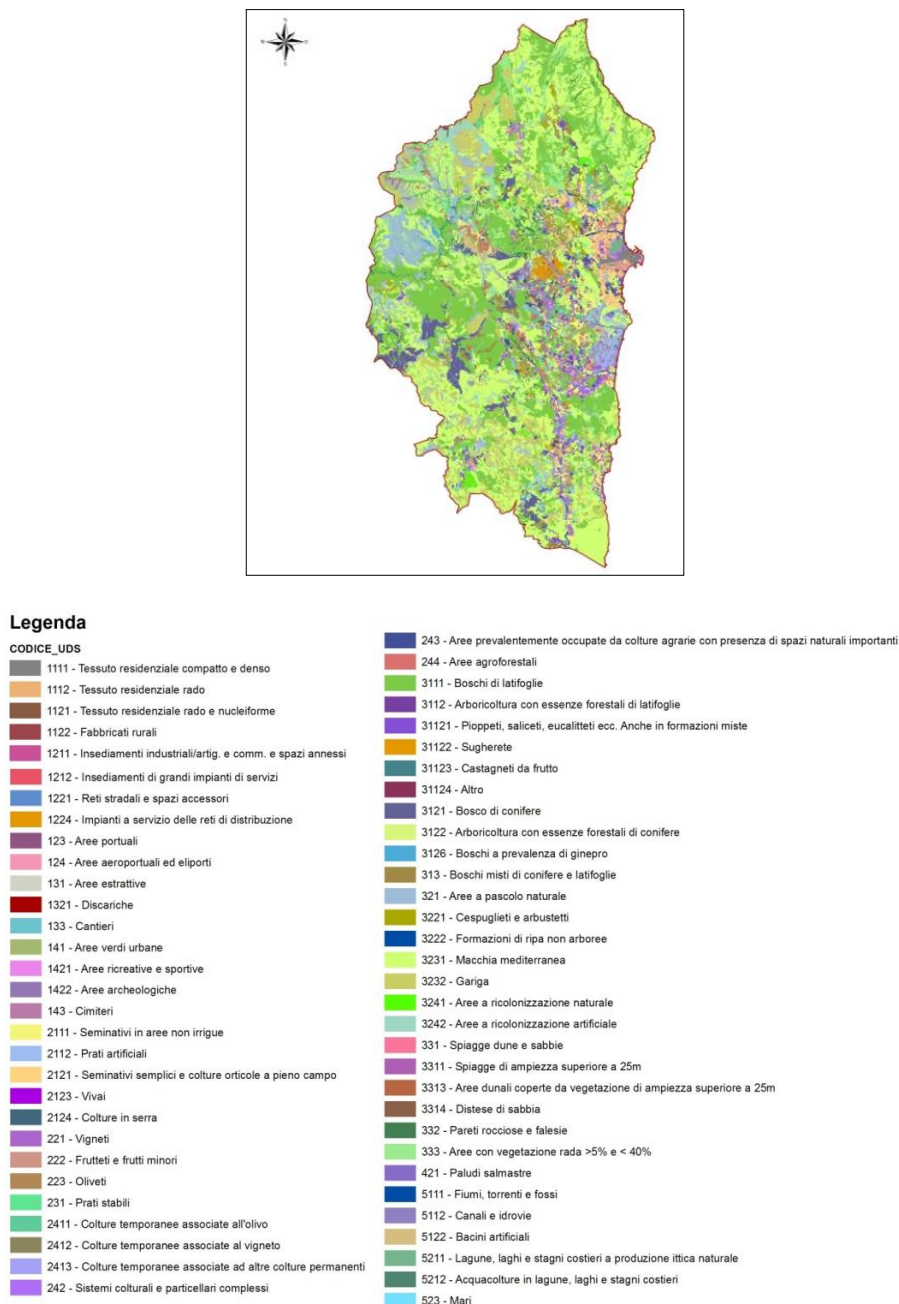


Figura 42: Carta dell'uso del suolo della Provincia Ogliastro in scala 1:25.000.

Mediante analisi implementate in ambiente GIS, sono state determinate le superfici relative a ogni classe di vocazione. Nella classe "Boschi di latifoglie" è stato impiegato il coefficiente 0,9, poiché è stato stimato che il 90% delle formazioni vegetali riconducibili

a tale classe può essere disponibile per la produzione di biomasse, mediante tagli di impiego e tagli di tipo culturale (per es. nella classe “Boschi di latifoglie” sono comprese le boscaglie di olivastro).

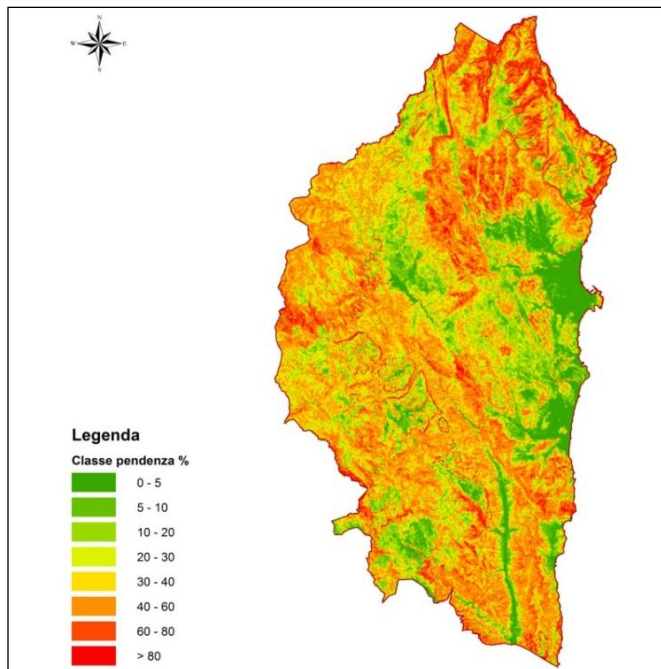


Figura 43: Carta delle pendenze della Provincia Ogliastra in scala 1:25.000.

Per la classe “Arboricoltura con essenze forestali di latifoglie” è stato impiegato il coefficiente 0,6, perché parte delle formazioni incluse, sono destinate ad altre produzioni, quali la frutta e il legname da opera.

Nella classe “Boschi misti di conifere e latifoglie”, per una parte dei soprassuoli è stato previsto un utilizzo diverso da quello finalizzato alla produzione di energia e, pertanto, è stato usato un coefficiente (0,7) inferiore a quello previsto per i soli impianti di conifere. Nella Tab.40 sono riportati i coefficienti di utilizzo delle diverse classi forestali prese in esame.

Classe Forestale	Coefficiente di utilizzo
Conifere, Conifere da arboricoltura, Castagni, Querce da sughero, Pioppi, Salici, eucaliptus	1
Altre latifoglie	0,9
Foreste miste di conifere e latifoglie	0,7
Arboricoltura di latifoglie	0,6

Tab.40: Coefficienti di utilizzo delle diverse classi forestali.

Per stimare le biomasse presenti nel territorio, per ciascuna classe d'uso del suolo è stato valutato un *incremento medio annuo di volume per ettaro*.

L'incremento medio annuo di volume, espresso in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{anno}^{-1}$, indica il volume medio annuo di legno prodotto da un popolamento arboreo dalla sua nascita fino a una determinata età di riferimento.

I suoi valori sono stati ottenuti facendo riferimento alla letteratura forestale esistente per il territorio regionale e provinciale. In particolare, sono state consultate le "Analisi di massima sull'utilizzo delle biomasse forestali a scopo energetico" del Piano Forestale Ambientale Regionale (PFAR 2007) e le "Tavole stereometriche e alsometriche costruite per boschi italiani" dell'Istituto Sperimentale per l'assestamento Forestale e per l'Apicoltura (ISFAFA 1970). Inoltre, sono stati presi in considerazione i dati ricavati localmente mediante studi e rilievi eseguiti in passato da enti preposti e da liberi professionisti operanti nel settore forestale.

Il *volume totale* allo stato fresco, valutato in $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$, indica il volume medio annuo di legno fresco prodotto da un popolamento forestale su tutta la superficie occupata.

La *densità* del legno indica la massa di una sua unità di volume ed è stata espressa in tonnellate per metro cubo (t m^{-3}). I valori per le specie legnose rappresentative di ogni classe d'uso del suolo sono stati ottenuti mediante la consultazione dei dati presenti in letteratura (Giordano *et al.*, 1971). In particolare, è stata presa in considerazione la media aritmetica tra diversi valori della densità del legno fresco.

Mediante i valori della densità è stata ricavata la *massa totale lorda*, ossia la massa legnosa fresca prodotta in un anno da un determinato popolamento forestale, espressa in t a^{-1} . Il *coefficiente di utilizzo selvicolturale* è un coefficiente introdotto per tenere conto del fatto che solamente una parte della provvigione legnosa può essere prelevata per la produzione di biomasse. Questo nel rispetto dei principi ecologici che sono alla base delle buone norme selvicolturali.

Nelle aree con la vocazione massima si considera solo la finalità produttiva, pertanto sono state ipotizzate quote di prelievo del 90%. Nelle aree con vocazione minima e media, tenendo conto della protezione del suolo, sono state considerate quote del 60% e dell'80%. In considerazione del fatto che le latifoglie assumono un importante ruolo naturalistico e paesaggistico, per la classe "Boschi misti di conifere e latifoglie" è stata stimata una quota di prelievo pari al 70% nelle aree più vocate e del 40% nelle aree con vocazione minima.

Infine, la *massa totale netta*, espressa in t a^{-1} , indica la massa legnosa fresca prodotta in un anno da un determinato popolamento forestale al netto della massa legnosa non prelevabile.

La stima della massa legnosa allo stato fresco è stata effettuata mediante la moltiplicazione delle superfici per l'incremento di volume medio annuo per ettaro e per la densità delle diverse specie legnose. Ai valori ottenuti sono stati applicati alcuni coefficienti correttivi che tengono conto della presenza di specie arboree e arbustive non utilizzabili a fini energetici e della componente forestale da rilasciare, in base a quanto previsto dalle buone regole selvicolturali prestabilite anche dalle Prescrizioni di Massima e di Polizia Forestale. Nella Tab.41 sono mostrati i coefficienti selvicolturali e gli incrementi medi annui. Nello specifico, la stima è stata realizzata tenendo conto della sostenibilità ecologica ed economica dei potenziali interventi selvicolturali.

Per il calcolo della massa totale netta è stata impiegata l'espressione:

$$M_{tn} = S_{tv} \cdot C_{us} \cdot I_{ma} \cdot D \cdot C_{sv} \quad (25)$$

Nella quale:

M_{tn} è la massa totale annua netta su base umida in t a^{-1}

S_{tv} è la superficie tipo vocazione in ha
 C_{us} è il coefficiente di utilizzo specifico
 I_{ma} è l'incremento medio annuo in $m^3 ha^{-1} a^{-1}$
 D è la densità su base umida in $t m^{-3}$
 C_{sv} è il coefficiente di utilizzo selvicolturale.

	Coefficienti Selvicolturali	Incremento medio annuo (base umida) [$m^3 ha^{-1} a^{-1}$]
Boschi di latifoglie (fustaia)	0,20	2,5
	0,15	
	0,10	
Boschi di latifoglie (Ceduo)	0,50	2,5
	0,40	
	0,20	
Arboricoltura con essenze forestali di latifoglie	0,40	4
	0,30	
	0,20	
Pioppeti, saliceti, eucalipteti ecc. Anche in formaz. miste	0,90	6
	0,80	
	0,70	
Sugherete	0,20	2,5
	0,20	
	0,20	
Castagneti da frutto	0,20	4,0
Bosco di conifere	0,90	5,5
	0,80	
	0,60	
Arboricoltura con essenze forestali di conifere	0,90	5,5
	0,80	
	0,60	
Boschi misti di conifere e latifoglie	0,70	4
	0,60	
	0,40	
Altro	0,20	4

Tabella 41: Coefficienti selvicolturali e incrementi medi annui.

I risultati dei calcoli sono mostrati nella Tab.42. Mediante il modello proposto, è stata stimata una disponibilità potenziale di biomasse forestali su base umida pari a 47.257 t, delle quali 14.728 t (31,2%) da utilizzare come legna da ardere e circa 32.529 t (68,8%) da trasformare in cippato e/o in *pellet*.

	Classe di vocazione	Massa totale annua netta (base umida) [t a⁻¹]
Boschi di latifoglie (fustaia)	1	1.350
	2	2.069
	3	2.306
Boschi di latifoglie (Ceduo)	1	2.250
	2	3.678
	3	3.075
Arboricoltura con essenze forestali di latifoglie	1	19
	2	34
	3	7
Pioppeti, saliceti, eucalipteti ecc. Anche in formaz. miste	1	2.517
	2	1.823
	3	1.522
Sugherete	1	143
	2	223
	3	181
Castagneti da frutto		12
Bosco di conifere	1	3.622
	2	9.273
	3	6.653
Arboricoltura con essenze forestali di conifere	1	720
	2	2.516
	3	987
Boschi misti di conifere e latifoglie	1	584
	2	808
	3	831
Altro		54
Totale		47.257

Tabella 42: Stima della massa legnosa presente nel territorio della Provincia Ogliastra.

In base a queste considerazioni e valutando un'età media dei soprassuoli mappati di almeno 25 anni, si può stimare una provvigione ritraibile pari a circa 1.181.392 t.

I valori così ottenuti rappresentano le biomasse arboree epigee totali presenti in tutto il territorio della Provincia Ogliastra, senza considerare gli aspetti legati alla pianificazione di dettaglio. Considerando che una piccola parte dei soprassuoli forestali mappati, in questo momento, è già utilizzata, senza aver previsto la successiva rinnovazione artificiale o naturale, le biomasse ritraibili potrebbero risultare in una quantità inferiore a quella stimata. Tuttavia, si ritiene che tali variazioni non

determinino mutamenti sostanziali alla valutazione complessiva (Rubiu P.A., Muceli F., Ibba E., Coda M. in Scano *et al.*, 2013).

5.3 Materiali e metodi

Per valutare il potenziale energetico delle biomasse vegetali maggiormente diffuse nel territorio della Provincia Ogliastra, è stato necessario mettere in relazione la quantità di biomassa forestale ritraibile stimata con le caratteristiche chimiche e fisiche delle principali specie forestali presenti.

Ciò ha consentito di ottenere con precisione il potenziale energetico teorico dell'intero territorio provinciale e di alcune sue aree selezionate e, inoltre di indicare le tecnologie di conversione energetica più appropriate per il territorio.

5.3.1 Prelievo delle specie forestali

Sono state prese in esame le specie forestali comunemente impiegate per la generazione di energia e cioè sia quelle destinate alla produzione di legna da ardere che quelle diffuse nel territorio isolano a seguito delle attività di rimboschimento e di bonifica delle aree paludose.

Le biomasse vegetali possono essere divise in due grandi categorie: le latifoglie e le conifere. Tra le latifoglie sono predominanti le specie autoctone, come il leccio e la roverella, mentre, le più diffuse essenze tipiche della macchia mediterranea, annoverano il corbezzolo e la fillirea.

Oltre alle latifoglie autoctone, sono diffuse alcune specie alloctone, come l'eucalipto. Anche le conifere possono essere divise in specie mediterranee, che crescono spontaneamente in Sardegna, e specie non autoctone. Le conifere mediterranee sono rappresentate da: *Pinus pinea* L., *Pinus pinaster* Aiton, *Pinus halepensis* Miller. Le conifere non spontanee sono: *Cedrus* spp. (*Cedrus atlantica* Carrière), *Pinus radiata* Don, *Pinus nigra* Arnold, *Pinus canariensis* Sweet. Altre specie forestali sono presenti nel territorio ogliastrino in misura significativa dal punto di vista produttivo, benché con una diffusione minore rispetto alle essenze citate. Sono state selezionate dieci tra le specie forestali di interesse energetico (*Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinea*, *Pinus nigra*, *Pinus radiata*, *Pinus canariensis*, *Cedrus atlantica*, *Quercus ilex*, *Arbutus unedo*, *Eucalyptus*) e la macchia mediterranea mista, al fine di indagare le loro proprietà chimico-fisiche ed energetiche. Le specie legnose da analizzare sono state individuate con l'impiego della carta della copertura vegetale, che è stata impiegata come base campionaria.

Il sistema campionario è stato scelto sulla base delle risorse disponibili per la sua esecuzione. In seguito, mediante un'analisi condotta in ambiente GIS, è stata redatta la carta delle esposizioni, con l'obiettivo di identificare le formazioni forestali esposte a Sud o a Nord.

La carta dell'uso del suolo è stata utilizzata per estrarre le superfici dei popolamenti forestali rappresentativi delle specie legnose di interesse e che, contestualmente, presentassero un'esposizione Sud e Nord.

A tale strato informativo è stata sovrapposta la "griglia" dei punti campionari, con l'obiettivo di attribuire a ogni punto campione la formazione forestale, l'esposizione corrispondente a un numero identificativo.

Il prelievo della biomassa legnosa da analizzare è stato eseguito mediante una metodologia di campionamento di tipo casuale, cioè: dalla popolazione di punti, attraverso un'estrazione di tipo casuale, sono stati individuati 2 punti campione per ciascuna delle 11 specie di interesse, per un totale di 22 punti campione.

Ogni punto campione ha costituito il centro di un'area di saggio, di raggio 20 m, pari a 1.256 m², all'interno della quale si è proceduto alla scelta della pianta campione. Come pianta campione è stato scelto l'albero più rappresentativo del popolamento forestale in esame sulla base di: diametro, altezza e altri criteri di tipo soggettivo. Per ogni albero campione sono stati rilevati e registrati: il diametro (a una distanza di 1,30 m dal suolo) e l'altezza dendrometrica. Poi si è proceduto all'operazione di abbattimento dell'albero campione, alla sramatura e al prelievo dei campioni legnosi (Rubi P.A., Muceli F., Ibba E., Coda M. in Scano *et al.*, 2013).

5.3.2 Preparazione dei campioni

Per ogni albero sono stati prelevati 1 o 2 campioni dal tronco e 1 campione dalle ramaglie. In particolare, per le specie appartenenti alla categoria delle conifere sono stati prelevati 3 campioni: tronco con corteccia, tronco senza corteccia e ramaglie. Invece, per le latifoglie sono stati prelevati 2 campioni: tronco con corteccia e ramaglie. I campioni di tronco sono stati prelevati in modo tale da rappresentare la parte media del fusto e da avere una lunghezza di circa 1,2 m. Per ottenere i campioni senza corteccia, è stata eseguita l'operazione di scortecciatura immediatamente prima della cippatura. I campioni di ramaglie sono stati costituiti dai rami con diametro inferiore a 4 cm e dalle foglie. Inoltre, per ogni punto campione, sono state rilevate nuovamente le coordinate mediante l'impiego del *Global Positioning System* (GPS).

Questi dati sono stati raccolti in una scheda di campagna in cui sono state registrate le informazioni necessarie per le valutazioni successive (ad esempio: la specie, l'esposizione, e i dati dendrometrici).

I campioni sono stati prelevati nelle Unità Gestionali di Base (UGB) di Arzana, Lanusei, Gairo e Villagrande del Servizio Territoriale di Lanusei dell'Ente Foreste della Sardegna. I lavori di abbattimento, allestimento ed esbosco del legname sono stati eseguiti da una squadra operativa messa a disposizione dall'Ente Foreste della Sardegna.

Al termine di ogni giornata di lavoro il legname raccolto è stato trasportato e depositato nel capannone dell'autoparco del vivaio forestale di San Cosimo-Lanusei, dove è stato sottoposto alla cippatura.

Le operazioni di cippatura sono state eseguite, immediatamente dopo il taglio, mediante una cippatrice a disco, collegata al cassone di un autocarro sul quale è stato scaricato il cippato.

In alcuni casi si è trattato il campione nei giorni successivi al taglio ma, comunque, non oltre il decimo giorno dal suo prelievo.

Oltre ai campioni relativi alle specie di latifoglie e conifere individuate dall'indagine preliminare, sono stati preparati due campioni di residui di potature delle due colture più diffuse nel territorio, la vite e l'olivo.

La biomassa campionata è stata confezionata in sacchi di iuta chiusi, sui quali è stata applicata un'etichetta con il codice e il peso del campione. Tali campioni avevano un peso variabile tra 20 kg e 33 kg e sono stati consegnati al Laboratorio in cinque differenti lotti. Considerate le formazioni vegetali prelevate, la suddivisione in base all'esposizione e alla porzione di pianta, i campioni di biomasse vegetali preparati e analizzati sono stati 60.

I campioni sono stati sottoposti a quattro quartature successive, mediante le quali sono stati ricavati sub-campioni della massa di 3,5 kg ciascuno. Per i campioni di tronco senza corteccia e di tronco con corteccia è stato impiegato un quartatore di tipo *riffle box* (Retsch GmbH, Germania). Per le ramaglie, invece, è stato utilizzato il metodo di quartatura e riduzione del campione a torta (*coning & quartering*). Si è proceduto a un'ulteriore riduzione a campione per analisi secondo quanto descritto nella norma

UNI EN 14780:2011. I campioni, ottenuti in seguito alle operazioni di quartatura, sono stati essiccati in stufa termostatica ventilata (modello 100-800, Memmert GmbH, Germania) a 105°C, secondo quanto descritto nella norma UNI EN 14774:2009 per la determinazione dell'umidità totale. In seguito sono stati ridotti a una dimensione passante al setaccio di 0,25 µm, con l'ausilio di un mulino a lame (modello SM 2000, Retsch GmbH, Germania).

Da ciascun campione è stata ottenuta un'aliquota di circa 400÷500 grammi per le analisi di laboratorio. In seguito si è proceduto alla caratterizzazione chimico-fisica di tutti i campioni, conducendo per ciascuno: l'analisi prossima, l'analisi ultima e la determinazione del potere calorifico, secondo quanto descritto nei paragrafi successivi. Ogni campione è stato analizzato in tre o cinque repliche in funzione del parametro considerato e, infine, sono state calcolate la media aritmetica e la deviazione standard dei valori ottenuti. Sono stati ottenuti tre tipi di risultati: il primo si riferisce alla biomassa fresca (come ricevuto), il secondo ai campioni essiccati e macinati e che hanno assorbito l'umidità atmosferica (come determinato), il terzo con riferimento alla sostanza secca. I risultati sono stati riferiti non solo alle singole porzioni dell'albero (tronco con corteccia, tronco senza corteccia e ramaglie) ma all'intero albero, impiegando le frazioni delle singole porzioni.

5.3.3 Caratterizzazione chimico-fisica

L'analisi prossima dei campioni polverizzati è stata eseguita mediante l'ausilio di un analizzatore termogravimetrico (modello TGA 701, Leco Corporation, MI, USA) secondo la norma ASTM D5142.

L'analisi elementare è stata eseguita con l'ausilio di un analizzatore di Carbonio, Idrogeno e Azoto (modello TruSpec CHN, Leco Corporation, MI, USA), seguendo la norma ASTM D5373, e del modulo aggiuntivo per la determinazione dello Zolfo, seguendo la norma ASTM D4239. L'ossigeno è stato determinato per differenza.

La determinazione del potere calorifico è stata eseguita con un calorimetro isoperibolico (modello AC500, Leco Corporation, MI, USA), seguendo la norma UNI EN 14918: 2009.

5.3.4 Valutazione del potenziale energetico del territorio

La stima della biomassa disponibile per scopi energetici nella Provincia dell'Ogliastra è stata condotta separatamente per le conifere e le latifoglie e in particolare 7 specie per la prima categoria e 4 per la seconda. Per definire il potere calorifico di ogni categoria forestale è stata calcolata la media dei poteri calorifici medi delle singole specie.

Per la valutazione del potenziale energetico sono stati considerati i poteri calorifici inferiori (PCI) sul campione su base umida, poiché corrispondenti alle condizioni che si riscontrano comunemente negli impianti di generazione di energia.

Il contenuto energetico delle biomasse idonee alla produzione di cippato è stato calcolato con riferimento a due condizioni:

- a. l'utilizzo di latifoglie e di conifere scortecciate
- b. l'utilizzo di latifoglie e di conifere non scortecciate.

Le stime sono state compiute per entrambe le ipotesi di utilizzazione, giacché la presenza di resina nella corteccia delle conifere può dare problemi di entità non trascurabile agli impianti di generazione. Infatti, spesso si riscontra negli impianti la formazione di catrami e incrostazioni causati dalla combustione incompleta.

Per la valutazione del potenziale energetico delle biomasse idonee alla produzione di legna da ardere, il calcolo è stato riferito alle sole latifoglie, mentre per la produzione di cippato sono state considerate sia le latifoglie sia le conifere.

Per la singola specie di conifera è stato calcolato il PCI medio fra esposizione Nord e Sud, sia prendendo in esame l'intera pianta con corteccia che ipotizzando che questa sia rimossa.

Il PCI medio è stato calcolato come media ponderale dei PCI del tronco con o senza corteccia e della ramaglia, sulla base delle relative percentuali di biomassa epigea.

Per le conifere questo calcolo è stato eseguito per ogni specie arborea, esposizione e nelle ipotesi di mantenere o rimuovere la corteccia. Al fine di ottenere i due PCI medi delle conifere non scortecciate e scortecciate, infine, è stata applicata la media dei poteri calorifici inferiori medi delle 7 specie. Per le latifoglie è stato eseguito lo stesso tipo di calcolo, prendendo in esame le 4 specie analizzate e con la media ponderata riferita solamente al tronco con corteccia e alla ramaglia.

Per quanto riguarda i boschi misti di conifere e latifoglie, non essendo nota la distribuzione delle due categorie forestali sul territorio, è stata applicata la media aritmetica dei poteri calorifici medi delle due categorie arboree.

Anche il potere calorifico inferiore medio per i boschi misti è stato stimato nelle due condizioni assunte per le conifere, ossia con il tronco scortecciato o non scortecciato.

Le percentuali di ripartizione delle varie componenti della biomassa epigea sono state stimate mediante l'attribuzione di valori medi misurati in cantieri forestali dell'Ente Foreste nella Provincia dell'Ogliastra e da tavole di cubatura, impiegando i dati dendrometrici misurati sulle piante utilizzate per le analisi di laboratorio.

In particolare, i valori assegnati a: *Pinus radiata*, *Pinus canariensis*, *Cedrus atlantica* e *Quercus ilex* sono riferiti a misure medie in cantieri dell'Ente Foreste in Ogliastra e sono identici per le esposizioni Nord e Sud. Per il leccio è stata calcolata la media fra le percentuali riferite a ceppaia e matricina.

Le percentuali assegnate a: *Pinus halepensis*, *Pinus pinea*, *Pinus pinaster*, *Pinus nigra* e *Eucalyptus* sono state ricavate dalle tavole di cubatura disponibili in letteratura (Tabacchi *et al.*, 2011), considerando separatamente le esposizioni Nord e Sud.

Per le specie arbustive (macchia mediterranea mista e corbezzolo) non è stato possibile reperire percentuali di ripartizione delle componenti epigee e si è stabilito di adoperare le percentuali riferite al leccio. È stato impiegato un valore del 43,65% per le ramaglie, mentre un valore del 56,35% per il tronco con corteccia.

5.3.5 Scelta della migliore tecnologia di conversione energetica impiegabile

L'impiego ottimale delle biomasse per scopi energetici richiede la scelta della migliore tecnologia di conversione disponibile con costi economicamente sostenibili e questo può essere ottenuto utilizzando un metodo decisionale multi attributo (MADM). Per la sua applicazione sono stati considerati: la valutazione delle biomasse, i dati che si riferiscono alla caratterizzazione e le soluzioni tecnologiche disponibili per la conversione energetica.

Per la scelta della migliore configurazione tecnica degli impianti è stato applicato il Metodo Pugh, noto anche come Metodo di convergenza controllata (Burge, 2009).

La metodologia MADM è rappresentata graficamente mediante una matrice nella quale le *j* colonne rappresentano le alternative (*concepts*), mentre le *i* righe sono i criteri.

Ci sono alcune differenze tra il Metodo Pugh e il metodo Score (Fishburn *et al.*, 1967). Infatti nel secondo metodo tutte le alternative sono classificate con riferimento a tutti i criteri e tutti i punteggi totali per ciascuna alternativa devono essere calcolati in funzione dell'importanza relativa di ciascun criterio per il raggiungimento degli

obiettivi prefissati. Nel Metodo Pugh invece si considera un'alternativa di riferimento forte (per esempio la tecnologia più diffusa nel mercato o *leader* del mercato) con la quale sono comparate tutte le alternative rispetto a ciascun criterio.

E' assegnato un + se l'alternativa j è migliore di quella di riferimento, è assegnato un - se l'alternativa è peggiore per un criterio i, mentre è assegnata una S se le due alternative hanno lo stesso valore rispetto al criterio in esame.

Se sono attribuiti dei pesi per classificare l'importanza relativa dei criteri prescelti per raggiungere gli obiettivi, deve essere condotta un'analisi di sensitività, ripetendo il calcolo variando i pesi assegnati.

I risultati del metodo Pugh dipendono dalle valutazioni del gruppo costituito da K esperti, infatti, è necessario che si raggiunga l'accordo totale tra loro sulle valutazioni che devono essere eseguite.

E' stato dimostrato che la scelta dell'alternativa di riferimento influenza la validità dei risultati, pertanto è molto importante sceglierla con accuratezza. Infatti, la selezione di un riferimento debole può invalidare l'intero processo decisionale (Frey *et al.*, 2009). I valori P_{ij} in ciascuna cella della matrice sono inseriti come indicato di seguito:

- Se tutti i valutatori sono d'accordo con l'affermazione " l'alternativa j è migliore di quella di riferimento per il criterio i" è assegnato un +;
- Se tutti i valutatori sono d'accordo con l'affermazione " l'alternativa j è peggiore di quella di riferimento per il criterio i" è assegnato un -;
- Se non c'è accordo tra i valutatori o emerge che due alternative hanno la stessa importanza rispetto ad un criterio i, è assegnata una S;

Al termine di ciclo di calcolo sono sommati, infine, tutti i punteggi (+, -, S) per ciascuna alternativa. In genere il primo ciclo di calcoli non conduce al raggiungimento degli obiettivi (in particolare se è valutato un elevato numero di alternative), ma può risultare necessario reiterare il calcolo due o più volte, eliminando in ciascuna le alternative deboli.

Per eliminare alcune alternative tra due cicli di valutazione della matrice Pugh sono impiegati approcci differenti: per esempio si può eliminare un'alternativa X che è influenzata in modo importante da un'altra Y per uno o più criteri e che non è migliore di Y per i restanti criteri.

Durante la valutazione successiva della matrice, l'alternativa di riferimento è sostituita, impiegando per esempio l'alternativa che riportato il maggiore numero di + nel calcolo precedente. Nel caso particolare della scelta della migliore tecnologia di conversione energetica per le biomasse forestali dell'Ogliastra, sono stati presi in considerazione le alternative e i criteri mostrati nelle Tab.43 e 44.

Alternativa	Codifica
Combustione: caldaia +ORC	A
Pirolisi+MCI	B
Gassificazione+MCI	C
Piro-gassificazione+MCI	D

Tabella 43: Alternative per l'impiego del metodo MADM.

Per i criteri è stata applicata una scala di valutazione pari a 100 punti. Il criterio più importante per il caso in studio è la disponibilità di impianti di piccola taglia per via

della quantità limitata di biomasse disponibili. Per questa ragione a esso è stato assegnato il peso più elevato. I costi di investimento sono al secondo posto in ordine di importanza.

Criterio	Punteggio (Peso)
Disponibilità di impianti su piccola scala	25
Caratteristiche delle materie prime	5
Tecnologia consolidata	9
Rendimento	5
Necessità di apparecchiature ausiliarie	3
Facilità di gestione e manutenzione	4
Necessità di raffinazione dei prodotti	2
Impatto ambientale	10
Necessità di operatori specializzati	5
Costi di investimento	12
Costi di processo	10
Tempo di ritorno dell'investimento	10

Tabella 44: Criteri per l'impiego del metodo MADM.

Infatti, per le particolari condizioni socio-economiche della maggior parte della Sardegna, questo rappresenta un grande ostacolo allo sviluppo delle filiere biomasse legnose-energia. L'impatto ambientale, i costi di processo e i tempi di ritorno dell'investimento hanno la stessa importanza e sono di poco preceduti dai costi di investimento dal punto di vista della particolare economia locale.

Il consolidamento della tecnologia riveste una notevole importanza per via del fatto che, per piccole taglie di impianto, alcune tecnologie risultano ancora non del tutto affidabili perché scarsamente sviluppate su scala commerciale. Se si prendono in considerazione le caratteristiche delle materie prime (biomasse forestali) il peso attribuito è basso, poiché questi parametri non sono in generale un grosso problema per gli impianti di conversione. Essi, infatti, sono in grado di sopportare una certa variabilità nell'alimentazione e in ogni caso è possibile procedere al cambiamento di alcune caratteristiche mediante processi di essiccamento, macinazione, cippatura. Il rendimento e la necessità di operatori specializzati hanno la stessa importanza dei criteri sopraccitati. Agli ultimi tre criteri sono stati attribuiti i pesi inferiori perché presentano una minore rilevanza se confrontati con gli altri.

L'alternativa di riferimento prescelta per sviluppare la matrice Pugh è stata la "caldaia a cippato" abbinata con un ciclo ORC che rappresenta in Italia la tecnologia più comune per impianti di piccola taglia.

5.4 Risultati e discussione

Le biomasse legnose sono state suddivise in due gruppi: conifere e latifoglie. In base alla classificazione dei biocombustibili solidi del CTI (2000, 2004), la macchia mediterranea appartiene al livello 4: Arbusti (Raccomandazione CTI elaborata dal SC 9 "Fonti rinnovabili di energia" - R 04/5).

Per confrontare i risultati ottenuti con i dati disponibili nella letteratura, sono stati utilizzati i coefficienti di biomassa epigea, in altre parole le percentuali delle diverse parti della pianta quali ramaglie, tronco con corteccia e tronco senza corteccia, in funzione dei dati dendrometrici (diametro, altezza della pianta).

La separazione fra tronco con corteccia e tronco senza corteccia è importante per l'impiego di alcune specie arboree quali i pini, caratterizzati da elevati quantitativi di sostanze resinose. In genere, questi sono liberati dalla corteccia prima di essere alimentati agli impianti di combustione per evitare l'intasamento e l'incrostazione delle griglie di trasporto. I risultati della caratterizzazione sono stati espressi su base umida che rappresenta la condizione reale di utilizzo delle biomasse forestali negli impianti di conversione energetica. Nella Tab.45 sono riportati i risultati dell'analisi prossima relativa alle conifere nelle diverse componenti (tronco con e senza corteccia, ramaglie), come media dei campioni prelevati con esposizione a nord e a sud.

Nella Tab.46 sono riportati i risultati dell'analisi delle sostanze volatili e del Carbonio fisso relativi alle conifere nelle diverse componenti (tronco con e senza corteccia, ramaglie). Tra le conifere, il campione con il maggiore contenuto di umidità, (55,29%) è la frazione tronco con corteccia del *Pinus pinaster*.

	Umidità %	Solidi totali %	Ceneri %
<i>Pinus pinaster (a)</i>	55,29	44,71	0,21
<i>Pinus pinaster (b)</i>	55,41	44,59	0,11
<i>Pinus pinaster (c)</i>	50,50	49,50	0,82
<i>Pinus halepensis (a)</i>	30,81	69,19	0,46
<i>Pinus halepensis (b)</i>	30,83	69,17	0,32
<i>Pinus halepensis (c)</i>	29,61	70,39	1,31
<i>Pinus pinea(a)</i>	53,00	47,00	0,35
<i>Pinus pinea (b)</i>	48,65	51,35	0,16
<i>Pinus pinea (c)</i>	37,47	62,53	1,15
<i>Pinus nigra (a)</i>	47,11	52,89	0,19
<i>Pinus nigra (b)</i>	45,92	54,08	0,12
<i>Pinus nigra (c)</i>	41,96	58,04	1,11
<i>Pinus radiata (a)</i>	48,91	51,09	0,24
<i>Pinus radiata (b)</i>	50,83	49,17	0,15
<i>Pinus radiata (c)</i>	46,33	53,67	1,03
<i>Pinus canariensis (a)</i>	41,59	58,41	0,42
<i>Pinus canariensis (b)</i>	41,05	58,95	0,20
<i>Pinus canariensis (c)</i>	32,44	67,56	1,67
<i>Cedrus atlantica (a)</i>	53,89	46,11	0,52
<i>Cedrus atlantica (b)</i>	53,77	46,23	0,17
<i>Cedrus atlantica (c)</i>	45,75	54,25	2,61

Tabella 46: Umidità, solidi totali e ceneri per le conifere con corteccia(a), senza corteccia (b) e per le ramaglie (c).

Invece, il tenore in umidità minore è stato riscontrato nei campioni di *Pinus halepensis* (per il tronco senza corteccia). Tra i campioni appartenenti alla famiglia delle latifoglie e alla macchia mediterranea, la massima percentuale di umidità misurata è stata del 44,67% per le ramaglie con tronco con corteccia di *Eucalyptus*. In generale, nei campioni di latifoglie analizzati, è stato riscontrato un maggiore tenore di umidità nel tronco con corteccia rispetto alle ramaglie.

Il tenore di umidità nei campioni con esposizione Nord è stato leggermente più elevato rispetto a quello dei campioni con esposizione Sud. In generale, il tenore di umidità delle specie analizzate è compreso tra il 22,46% e il 58,08%. L'umidità è un parametro importante perché influenza negativamente il PCI, porta ad un incremento del peso specifico delle biomasse con riflessi negativi sui costi di trasporto.

Le biomasse derivanti dalle conifere analizzate contengono una percentuale elevata di sostanze volatili, con un valore massimo di 55,81% per il *Pinus halepensis* e uno minimo di 35,62% per il *Pinus pinaster*.

Le biomasse derivanti dalle latifoglie e dalla macchia mediterranea hanno un contenuto di sostanze volatili maggiore rispetto alle conifere, con valori compresi tra il 42,51% e il 58,75%. Il tenore in ceneri è inferiore all'1% per la gran parte dei campioni con e senza corteccia, mentre è superiore a questo valore per alcuni campioni di ramaglie.

	Sostanze volatili %	Carbonio fisso %
<i>Pinus pinaster (a)</i>	35,62	18,92
<i>Pinus pinaster (b)</i>	36,40	17,79
<i>Pinus pinaster (c)</i>	38,00	20,53
<i>Pinus halepensis (a)</i>	54,56	19,72
<i>Pinus halepensis (b)</i>	55,81	18,15
<i>Pinus halepensis (c)</i>	53,53	21,24
<i>Pinus pinea(a)</i>	36,27	21,11
<i>Pinus pinea (b)</i>	41,39	18,15
<i>Pinus pinea (c)</i>	46,40	23,08
<i>Pinus nigra (a)</i>	42,90	17,71
<i>Pinus nigra (b)</i>	44,48	16,78
<i>Pinus nigra (c)</i>	44,79	20,15
<i>Pinus radiata (a)</i>	40,33	19,61
<i>Pinus radiata (b)</i>	39,97	17,48
<i>Pinus radiata (c)</i>	40,18	21,83
<i>Pinus canariensis (a)</i>	44,74	22,03
<i>Pinus canariensis (b)</i>	47,27	18,64
<i>Pinus canariensis (c)</i>	50,65	21,44
<i>Cedrus atlantica (a)</i>	36,01	19,57
<i>Cedrus atlantica (b)</i>	36,98	18,64
<i>Cedrus atlantica (c)</i>	40,84	18,95

Tabella 57: Sostanze volatili e carbonio fisso per le conifere con corteccia (a), senza corteccia (b) e per le ramaglie (c).

I valori maggiori sono stati riscontrati per l'*Eucalyptus* (3,30%) e per il *Cedrus atlantica* (2,61%). In generale, considerando il tronco con corteccia, le latifoglie presentano un contenuto in ceneri superiore rispetto a quello delle conifere. In termini di frazione combustibile le biomasse analizzate presentano un'elevata concentrazione di sostanze volatili, se confrontata con quella del carbone, che potrebbe dare problemi di stabilità della fiamma nel corso della combustione (Demirbaş *et al.*, 2003).

Nella Tab.47 sono riportati i risultati dell'analisi prossima relativa alle latifoglie nelle diverse componenti (tronco con e senza corteccia, ramaglie), come media dei campioni prelevati con esposizione a Nord e a Sud.

Nella Tab.48 sono riportati i risultati dell'analisi delle sostanze volatili e del Carbonio fisso relativi alle latifoglie nelle diverse componenti (tronco con e senza corteccia, ramaglie) come media dei campioni prelevati con esposizione a Nord e a Sud.

I risultati dell'analisi ultima, condotta sui campioni tal quali, sono riportati nella Tab.49 per le conifere e nella Tab.50 per le latifoglie. In tutti i campioni analizzati lo Zolfo è presente in tracce e la concentrazione maggiore è rilevata nel *Pinus canariensis* (0,11 %), nella macchia mediterranea (0,08%) e nell'*Eucalyptus* (0,10 %). Anche l'Azoto è presente in concentrazioni molto basse. Infatti, nelle conifere il contenuto medio è dello 0,19%, mentre nelle latifoglie e nella macchia mediterranea è dello 0,28%.

	Umidità %	Solidi totali %	Ceneri %
<i>Quercus ilex</i> (a)	35,22	64,78	0,81
<i>Quercus ilex</i> (b)	34,94	65,06	1,56
<i>Arbutus unedo</i> (a)	38,86	61,14	0,54
<i>Arbutus unedo</i> (b)	39,95	60,05	1,37
Macchia mediterranea (a)	31,06	68,94	0,77
Macchia mediterranea(b)	23,71	76,29	1,55
<i>Eucalyptus</i> (a)	44,67	55,33	1,12
<i>Eucalyptus</i> (b)	23,20	76,80	3,30

Tabella 47: Umidità, solidi totali e ceneri per le latifoglie con corteccia (a) e per le ramaglie (b).

	Sostanze volatili %	Carbonio fisso %
<i>Quercus ilex</i> (a)	51,32	18,68
<i>Quercus ilex</i> (b)	48,76	21,55
<i>Arbutus unedo</i> (a)	48,37	19,02
<i>Arbutus unedo</i> (b)	45,45	20,83
Macchia mediterranea (a)	54,15	19,82
Macchia mediterranea(b)	58,75	20,44
<i>Eucalyptus</i> (a)	42,51	20,66
<i>Eucalyptus</i> (b)	57,69	20,20

Tabella 48: Sostanze volatili e carbonio fisso per le latifoglie con corteccia (a), e per le ramaglie (b).

I valori del PCI, sia su base umida sia su base secca, relativi alle conifere nelle diverse componenti (tronco con e senza corteccia, ramaglie) sono riportati nella Tab.51, mentre nelle latifoglie nella Tab.52.

I valori più elevati del PCI su base umida per le conifere sono stati riscontrati per le ramaglie del *Pinus halepensis* (13,11 MJ·kg_{ss}⁻¹) e del *Pinus canariensis* (12,28 MJ·kg_{ss}⁻¹).

I valori più elevati del PCI su base umida per le latifoglie sono stati riscontrati per ramaglie della macchia mediterranea (13,67 kg_{ss}⁻¹) e dell'*Eucalyptus* (12,81 kg_{ss}⁻¹).

La forte dipendenza tra il contenuto in carbonio su base umida e il PCI è mostrata nella Fig.44. Generalmente le biomasse forestali presentano alti contenuti in Ossigeno, mentre lo zolfo è presente in tracce. Il rapporto H/C è in relazione al contenuto di lignina (per quanto riguarda cellulosa ed emicellulosa). Le biomasse legnose con il 20% di lignina hanno un rapporto H/C di 0,1. Per tutte le biomasse legnose prese in considerazione nello studio il contenuto di lignina è molto vicino a questo valore. Tanto più elevati sono i rapporti H/C e O/C, maggiori risultano i valori di PCS e del potere calorifico effettivo. Il rapporto H/C presenta valori costanti per tutte le specie analizzate e per tutte le parti degli alberi, mentre il rapporto O/C si presenta con una variabilità maggiore (Tab.53 e Tab.54).

	C %	H %	N %	S %
<i>Pinus pinaster</i> (a)	24,54	2,85	0,06	0,01
<i>Pinus pinaster</i> (b)	24,21	2,86	0,34	0,02
<i>Pinus pinaster</i> (c)	28,00	3,33	0,04	0,04
<i>Pinus halepensis</i> (a)	37,15	4,37	0,10	0,02
<i>Pinus halepensis</i> (b)	36,80	4,39	0,10	0,02
<i>Pinus halepensis</i> (c)	39,50	4,56	0,40	0,05
<i>Pinus pinea</i> (a)	26,14	2,93	0,07	0,01
<i>Pinus pinea</i> (b)	28,10	3,37	0,08	0,02
<i>Pinus pinea</i> (c)	35,01	3,91	0,37	0,04
<i>Pinus nigra</i> (a)	29,13	3,48	0,09	0,01
<i>Pinus nigra</i> (b)	29,73	3,63	0,08	0,01
<i>Pinus nigra</i> (c)	32,77	3,87	0,44	0,04
<i>Pinus radiata</i> (a)	27,98	3,27	0,08	0,02
<i>Pinus radiata</i> (b)	26,48	3,25	0,07	0,02
<i>Pinus radiata</i> (c)	30,10	3,63	0,40	0,04
<i>Pinus canariensis</i> (a)	31,86	3,60	0,11	0,05
<i>Pinus canariensis</i> (b)	32,01	3,73	0,10	0,06
<i>Pinus canariensis</i> (c)	36,97	4,44	0,52	0,11
<i>Cedrus atlantica</i> (a)	24,56	3,01	0,12	0,03
<i>Cedrus atlantica</i> (b)	24,71	3,02	0,09	0,01
<i>Cedrus atlantica</i> (c)	28,66	3,48	0,40	0,06

Tabella 49: Contenuto di C, H, N, S per le conifere con corteccia (a), senza corteccia (b) e per le ramaglie (c).

Comparando i risultati ottenuti per le biomasse forestali dell'Ogliastra con il diagramma di Van Krevelen (Ptasinski *et al.*, 2007) si può osservare come i campioni

analizzati siano esterni all'area biomasse (e al di sotto di questa), a causa del basso rapporto H/C e dell'elevato rapporto O/C.

	C %	H %	N %	S %
<i>Quercus ilex</i> (a)	33,51	4,06	0,16	0,02
<i>Quercus ilex</i> (b)	35,04	4,15	0,57	0,04
<i>Arbutus unedo</i> (a)	32,30	3,81	0,11	0,02
<i>Arbutus unedo</i> (b)	32,57	3,89	0,36	0,03
Macchia mediterranea (a)	36,62	4,20	0,17	0,07
Macchia mediterranea (b)	41,06	4,67	0,39	0,08
<i>Eucalyptus</i> (a)	28,97	3,20	0,11	0,06
<i>Eucalyptus</i> (b)	39,55	4,37	0,38	0,10

Tab.50 Contenuto di C, H, N, S per le latifoglie con corteccia (a) e per le ramaglie (b).

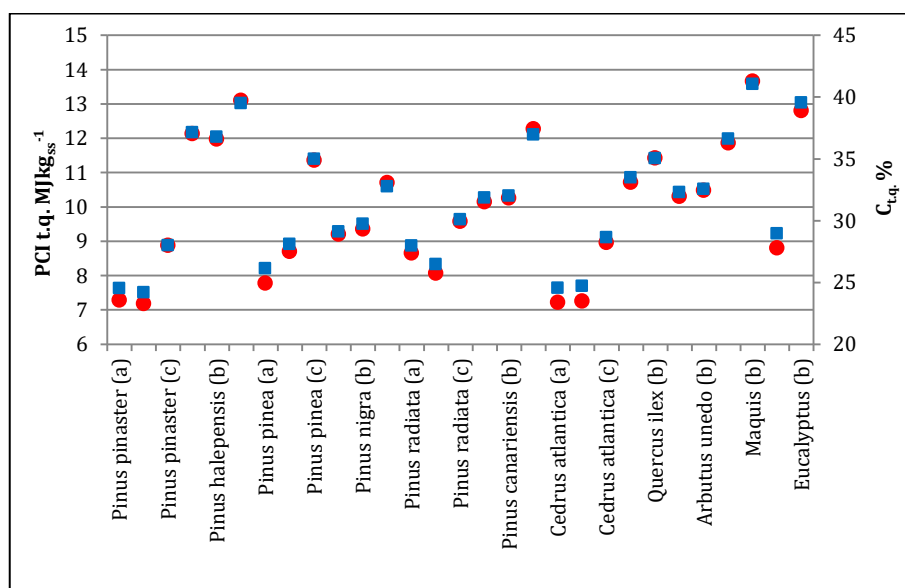


Figura 44: Relazione tra Carbonio % e Potere Calorifico Inferiore.

	PCI_{tq} MJ·kg ⁻¹	PCI_{ss} MJ·kg ⁻¹
<i>Pinus pinaster</i> (a)	7,29	19,32
<i>Pinus pinaster</i> (b)	7,19	19,16
<i>Pinus pinaster</i> (c)	8,88	20,44
<i>Pinus halepensis</i> (a)	12,14	18,64
<i>Pinus halepensis</i> (b)	11,98	18,41
<i>Pinus halepensis</i> (c)	13,11	19,6
<i>Pinus pinea</i> (a)	7,78	19,31
<i>Pinus pinea</i> (b)	8,71	19,26
<i>Pinus pinea</i> (c)	11,36	19,64
<i>Pinus nigra</i> (a)	9,21	19,59
<i>Pinus nigra</i> (b)	9,36	19,40
<i>Pinus nigra</i> (c)	10,71	20,21
<i>Pinus radiata</i> (a)	8,66	19,29
<i>Pinus radiata</i> (b)	8,07	18,96
<i>Pinus radiata</i> (c)	9,58	19,97
<i>Pinus canariensis</i> (a)	10,15	19,13
<i>Pinus canariensis</i> (b)	10,26	19,08
<i>Pinus canariensis</i> (c)	12,28	19,36
<i>Cedrus atlantica</i> (a)	7,22	18,52
<i>Cedrus atlantica</i> (b)	7,26	18,56
<i>Cedrus atlantica</i> (c)	8,97	18,56

Tabella 51: PCI su base umida (tq) e su base secca (ss) per le conifere con corteccia (a), senza corteccia (b) e per le ramaglie (c).

	PCI_{tq} MJ·kg ⁻¹	PCI_{ss} MJ·kg _{ss} ⁻¹
<i>Quercus ilex</i> (a)	10,72	17,89
<i>Quercus ilex</i> (b)	11,43	18,89
<i>Arbutus unedo</i> (a)	10,31	18,41
<i>Arbutus unedo</i> (b)	10,49	19,09
Macchia mediterranea (a)	11,87	18,32
Macchia mediterranea (b)	13,67	18,68
<i>Eucalyptus</i> (a)	8,81	18,00
<i>Eucalyptus</i> (b)	12,81	17,42

Tabella 52: PCI su base umida (tq) e su base secca (ss) per le latifoglie con corteccia (a), e per le ramaglie (b).

	H/C	O/C
<i>Pinus pinaster</i> (a)	0,12	0,73
<i>Pinus pinaster</i> (b)	0,12	0,79
<i>Pinus pinaster</i> (c)	0,12	0,81
<i>Pinus halepensis</i> (a)	0,12	0,73
<i>Pinus halepensis</i> (b)	0,12	0,80
<i>Pinus halepensis</i> (c)	0,12	0,82
<i>Pinus pinea</i> (a)	0,11	0,73
<i>Pinus pinea</i> (b)	0,11	0,77
<i>Pinus pinea</i> (c)	0,12	0,79
<i>Pinus nigra</i> (a)	0,12	0,70
<i>Pinus nigra</i> (b)	0,12	0,78
<i>Pinus nigra</i> (c)	0,12	0,78
<i>Pinus radiata</i> (a)	0,12	0,76
<i>Pinus radiata</i> (b)	0,12	0,80
<i>Pinus radiata</i> (c)	0,12	0,83
<i>Pinus canariensis</i> (a)	0,12	0,79
<i>Pinus canariensis</i> (b)	0,11	0,77
<i>Pinus canariensis</i> (c)	0,12	0,80
<i>Cedrus atlantica</i> (a)	0,12	0,85
<i>Cedrus atlantica</i> (b)	0,12	0,86
<i>Cedrus atlantica</i> (c)	0,12	0,85

Tabella 53: Rapporti H/C e O/C per le conifere con corteccia(a), senza corteccia (b) e per le ramaglie (c).

	H/C	O/C
<i>Quercus ilex</i> (a)	0,12	0,82
<i>Quercus ilex</i> (b)	0,12	0,89
<i>Arbutus unedo</i> (a)	0,12	0,82
<i>Arbutus unedo</i> (b)	0,12	0,87
Macchia mediterranea (a)	0,11	0,79
Macchia mediterranea (b)	0,11	0,81
<i>Eucalyptus</i> (a)	0,11	0,86
<i>Eucalyptus</i> (b)	0,11	0,84

Tabella 54: Rapporti H/C e O/C per le latifoglie con corteccia(a) e per le ramaglie (b).

5.3.4 Valutazione del potenziale energetico del territorio

Per valutare il potenziale energetico massimo dell'Ogliastra è stato necessario calcolare i poteri calorifici medi per ciascuna classe forestale (conifere, latifoglie, macchia mediterranea, arbusti). Per applicare la media ponderata tra i PCI su tal quale e i coefficienti indicati in precedenza, sono stati considerati i coefficienti relativi alla biomassa epigea. Essi rappresentano la percentuale delle differenti sezioni di un albero in funzione dei dati dendrometrici.

Per alcune specie forestali (per esempio il leccio) è stato possibile impiegare i dati dendrometrici misurati in Ogliastra da parte del gestore dei boschi dell'isola (Ente Foreste della Sardegna). In altri casi sono stati presi come riferimento i dati delle tabelle relative foreste italiane (Tabacchi *et al.*, 2011).

Per le conifere è stata considerata una percentuale di corteccia pari al 12,5% (FAO 2000). I coefficienti per la biomassa epigea di *Quercus ilex*, *Pinus radiata*, *Pinus canariensis* e *Cedrus atlantica* riguardano le misurazioni eseguite nelle foreste dell'Ogliastra e sono gli stessi sia per l'esposizione a Nord che per quella a Sud. In particolare, per il leccio è stato considerato un valore medio tra troncone e alberello.

Per il *Pinus halepensis*, *Pinus pinea*, *Pinus pinaster*, *Pinus nigra*, ed *Eucalyptus* le percentuali epigee sono state ricavate dalle tabelle FAO per l'esposizione Nord e Sud. Per la macchia mediterranea e corbezzolo, non essendo disponibili i coefficienti che si riferiscono alla biomassa epigea, sono stati applicati i coefficienti utilizzati per il leccio.

Per la produzione di cippato di legno sono state, ipotizzate per il potenziale energetico massimo due possibilità di impiego:

- L'uso di latifoglie e conifere senza corteccia;
- L'uso di latifoglie e conifere con la corteccia.

Per la legna da ardere il potenziale energetico è stato calcolato considerando solamente le latifoglie.

Il potere calorifico inferiore per ciascuna specie di conifere è stato ottenuto facendo la media aritmetica tra i valori relativi all'esposizione Nord e Sud.

I valori di PCI per le esposizioni Nord e Sud sono stati calcolati impiegando il valore del PCI dei tronchi con e senza corteccia e delle ramaglie. E' stata eseguita la media ponderata dei coefficienti relativi alla biomassa epigea di ciascuna specie di conifera.

Il valore di PCI medio della classe conifere per ciascuna ipotesi di impiego è stato ottenuto come media aritmetica dei PCI delle 7 specie esaminate.

Per le latifoglie è stata impiegata la stessa procedura utilizzando i tronchi senza corteccia e le ramaglie delle 4 specie considerate.

E' importante osservare che, benché le ramaglie possiedano un potere calorifico superiore alle altre parti della pianta, presentano alcune criticità legate al loro utilizzo come combustibile: infatti, il cippato con ramaglie contiene un'elevata quantità di polveri che rendono difficile la conservazione dello stesso e produce una maggior quantità di ceneri rispetto al cippato ottenuto solamente da tronchi. Per contro, la cippatura consente il recupero di parti della pianta difficilmente recuperabili come assortimenti (tale quota rappresenta circa il 15-20% della biomassa ritratta), che normalmente sono lasciate nel bosco, andando a incrementare il carico d'incendio.

Non è stato possibile avere la distribuzione spaziale relativa delle due principali classi forestali nelle foreste miste di conifere e latifoglie per cui è stata applicata una media aritmetica considerando la stessa percentuale. I valori finali di PCI sono riportati nella Tab.55.

Per il calcolo del potenziale energetico annuale delle foreste dell'Ogliastra è stato fatto riferimento alle biomasse destinate alla legna da ardere e alla produzione di cippato.

I valori di PCI indicati nella Tab.55 sono stati moltiplicati per la quantità di biomasse fresche espressa in tonnellate.

Il potenziale energetico complessivo è di 125,1 GWh a⁻¹ nel caso dell'utilizzo di conifere non scortecciate, mentre nel caso si utilizzino conifere scortecciate il potenziale totale è di circa 124,6 GWh a⁻¹, con una differenza fra i due risultati di 0,5 GWh (Tab.56).

Classe forestale	PCI_{t,q.} MJ·kg⁻¹
Conifere con corteccia	9,40
Conifere senza corteccia	9,32
Latifoglie	10,87
Foreste miste di conifere con corteccia e latifoglie	10,13
Foreste miste di conifere senza corteccia e latifoglie	10,10

Tabella 55: Potere calorico sul tal quale di conifere con e senza corteccia, latifoglie, foreste miste di conifere (con o senza corteccia) e latifoglie.

Tale dato rappresenta la massima energia contenuta nella biomassa stimata. Tenendo conto del fatto che non è stato possibile considerare nel modello di stima il fattore limitante dell'accessibilità, poiché non è al momento disponibile una mappatura aggiornata e adeguatamente dettagliata della viabilità forestale, le quantità di biomassa sono inferiori rispetto a quelle calcolate nel presente lavoro, con conseguente riduzione del potenziale energetico rispetto a quello descritto in precedenza.

Inoltre, se si osserva la carta delle aree vocate per l'utilizzo di biomasse come legna da ardere o cippato, appare chiaro che non tutta la biomassa stimata può essere realmente utilizzata. Infatti, in molte aree le biomasse ritraibili sono distribuite in modo eccessivamente frammentario e la loro asportazione, finalizzata all'alimentazione di un ipotetico unico impianto in territorio provinciale, risulterebbe fortemente antieconomica. I costi di taglio, esbosco e trasporto alla centrale incidono notevolmente sulla costituzione di un'ipotetica filiera biomasse legnose-energia e di ciò occorre tenere conto nella pianificazione della stessa. Per progettare gli interventi di utilizzazione energetica della biomassa dal punto di vista della sostenibilità ambientale, sociale ed economica, è opportuno che l'impiego della biomassa avvenga vicino al suo luogo di produzione (filiera corta).

Biomasse per la produzione di cippato	Potenziale energetico annuale MJ	Potenziale energetico annuale GWh
Conifere senza corteccia e latifoglie	290.139.072	80,6
Conifere con corteccia e latifoglie	288.450.914	80,1
Biomasse per la produzione di legna da ardere		
Latifoglie	160.140.276	44,5

Tabella 56: Potenziale energetico annuale delle biomasse per cippato e legna da ardere in Ogliastra.

Nella Provincia dell'Ogliastra non sono in questo momento presenti impianti di utilizzazione energetica delle biomasse legnose. Vi è, comunque, un progetto di sviluppo agro-industriale che prevede la raccolta e la valorizzazione di residui agricoli, agro-industriali e forestali che impiegherà la tecnologia della gassificazione a Ossigeno e troverà localizzazione nel Comune di Barisardo.

Per quanto attiene alla possibilità di localizzare impianti di produzione dell'energia alimentati con biomasse forestali in Ogliastra, dalla carta della disponibilità di biomasse (Fig.45a) si deduce che potranno essere realizzati impianti di piccola taglia.

Tali impianti, alimentati da biomasse prelevate secondo criteri che tengano conto delle condizioni e della densità della rete viaria locale, garantiranno il soddisfacimento del fabbisogno energetico di piccoli edifici (scuole, uffici), non solo nel rispetto della sostenibilità dei prelievi di legname e degli equilibri ecosistemici del sistema bosco, ma anche in base alle caratteristiche peculiari del tessuto socio-economico del territorio ogliastrino. La mappa delle aree vocate alla produzione di cippato e legna da ardere consente di definire alcune aree nelle quali la disponibilità di cippato può consentire l'installazione di piccoli impianti. La maggiore disponibilità di biomassa per cippato è concentrata in particolar modo nelle 4 aree cerchiare in Fig.45b.

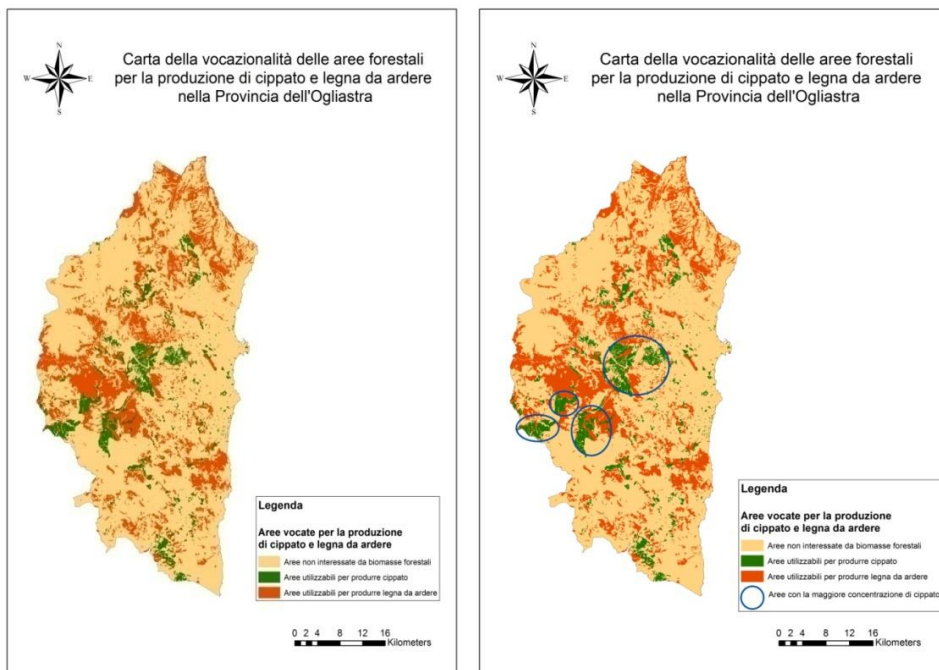


Figura 45: Carta della disponibilità di biomasse in Ogliastra a), Zone con la maggiore vocazionalità b).

In base alla stima delle biomasse distinte per singoli Comuni della Provincia, è stato possibile calcolare i potenziali energetici annui per il cippato da latifoglie e conifere scortecciate e non e per la legna da ardere per ciascuno di essi (Tab.57).

Il Comune col potenziale energetico più elevato, sia per quanto riguarda le biomasse da cippato che quella da legna da ardere, è Seui, con circa 21 GWh a⁻¹ di energia primaria contenuta nel potenziale combustibile. I Comuni di: Seui, Arzana, Villagrande Strisaili,

Ulassai, Ussassai, Baunei, Ierzu e Gairo hanno potenziali energetici da cippato maggiori rispetto agli altri Comuni della Provincia.

Comune	Piante non scortecciate [GWh a ⁻¹]	Piante scortecciate [GWh a ⁻¹]	Legna da ardere [GWh a ⁻¹]	Piante non scortecciate e da legna da ardere [GWh a ⁻¹]	Piante scortecciate e da legna da ardere [GWh a ⁻¹]
ARZANA	12,41	12,48	2,00	14,41	14,49
BARISARDO	1,86	1,87	0,25	2,11	2,12
BAUNEI	3,39	3,41	6,01	9,39	9,41
CARDEDU	1,07	1,08	1,24	2,32	2,32
ELINI	0,21	0,21	0,11	0,32	0,32
GAIRO	3,51	3,53	2,63	6,14	6,16
GIRASOLE	0,27	0,28	0,02	0,29	0,29
ILBONO	0,66	0,67	0,34	1,00	1,01
JERZU	6,92	6,96	2,52	9,44	9,48
LANUSEI	2,99	3,01	1,24	4,23	4,25
LOCERI	0,13	0,13	0,33	0,47	0,47
LOTZORAI	0,36	0,36	0,14	0,50	0,50
OSINI	1,30	1,31	2,19	3,49	3,50
PERDASDEFOGU	0,92	0,92	1,60	2,51	2,52
SEUI	15,33	15,43	5,49	20,82	20,92
TALANA	2,50	2,52	2,06	4,56	4,58
TERTENIA	2,91	2,93	1,76	4,67	4,68
TORTOLI'	2,32	2,34	0,24	2,56	2,57
TRIEI	0,68	0,68	0,47	1,14	1,15
ULASSAI	6,47	6,51	2,37	8,85	8,89
URZULEI	0,10	0,10	3,47	3,57	3,57
USSASSAI	6,98	7,02	1,86	8,83	8,88
VILLAGRANDE STRISAILI	6,82	6,86	6,17	12,99	13,03

Tabella 57: Potenziale energetico distinto per tipologia di utilizzo della biomassa in ciascun Comune della Provincia Ogliastra.

Per quanto riguarda, invece, la sola legna da ardere, i maggiori potenziali energetici si ritrovano nei Comuni di Baunei, Seui e Villagrande Strisaili. Al fine di rappresentare le potenzialità della Provincia dell'Ogliastra per lo sviluppo di filiere locali a cippato, si può indicare a titolo di esempio l'energia elettrica e termica ottenibile dall'installazione di impianti che lavorino in assetto cogenerativo. Se, partendo dal potenziale energetico riportato nella Tab.56 (80,6 GWh), si considera un ipotetico impianto di conversione energetica di biomassa legnosa con un rendimento elettrico pari al 15% e un rendimento termico del 70% (rendimento globale di cogenerazione dell'85%), che funzioni per 8.000 ore annue: dalle biomasse stimate per la produzione di cippato si

possono ottenere circa 1,5 MW_e e 7 MW_t per una potenza totale in cogenerazione di 8,5 MW. Se si ipotizzasse l'installazione di 10 impianti di cogenerazione con i rendimenti sopra elencati, ciascuno produrrebbe circa 150 kW_e. Tuttavia i rendimenti sono orientativi poiché dipendono in misura rilevante dalla taglia e dalla tecnologia degli impianti.

Peraltro la possibilità di sfruttare effettivamente l'elevata produzione termica di tali cogeneratori è fortemente legata alla disponibilità di adeguate utenze termiche in prossimità degli impianti. A tale proposito è opportuno osservare che gli impianti di cogenerazione di piccola taglia hanno sicuramente maggiori probabilità di riuscire a intercettare una domanda termica.

In linea di massima con i valori sopra riportati si può immaginare una caldaia abbinata a un ciclo ORC o anche un gassificatore abbinato a un motore a combustione interna. L'utilizzo delle biomasse forestali in piccoli co-generatori consentirebbe, infatti, di valorizzare al meglio il potenziale energetico del territorio. Un aspetto importante da valutare è il costo di approvvigionamento delle biomasse. Esso varia a seconda che si consideri legna da ardere, cippato o *pellet*. I costi a quintale per le tre tipologie di combustibile sono riportati nella Tab.58. Considerando il fatto che i prezzi delle diverse forme commerciali delle biomasse sono sensibili alle fluttuazioni di mercato, si può valutare l'opportunità di installare caldaie combinate (per esempio le caldaie a cippato e/o *pellet* o le caldaie a legna e/o *pellet*). Per tutte le considerazioni fatte sulla sostenibilità dei prelievi di legname, sulle specificità socio-economiche del territorio esaminato e sulla fattibilità tecnico-economica dell'utilizzo delle migliori tecnologie impiantistiche per la produzione energetica da biomasse forestali, è auspicabile l'installazione di piccoli impianti a servizio di piccole utenze. In questo modo si incentiverebbe l'autoefficienza energetica senza che venga meno la qualità dell'ambiente e sarebbe anche più facile intercettare la domanda di energia termica.

Tipologia di combustibile	Costo € q ⁻¹
Legna da ardere	11÷13
Cippato	8÷12
<i>Pellet</i>	15÷35

Tabella 58: Costi a quintale del legna da ardere, del cippato e del pellet (Riva, 2008).

Per quanto concerne la scelta della migliore tecnologia di conversione energetica il metodo decisionale multi attributo ha fornito i risultati illustrati di seguito. Nella Tab.59 è mostrata la matrice Pugh costruita secondo i criteri descritti al punto 5.3.5. Moltiplicando i punteggi ottenuti nella Tab.59 con i pesi attribuiti a ciascun criterio e sommando questi valori per ciascuna alternativa si ottengono i risultati riportati nelle Tabb.60 e 61. Escludendo le alternative che hanno un rapporto +/- pari ad almeno 2:1 (Frei *et al.*, 2009), rimane la solamente l'alternativa A, peraltro con qualità simili a quella impiegata quale riferimento. In base a questi dati non si può asserire che la caldaia alimentata con tronchi sia la migliore tecnologia impiegabile nel caso in studio perché solamente per 2 dei 12 criteri impiegati è risultata migliore della caldaia a cippato. Comunque il risultato rilevante è rappresentato dal fatto che la combustione con l'impiego di impianti di piccola taglia è la scelta più adatta per un territorio come quello dell'Oglastra. L'esecuzione dell'analisi di sensitività sui pesi attribuiti ai criteri ha consentito di comprendere l'importanza di questa parte della preparazione della matrice sulla qualità finale dei risultati. Si è notato, in generale, che i

cambiamenti dei pesi dei criteri non hanno modificato sostanzialmente i risultati. Escludendo la disponibilità di impianti su piccola scala, criterio per il quale si registra il valore di S per tutte le alternative, riducendo tutti i pesi e assegnando più della metà del punteggio totale (100) al criterio "impatto ambientale" le tre alternative B, C, D sono superiori all'alternativa di riferimento e all'alternativa A.

Criterio	Alternativa			
	A	B	C	D
Disponibilità di impianti su piccola scala	S	S	S	S
Caratteristiche delle materie prime	+	-	-	-
Tecnologia consolidata	S	-	-	-
Rendimento	+	+	+	+
Necessità di apparecchiature ausiliarie	S	-	-	-
Facilità di gestione e manutenzione	S	-	-	-
Necessità di raffinazione dei prodotti	S	-	-	-
Impatto ambientale	S	+	+	+
Necessità di operatori specializzati	S	-	-	-
Costi di investimento	S	-	-	-
Costi di processo	S	-	-	-
Tempo di ritorno dell'investimento	S	-	-	-

Tabella 59: Matrice Pugh.

	A	B	C	D
Total +	2	2	2	2
Total -	0	9	9	9
Total S	10	1	1	1
(No.+)-(No.-)	2	-7	-7	-7
(No.-)/(No.+)	0	4,5	4,5	4,5

Tabella 60: Sintesi dei punteggi per ciascuna alternativa.

	A	B	C	D
Total +	10	15	15	15
Total -	0	60	60	60
Total S	90	25	25	25
(No.+)-(No.-)	10	-45	-45	-45
(No.-)/(No.+)	0	4	4	4

Tabella 61: Somme pesate per le alternative.

Tuttavia questa è una condizione estrema e non rappresenta l'importanza relativa dei criteri prescelti per il raggiungimento degli obiettivi dello studio.

L'applicazione del metodo MADM per il caso in studio individua nella caldaia alimentata con tronchi accoppiata con un co-generatore, la migliore tecnologia di conversione energetica applicabile nel caso specifico dell'Ogliastra. Poiché comunque c'è una forte somiglianza tra la caldaia alimentata con tronchi e la caldaia a cippato di legno è possibile considerare entrambe le possibilità.

5.6 Conclusioni

Lo studio eseguito ha permesso di trarre una serie di interessanti e importanti conclusioni sia per la valorizzazione del patrimonio agroforestale dell'Ogliastra in termini energetici sia per una più razionale gestione dell'intero territorio.

Con l'impiego di un modello spaziale di stima della massa legnosa potenzialmente utilizzabile per i fini energetici è stata calcolata una quantità di circa 47.260 t a^{-1} .

Tale modello, di tipo vocazionale, si basa sulla carta dell'uso del suolo (aggiornata con le informazioni della carta della vegetazione disponibile per 7 Comuni), sulle caratteristiche morfologiche del territorio e su misure realizzate in campo.

È stata stimata una disponibilità potenziale di legna da ardere di circa 14.730 t (boschi di latifoglie) e una disponibilità potenziale di massa legnosa da trasformare in cippato e/o *pellet* (boschi di conifere e latifoglie) di circa 32.530 t.

E' stata eseguita la caratterizzazione chimico-fisica di 58 campioni di biomasse forestali, che ha consentito di determinare i parametri di processo fondamentali per la scelta della tecnologia più adeguata quali ceneri, umidità, rapporto C/N, Zolfo, Azoto. Oltre a questo è stato possibile ottenere dati conoscitivi, non rilevati in precedenza, relativi alle caratteristiche utili a fini energetici delle biomasse forestali disponibili nel territorio e di caratterizzare energeticamente le biomasse legnose (PCS e PCI). Il potenziale energetico complessivo calcolato è di $125,1 \text{ GWh a}^{-1}$ (utilizzo di conifere non scortecciate) e di $124,6 \text{ GWh a}^{-1}$ (utilizzo di conifere scortecciate) da cui si può ipotizzare una potenza installabile effettiva globale di circa 1,5 MW_e.

Tale valore si può ricondurre all'installazione di circa 10 impianti da 150 kW_e. Prendendo in esame un assetto cogenerativo, si può considerare anche l'ottenimento di 7 MW_t.

Con queste premesse, idee progettuali che contemplino l'installazione di impianti centralizzati di media taglia (1 MW di potenza) con impiego di biomasse di produzione locale possono risultare di difficile realizzazione.

Sulla base della stima della biomassa potenzialmente ritraibile, della sua distribuzione eterogenea sul territorio e del suo potenziale energetico è possibile e auspicabile, solamente l'installazione di impianti di piccola taglia, distribuiti nelle zone più vocate della provincia.

La tecnologia più adeguata per la cogenerazione di energia elettrica e termica sembra essere la combustione da realizzarsi mediante unità in assetto cogenerativo per sfruttare quindi sia la componente elettrica che quella termica ed in modo da accedere agli incentivi per la produzione previsti dalle norme.

La realizzazione di impianti di piccola taglia consente di ipotizzare usi civici dell'energia elettrica e termica generate, identificando come utenti finali le pertinenze pubbliche, quali uffici, scuole ed altre strutture comunali.

Impianti della taglia indicata in precedenza risultano particolarmente sostenibili sia dal punto di vista economico che ambientale

Capitolo 6

La capacità delle biomasse algali di accrescersi rapidamente e di immagazzinare elevate quantità di olio è nota da tempo e numerosi studi sono stati intrapresi nel tentativo di renderne possibile l'impiego in sostituzione dei combustibili fossili. Tuttavia i processi disponibili sono ancora molto dispendiosi e tali da rendere i costi dei biocombustibili ottenuti non ancora competitivi con quelli convenzionali. Una via possibile per l'ottenimento dell'olio con costi competitivi è quella di disporre di processi integrati che consentano una redistribuzione dei costi su un ventaglio di diversi prodotti secondo l'approccio della bioraffineria. Per il raggiungimento di questo obiettivo è necessario massimizzare la resa microalgale e conoscere approfonditamente l'influenza delle diverse variabili sulla crescita.

In questo capitolo sono presentati i risultati dello studio delle condizioni di crescita della specie algale *Nannochloropsis oculata*, particolarmente adatta per la produzione di olio e l'uso in acquacoltura, impiegando due taglie di reattori (6l e 120l) del tipo "bubble column". Sono esplorati i diversi parametri che influenzano la crescita microalgale e ricercate le interazioni tra loro attraverso l'approccio del *Design of Experiment* (DoE). La crescita microalgale è modellata utilizzando l'equazione di Gompertz modificata per il calcolo della velocità specifica di crescita e la determinazione della produttività in biomassa e olio. Particolare rilievo è dato all'influenza della concentrazione di nitrati con l'obiettivo di valutare la possibilità di utilizzare la *Nannochloropsis oculata*, contestualmente nel trattamento di acque reflue e nella produzione di olio. La caratterizzazione energetica delle biomasse algali ottenute nelle diverse condizioni operative completa lo studio.

L'impiego delle biomasse algali

6.1 Stato dell'arte

L'idea generale di impiegare le alghe per la produzione di energia risale a Meier che nel 1955 ne propose l'impiego per la produzione di metano.

Questa idea fu sviluppata da Oswald e Golueke nel 1960, mediante l'analisi tecnico-economica della digestione anaerobica di biomasse algali fatte crescere in *raceway ponds* e in seguito ripresa da Benemann *et al.* nel 1978 che ne ipotizzarono la competitività con i combustibili fossili (Demirbaş, 2010).

Le biomasse algali normalmente sono costituite da carboidrati, proteine e oli per cui rappresentano una fonte promettente di energia rinnovabile (Demirbaş, 2010).

La velocità di crescita delle biomasse algali superiore a quella delle piante terrestri, la possibilità di accrescersi sia in acqua dolce sia salata e la produttività in olio molto più elevata delle piante rende interessante lo studio dell'impiego in campo energetico (Chisti, 2007). Diverse specie, infatti, hanno un contenuto elevato in lipidi e in particolare in triacilgliceroli non polari che costituiscono la materia prima di base per la produzione di biodiesel (Rodolfi *et al.*, 2009). Le biomasse algali possono anche rappresentare una fonte di combustibili liquidi quali etanolo e metanolo e gassosi come metano e idrogeno (Kirrolia *et al.*, 2013, Benemann, 2013).

In generale la conversione energetica delle microalghe può essere attuata mediante:

- la digestione anaerobica
- la fermentazione
- la produzione di idrogeno

- la combustione diretta
- la gassificazione
- la pirolisi
- la liquefazione
- la trasformazione dell'olio in biodiesel.

Questo consente di ottenere diversi biocombustibili liquidi, solidi e gassosi impiegabili nella produzione di energia elettrica e termica (Dragone *et al.*, 2010, Costa *et al.*, 2011). I biocombustibili derivati dalle microalghe hanno suscitato l'interesse di oltre 150 imprese industriali nel mondo e diverse di queste hanno impegnato ingenti risorse predisponendo progetti di ricerca specifici, ma è necessario sviluppare tecnologie che massimizzino le rese produttive e riducano i costi di processo (Singh *et al.*, 2010) perché essi possano essere commercializzati.

I processi disponibili attualmente per la produzione di biocombustibili da biomasse algali, infatti, risultano ancora dispendiosi dal punto di vista energetico e piuttosto complicati per i trattamenti a valle delle colture algali (Cheng *et al.*, 2001, Lam *et al.*, 2012). Un approccio che sembra essere più praticabile è l'applicazione del concetto di bioraffineria che, con l'ottenimento di altri prodotti a elevato valore aggiunto dalle biomasse microalgali, oltre ai biocombustibili, potrebbe contribuire al miglioramento dell'economia dei differenti processi (Yen *et al.*, 2013).

La gestione anaerobica consente sia l'impiego delle biomasse tal quali che dei materiali residuati dall'estrazione dell'olio e costituiti principalmente da carboidrati e proteine.

Tuttavia la composizione della biomassa algale e in particolare il basso rapporto C/N (in genere circa 10) possono influenzare negativamente le prestazioni degli impianti di digestione anaerobica. Infatti, l'elevato contenuto proteico è responsabile della produzione di ammoniaca che inibisce lo sviluppo dei microrganismi anaerobici.

Questo problema può essere superato adottando processi di co-digestione con altri substrati (Yen *et al.*, 2007, Ehimen *et al.*, 2011). Inoltre, è stato dimostrato che quando il contenuto di lipidi non è superiore al 40% la conversione diretta delle biomasse algali in metano consente un maggiore recupero energetico rispetto all'impiego dell'olio, rilasciando un digestato che può essere riciclato quale *medium* per nuove colture algali (Sialve *et al.*, 2009). Infine l'integrazione del processo di digestione anaerobica con la produzione di biodiesel può rendere sostenibile dal punto di vista economico la produzione di quest'ultimo da microalghe (Harun *et al.*, 2011).

La fermentazione di biomasse algali è un processo di notevole interesse poiché le microalghe presentano elevati contenuti in glucosio, amido, altri polisaccaridi e proteine che possono essere usati come fonti di carbonio da batteri, lieviti o funghi (Harun *et al.*, 2010). La produzione di bioetanolo può essere esplicata direttamente da alcune specie algali quali *Chlorococcum littorale* (Ueno *et al.*, 1998) e *Chlamidomonas reinhardtii* (Hirano *et al.*, 1997).

La produzione di Idrogeno può avvenire secondo due meccanismi: la simultanea produzione di ossigeno fotosintetico e H₂ e la produzione fotosintetica in due stadi.

La produzione di O₂ e la generazione di H₂ sono spazialmente separati e quest'ultima avviene con la deprivazione di Zolfo (Ghirardi *et al.*, 2000).

Per quanto concerne la combustione diretta delle biomasse algali la letteratura è piuttosto scarna. E' riportato uno studio LCA (*Life cycle assessment*) sulla co-combustione carbone-alghe che evidenzia come questo processo possa condurre a minori emissioni di gas clima alteranti (Kadam, 2002).

La gassificazione delle biomasse algali è stata studiata da diversi ricercatori. Per esempio la gassificazione di *Chlorella vulgaris* con l'87,4% di umidità, catalizzata da

Nichel a 350°C e 18 MPa ha fornito una conversione del carbonio pari al 70,1%, con un *syngas* costituito da CH₄ (49,7%), CO₂ (44,4%) e H₂ (5,9%) (Minowa *et al.*, 1999).

La pirolisi delle microalghe è stata applicata per la prima volta in Germania nel 1986 ottenendo un carburante con un elevato contenuto in idrocarburi aromatici e un alto numero di ottano (Huang *et al.*, 2010). La tecnologia *fast* sembra essere particolarmente adatta per le microalghe per via delle temperature più basse rispetto a quelle richieste per le biomasse lignocellulosiche e della qualità superiore dell'olio ottenuto (Bridgewater *et al.*, 1999).

La liquefazione idrotermica, sviluppata per trattare ampie categorie di biomasse ed estrarne un bio-olio, è stata applicata originariamente al carbone e indica tutti i processi termochimici che conducono alla produzione di liquidi oleosi. Con questo processo le biomasse umide sono sottoposte a trattamenti con temperature variabili tra i 250°C e i 350°C a pressioni di 5-20 MPa. In queste condizioni, le biomasse algali tal quali sono liquefatte direttamente e l'olio prodotto è estratto mediante diclorometano.

Sono riportate rese in olio pari al 37% della biomassa algale alimentata al reattore per la *Dunaliella tertiolecta*, mentre valori fino al 64%, su base secca, per la *Botryococcus braunii* trattata a 302°C con catalizzatore carbonato di sodio (Minowa *et al.*, 1995, Sawayama *et al.*, 1995)

Il biocombustibile al quale è stata riservata la maggiore attenzione negli ultimi anni è il biodiesel, considerato il principale candidato alla sostituzione dei derivati di origine fossile, date le sue caratteristiche chimico-fisiche che lo rendono interessante anche dal punto di vista ambientale (Huang *et al.*, 2010).

I potenziali vantaggi e l'importanza dell'uso delle biomasse algali per la produzione di biodiesel sono riportati in diversi lavori presenti nella letteratura scientifica corrente (Mata *et al.*, 2010, Demirbaş, 2011, Ahmad *et al.*, 2011).

Essi si traducono fondamentalmente nella facilità e nell'elevata velocità di crescita, nell'impiego di acque non utilizzabili per il consumo umano, nella capacità di adattamento alle condizioni ambientali e nella produttività superiore rispetto alle colture oleaginose comunemente utilizzate. Altri vantaggi sono rappresentati dalla possibilità di impiegare la CO₂ presente nelle emissioni derivanti dalle attività industriali, dalla possibilità di estrarne sostanze di interesse commerciale ad alto valore aggiunto, dall'assenza di competizione con le colture destinate a scopi alimentari (Harun *et al.*, 2010, Pasquet *et al.* 2011, Kleinegriss *et al.*, 2011). Comunque diversi autori evidenziano una serie di problematiche legate alla configurazione dei fotobioreattori impiegati per la crescita algale, alla raccolta e alla concentrazione delle biomasse, al bilancio di energia globale del processo (Posten *et al.*, 2009, Scott *et al.*, 2010, Chen *et al.*, 2011). Un autore in particolare afferma che non c'è un'evidenza che le biomasse algali abbiano una produttività più elevata rispetto alle piante verdi e che le rese sono simili. Infine conclude che il contributo delle biomasse algali nel settore dei biocombustibili può essere solamente molto modesto (Walker, 2009).

Poiché il costo di produzione del biodiesel dipende in misura rilevante dal prezzo dell'olio, è necessario ottenere quest'ultimo con i costi più bassi possibili.

Il contenuto e la composizione dei lipidi dell'olio prodotto dalle microalghe sono influenzati da diversi fattori quali la specie algale, la temperatura, l'irraggiamento, la concentrazione di CO₂, la salinità e, in modo più importante dalla disponibilità di nutrienti (Hu, 2004, Hu *et al.*, 2008, Guschina *et al.*, 2006).

In generale un'elevata irradiazione favorisce l'accumulo di triacilgliceroli, mentre un'irradiazione bassa, la formazione di lipidi polari (Rodolfi *et al.*, 2009). Anche il tasso di assorbimento della luce sembra influenzare la produttività dei lipidi (Kandilian *et al.* 2014). La concentrazione di CO₂ influenza l'accumulo di lipidi e valori elevati di CO₂

determinano una diminuzione della produttività di biomassa e di lipidi (Chiu *et al.*, 2009). Il fattore più importante, senza dubbio, è rappresentato dalla disponibilità di nutrienti e in particolare dell'Azoto. In condizioni di deprivazione di Azoto, infatti, diverse specie algali incrementano la sintesi dei lipidi, sia a spese di altri componenti cellulari che attraverso la nuova fissazione di Carbonio (Rodolfi *et al.*, 2009).

Di particolare interesse è l'influenza della concentrazione di nitrati, infatti, con queste sostanze, per alcune specie algali (*Nannochloropsis oculata*, *Chlorella vulgaris*), è stato osservato un raddoppio del contenuto lipidico a fronte di una riduzione del 75% della concentrazione di Azoto nel medium colturale (Converti *et al.*, 2009).

L'effetto della concentrazione dell'Azoto è stato studiato anche in diverse condizioni stagionali (primavera autunno) in sistemi all'aperto con il risultato che, in condizioni di limitazione di Azoto, in primavera, per la *Nannochloropsis oculata*, il contenuto di lipidi raddoppia (Olofsson *et al.*, 2014).

La capacità delle microalghe di utilizzare l'Azoto può essere quindi usata simultaneamente per il trattamento delle acque reflue e per la produzione di olio, attraverso l'adozione di un processo multistadio che prevede in una prima fase la rimozione di Azoto, mentre nella seconda la produzione di quantità elevate di lipidi. Questo può contribuire a rendere sostenibile dal punto di vista economico la produzione di biodiesel (Xin *et al.*, 2010).

In questo lavoro è stata studiata la crescita della *Nannochloropsis oculata* in un *medium* colturale composto di acqua marina addizionata di un quantitativo appropriato di micro e macro nutrienti, impiegando fotobioreattori anulari sia su scala di laboratorio sia su scala pilota.

La scelta della specie marina *Nannochloropsis oculata* è stata dettata dal fatto che è una specie robusta, dotata di un'elevata capacità di accumulo di lipidi intracellulari e può anche essere impiegata efficacemente in acquacoltura nell'alimentazione dei rotiferi, oppure nell'alimentazione umana poiché rappresenta una buona fonte di acido eicosapentanoico (Kronkamp *et al.*, 2009).

In particolare sono state studiate le condizioni di crescita utilizzando l'Azoto sotto forma di nitrati e urea, in combinazione con l'impiego della CO₂, variando la quantità di energia somministrata alle colture microalgali e valutandone la loro produttività in termini di biomassa algale e di olio.

E' stato applicato l'approccio del *Design of Experiments* (DoE) che permette di ottenere precise informazioni sulle interazioni tra i diversi fattori che influenzano la crescita microalgale. In questo caso quali fattori in *input* alla DoE sono stati impiegati l'intensità luminosa, due differenti forme di Azoto e l'impiego di CO₂.

6.2 Approccio del *Design of Experiments*

Il *Design of Experiment* (DoE), come già riportato, è una tecnica statistica impiegata per la pianificazione, la conduzione e l'analisi di *set* sperimentali che permette di ottenere risultati significativi con un numero ragionevole di esperimenti e che quindi presenta dei vantaggi anche in termini di tempo e di costo. In questo lavoro sono stati fatti variare congiuntamente diversi parametri sperimentali per ottenere informazioni concernenti l'impatto dei singoli fattori e le interazioni tra essi.

Per studiare la crescita della *Nannochloropsis oculata* sono stati utilizzati quattro diversi fattori, con due differenti livelli che possono influenzare la crescita algale. Mediante l'approccio DoE i fattori sono stati fatti variare congiuntamente. Per lo svolgimento degli esperimenti sono stati prescelti l'intensità luminosa, l'anidride carbonica, la concentrazione di nitrati e urea (Flynn *et al.*, 1993, Bernard *et al.*, 2012, Trobajo *et al.*, 2014, Tamburic *et al.*, 2014, Campaña-Torres *et al.*, 2009).

In questo lavoro è stato impiegato un piano fattoriale frazionario 2^{4-1}_{IV} che consiste di quattro fattori su due livelli, e rappresenta la metà di tutte le possibili combinazioni tra fattori e livelli che avrebbe portato a un piano fattoriale completo (Montgomery, 2013). La scelta del piano fattoriale frazionario è dovuta alla durata di ciascun esperimento, nel tentativo di ottenere il massimo risultato, riducendo il numero di esperimenti senza perdere informazioni significative. Nella Tab.62 sono riportati i livelli adottati per ciascun fattore.

Fattore / Livello	Basso	Alto	Unità di misura
A= Lampade	2	4	numero
B= N_aNO_3	60	120	mg l ⁻¹
C=Urea	0	120	mg l ⁻¹
D=CO ₂	0	1	presenza/assenza

Tab.62: Livelli adottati per la campagna sperimentale.

Il piano fattoriale frazionario è stato costruito impiegando i generatori e le relazioni di definizione che sono riportati nella Tab.63 unitamente alla struttura dei confondimenti (*alias structure*). Si è scelto un piano fattoriale con risoluzione IV per risolvere i singoli effetti dalle interazioni a due vie, sacrificando le interazioni di terzo livello che in genere nei processi biologici sono trascurabili.

L'intero piano delle prove è riportato nella Tab.64. L'analisi del piano utilizzato è stata eseguita mediante il pacchetto software Minitab 16 (Minitab Inc. USA).

Condizioni				
Generatrice	D=ABC			
Relazione di definizione	I=ABCD			
Struttura dei confondimenti	I+ABCD	A+BCD	B+ACD	C+ABD
(Alias structure)	D+ABC	AB+CD	AC+BD	AD+BC

Tabella 63: Generatori, Relazioni di definizione e *alias structure* completa.

Prova	Intensità luminosa	Nitrati mg l ⁻¹	Urea mg l ⁻¹	CO ₂
1	2	60	0	0
2	4	60	0	1
3	2	120	0	1
4	4	120	0	0
5	2	60	120	1
6	4	60	120	0
7	2	120	120	0
8	4	120	120	1

Tabella 64: Piano delle prove.

6.3 Materiali e metodi

6.3.1 Fotobioreattori su scala di laboratorio e pilota

Sono stati utilizzati due fotobioreattori a colonna anulare con un volume utile della coltura pari a 6l (scala di laboratorio) e due fotobioreattori a colonna anulare con un volume utile della coltura pari a 120l (scala pilota), forniti dalla società Fotosintetica & Microbiologica srl, spin off dell'Università degli studi di Firenze.

Fotobioreattori su scala di laboratorio

Sono costituiti da due cilindri concentrici in Plexiglas® incollati su una base dello stesso materiale in modo da consentire la creazione di un'intercapedine per il contenimento della coltura. L'intercapedine è dotata di una valvola di scarico inferiore e di un coperchio in Plexiglas® forato per l'ingresso dei dispositivi di insufflazione dell'aria e della CO₂ e per l'immissione dei sensori di temperatura e pH all'interno della coltura. La diffusione della miscela di aria e CO₂ impiegata per la miscelazione della coltura algale è assicurata mediante un tubo forato circolare poggiato sul fondo del reattore.

Il flusso d'aria è garantito mediante una soffiante lineare a membrana in grado di erogare una portata fino a 45 Nl min⁻¹.

La regolazione della portata di aria è garantita da due flussimetri, uno per ciascun reattore, mentre due elettrovalvole comandano l'ingresso dei gas in ciascun reattore. La regolazione della portata di CO₂ è garantita da due flussimetri, uno per ciascun reattore. La CO₂ è immessa automaticamente nei reattori mediante le elettrovalvole gestite dal sistema di controllo in funzione dei valori di pH impostati. Il sistema di illuminazione è costituito da 4 lampade a tubo fluorescente del tipo LUMILUX *Cool Daylight*, con una tonalità di luce secondo EN 12364-1 e con una potenza nominale di 22,50 W. Il sistema di termostatazione della coltura è costituito da un bagno termostatico in grado di funzionare sia da raffreddatore sia da riscaldatore, mentre l'aria calda generata dal sistema di illuminazione è asportata mediante ventole poste sulla sommità del coperchio del reattore. Il sistema di controllo è costituito da un'unità remota, dotata di software implementato su piattaforma Windows che assicura la regolazione, il monitoraggio e la registrazione del pH e della temperatura. I due fotobioreattori insieme alle altre apparecchiature e all'unità di controllo sono mostrati nella Fig.46.

Fotobioreattori su scala pilota

Sono costituiti da due cilindri concentrici in Plexiglas® incollati su una base dello stesso materiale in modo da consentire la creazione di un'intercapedine per il contenimento della coltura. L'intercapedine è dotata di una valvola di scarico inferiore e di un coperchio in PVC forato per l'ingresso dei dispositivi di insufflazione dell'aria e della CO₂ e per l'inserimento dei sensori di temperatura, pH, O₂ e CO₂ all'interno della coltura. La diffusione della miscela di aria e CO₂ impiegata per la miscelazione della coltura algale è assicurata mediante un tubo forato circolare poggiato sul fondo del reattore. Il flusso d'aria è garantito mediante una soffiante lineare a membrana in grado di erogare una portata fino a 70 Nl min⁻¹. La regolazione della portata di aria è garantita da due flussimetri, uno per ciascun reattore, mentre due elettrovalvole comandano l'ingresso dei gas in ciascun reattore. La regolazione della portata di CO₂ è garantita da due flussimetri, uno per ciascun reattore.

La CO₂ è immessa automaticamente nei reattori mediante le elettrovalvole gestite dal sistema di controllo in funzione dei valori di pH impostati.

Il sistema di illuminazione è costituito da 6 lampade a tubo fluorescente del tipo LUMILUX *Cool Daylight*, con una tonalità di luce secondo EN 12364-1 e con una potenza nominale di 58,0 W, montate su un castello posizionato nel cilindro interno.

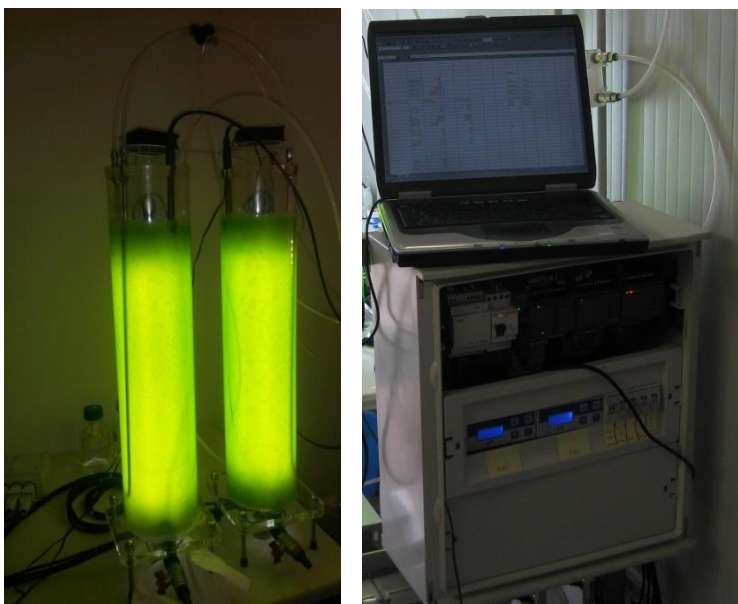


Figura 46: Fotobioreattori da 6l con il quadro di controllo.

Il sistema di alimentazione della coltura è costituito da un serbatoio cilindrico verticale in polietilene del volume di 300 l collegato con una pompa centrifuga in grado di erogare una portata fino a $1,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

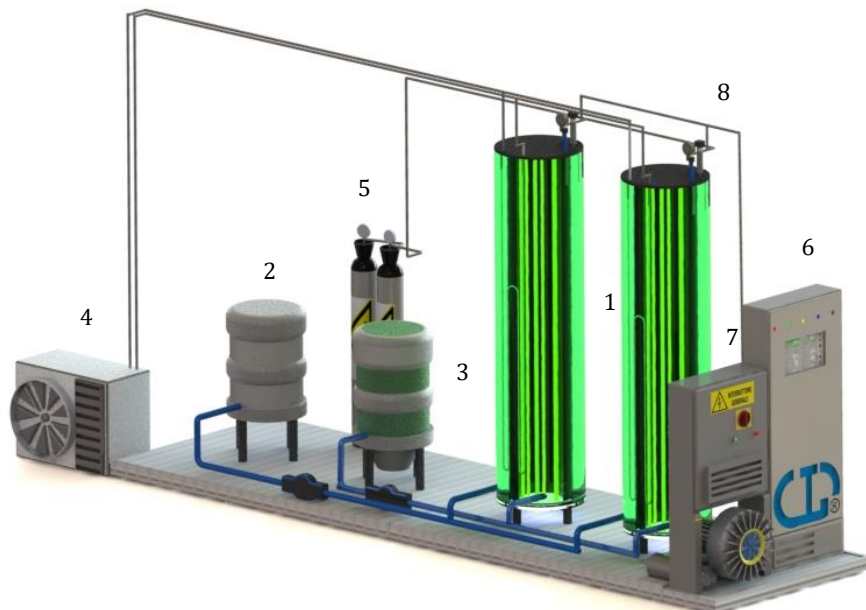
Il sistema di filtrazione del *medium* colturale è costituito da una batteria di filtri a cartuccia con porosità da 60 a $0,6 \mu\text{m}$.

Il sistema di scarico della coltura è costituito da un serbatoio in polietilene (PE) con fondo tronco conico del volume di 300 l.

Il sistema di termostatazione della coltura è costituito da una pompa di calore che fa circolare il fluido in due serpentine poste all'interno dell'intercapedine di ciascun reattore. Il sistema di controllo è costituito da un'unità remota, dotata di software implementato su piattaforma Windows che assicura la regolazione, il monitoraggio e la registrazione del pH e della temperatura. Uno schema dell'impianto su scala pilota nel suo insieme è mostrato nella Fig.47. I due fotobioreattori, che possono lavorare in modo indipendente, insieme alle altre apparecchiature e all'unità di controllo sono mostrati nel dettaglio nella Fig.48.

6.3.2 Valutazione del regime fluidodinamico dei reattori su scala pilota

La valutazione del regime fluidodinamico dei reattori su scala pilota è stata eseguita mediante l'applicazione della tecnica stimolo-risposta. E' stato impiegato un tracciante solubile in acqua poiché le piccole dimensioni della microalga impiegata ($2-4 \mu\text{m}$) e le basse concentrazioni ottenute ($3,5 \text{ g l}^{-1}$ massimo) consentono di assimilare la coltura a una soluzione estremamente diluita. La determinazione della concentrazione del tracciante in uscita è stata eseguita mediante la misura della conducibilità elettrica della corrente in uscita dal reattore.



1	Fotobioreattori	5	Sistema per l'erogazione della CO ₂
2	Serbatoio del medium colturale	6	Quadro di controllo
3	Serbatoio per lo scarico della coltura	7	Quadro elettrico
4	Pompa di calore	8	Sensori di misura

Figura 47: Vista d'insieme dell'impianto su scala pilota.



Figura 48: Fotobioreattori da 120l con il quadro di controllo.

L'equazione che descrive l'andamento del tracciante nel tempo è la seguente:

$$\frac{C}{C_0} = C^{-\frac{t}{\theta}} \quad (26)$$

nella quale:

C = Concentrazione del tracciante a un generico tempo t

C₀ = Concentrazione del tracciante al tempo t=0

θ = Tempo di permanenza nel reattore.

Il tracciante impiegato è costituito da una soluzione di KCl 3 M. La misura della conducibilità è stata eseguita sulla corrente in uscita a intervalli di 0,5 min, impiegando un analizzatore multi parametrico Orion Star 6 della Thermo Fisher Scientific equipaggiato con una sonda specifica.

Sono state impiegate due portate di alimentazione dell'aria, con i valori di 1,1 m³ h⁻¹ e 2,0 m³ h⁻¹ alle quali, con un volume di lavoro pari a 100 l, corrisponde un tempo di permanenza pari rispettivamente da 6,54 e 3,6 minuti. Il valore iniziale della conducibilità elettrica era pari a 0,660 mS cm ed è ritornato al valore iniziale dopo 19 minuti con la portata di 2,0 m³ h⁻¹.

I risultati del confronto tra la curva teorica e quella sperimentale per un flusso d'aria di 2,0 m³ h⁻¹ sono riportati nella Fig.49. Confrontando le curve sperimentali ottenute con quelle teoriche si può dire che nei reattori, in queste condizioni, è realizzato un regime di mescolamento perfetto.

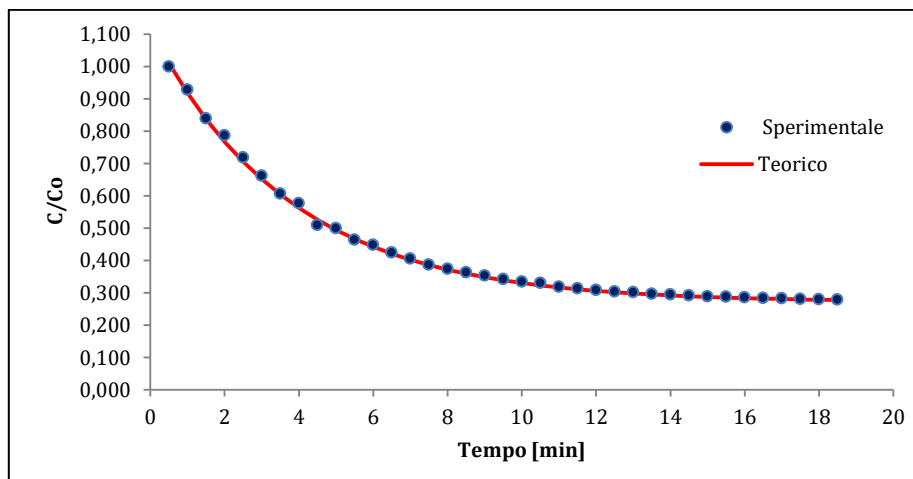


Figura 49: Curva di distribuzione dei tempi di residenza con la portata di 2,0 m³ h⁻¹.

6.3.3 Specie algale

La specie algale utilizzata proveniva dalla collezione di ceppi algali della Fondazione Onlus Centro Marino Internazionale presso i laboratori del quale sono stati installati i fotobioreattori. *Nannochloropsis oculata* è un genere di alghe che si ritrova soprattutto in ambienti marini. Questa microalga è un microrganismo fotosintetico eucariota che cresce rapidamente per la sua struttura semplice (Horsman *et al.*, 2008).

Le sue piccole dimensioni (2 - 4 μm) ne fanno considerare l'appartenenza al fitoplancton. Le colture microalgali sono state mantenute in beute di Erlenmeyer o bottiglie di vetro con una soluzione costituita da acqua marina e dal *medium F2* di Guillard (Guillard *et al.*, 1962, 1975), in condizioni di aerazione e illuminazione costanti alla temperatura di 22°C nei Laboratori del Centro Marino Internazionale a Torregrande, Oristano (Fig.50).

Queste colture sono state sviluppate per ciascun esperimento, fino al raggiungimento della concentrazione iniziale di biomassa algale desiderata.



Figura 50: Colture di mantenimento.

6.3.4 *Medium* culturale

Il *medium* culturale è stato preparato con acqua di mare (salinità 35,0 ‰) modificata con l'aggiunta del *medium* di Guillard e differenti livelli di urea e nitrato di sodio forniti dalla AppliChem Panreac. La composizione del *medium* di Guillard è riportata nella Tab.65.

Composto	Concentrazione [mol l ⁻¹]
NaH ₂ PO ₄ * H ₂ O	3,62·10 ⁻⁵
Na ₂ SiO ₃ * 9H ₂ O	1,06·10 ⁻⁴
FeCl ₃ * 6H ₂ O	1,17·10 ⁻⁵
Na ₂ EDTA * 2H ₂ O	1,17·10 ⁻⁵
MnCl ₂ * 4H ₂ O	9,10·10 ⁻⁷
Na ₂ MoO ₄ * 2H ₂ O	2,60·10 ⁻⁸
ZnSO ₄ * 7H ₂ O	7,65·10 ⁻⁸
CoCl ₂ * 6H ₂ O	4,20·10 ⁻⁸
CuSO ₄ * 5H ₂ O	3,93·10 ⁻⁸
Vitamine	
Tiamina HCl	2,96·10 ⁻⁷
Biotina	2,05·10 ⁻⁹
Cianocobalamina	3,69·10 ⁻¹⁰

Tabella 65: Composizione del *medium* di Guillard.

Sono stati aggiunti 1 ml di metalli in tracce e 0,5 ml di una miscela di vitamine per completare il profilo di nutrienti e micronutrienti del *medium* colturale. I nitrati e l'urea sono stati aggiunti al *medium* in funzione della prova sperimentale prevista impiegando le concentrazioni riportate nella precedente Tab.62.

6.3.5 Modello di crescita

La modellazione della crescita microalgale è stata eseguita impiegando l'equazione di Gompertz modificata:

$$y = A_0 + (A_{max} - A_0) \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{e \cdot \mu}{A_{max}} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (27)$$

nella quale:

A_0 è un termine relativo al valore iniziale di concentrazione delle microalghie (espresso in densità ottica o in g/l di biomassa)

A_{max} è il valore massimo raggiunto ad un tempo generico t (espresso in termini di densità ottica o in g/l di biomassa)

μ è la velocità specifica di crescita espressa in d^{-1}

λ è un parametro che tiene conto della fase iniziale di latenza, espresso in questo caso, in ore.

L'equazione (27) è stata impiegata per ottenere il valore di μ per ciascuna prova sperimentale, considerando questa variabile quale parametro rappresentativo del processo di crescita. La velocità specifica di crescita è stata utilizzata per valutare il piano fattoriale frazionario. La bontà del *fitting* (S), tra le regressioni non lineari eseguite per ciascuna prova, è stata valutata impiegando l'equazione:

$$S = \sqrt{\frac{SSE}{N - P}} \quad (28)$$

nella quale

$SSE = (\sum (y_i - \hat{y}_i)^2)$ è la somma dei quadrati degli errori

N = numero delle osservazioni

P = numero dei parametri liberi.

La velocità specifica di crescita μ , espressa in d^{-1} è stata calcolata, oltre che con l'equazione di Gompertz modificata anche impiegando l'espressione più semplice:

$$\mu = (\ln W_f / W_0) / \Delta t \quad (29)$$

nella quale W_f e W_0 rappresentano rispettivamente la concentrazione finale e iniziale di biomassa, espresse in g/l, mentre Δt è il tempo di coltivazione in giorni (Ono *et al.* 2007). Per il calcolo della produttività giornaliera è stata utilizzata l'espressione:

$$P_d = \mu \cdot X_f \cdot V \quad (30)$$

nella quale P_d è la produttività giornaliera in $g \cdot d^{-1}$, X_f è la concentrazione massima di biomassa ($g \cdot l^{-1}$) al termine della coltivazione, V è il volume del reattore.

6.3.6 Campionamento e caratterizzazione della biomassa algale

La biomassa algale è stata prelevata dai reattori all'inizio di ciascuna prova sperimentale e per due volte al giorno, a distanza di 8 ore, per tutta la durata della prova sperimentale. Sui campioni appena prelevati è stata misurata immediatamente la densità ottica alle lunghezze d'onda di 420 nm, 680 nm e 750 nm e ottenuti gli spettri di assorbimento completi tra le lunghezze d'onda di 300 e 900 nm.

I campioni poi sono stati conservati in freezer a -20°C per le misure successive di peso secco, concentrazione di nitrati e di urea. Al termine della prova, la biomassa algale di ciascun reattore è stata separata dal *medium* colturale mediante centrifugazione a 5000 giri min^{-1} , essiccata in stufa a 65°C e poi conservata a -20°C fino al momento dell'analisi. Sul filtrato residuo dalla determinazione del peso secco è stata misurata la concentrazione di nitrati e urea, mentre sulla biomassa secca sono stati determinati il potere calorifico superiore (PCS) e l'umidità, le sostanze volatili, le ceneri, il Carbonio fisso, il contenuto in Carbonio, Idrogeno, Azoto. Sulla biomassa secca è stato altresì determinato il contenuto di olio impiegando un estrattore accelerato per solventi ASE Dionex 300 operante nelle seguenti condizioni: temperatura 105°C , pressione 6,67 MPa, solvente esano, volume del solvente 40 ml, massa del campione 0,5 g, tempo di estrazione 30 minuti. L'estratto è stato trasferito in un *vial* e il solvente è stato evaporato in corrente di Azoto. Il *vial* contenente l'olio è stato essiccato in stufa e portato a peso costante.

Per le misure di Densità Ottica è stato impiegato uno spettrofotometro UV-Visibile doppio raggio Jasco V-530. Le lunghezze d'onda impiegate per le misure sono relative al massimo di assorbimento per la α - clorofilla (680 nm), e per la biomassa algale (750 nm). La determinazione del peso secco è stata eseguita secondo gli Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. (Clasceri *et al.*, 1999).

Dai campioni, omogeneizzati mediante agitazione, sono stati prelevati 40 ml e filtrati sotto vuoto impiegando membrane Whatman con dimensione dei pori di $0,45\ \mu\text{m}$. Dopo la filtrazione completa, le membrane sono state lavate con 20 ml di acqua MilliQ per rimuovere i sali residui dall'acqua marina e essiccati in stufa alla temperatura di 105°C . La concentrazione dei nitrati è stata determinata impiegando un Cromatografo ionico ad alte prestazioni DionexTM ICS-2000 Thermo ScientificTM equipaggiato con una colonna DionexTM Ion PacTM AS19 column. Le misure sono state eseguite con le seguenti condizioni operative: 30°C , eluente KOH 10mM da 0 a 10 min, gradiente da 10 a 45 [mMol] da 10 a 25 minuti. Ciascun campione è stato prima filtrato su membrana con porosità $0,45\ \mu\text{m}$ e fatto passare su cartuccia DionexTM ON GUARD II Ag 1 ml per rimuovere l'eccesso di ioni Cl^- , Br^- and I^- che può interferire nell'analisi dei nitrati.

La curva di calibrazione a cinque punti è stata costruita utilizzando una miscela multi parametrica certificata contenente F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , Br^- , SO_4^{2-} e PO_4^{3-} .

La concentrazione di urea è stata determinata, mediante il metodo colorimetrico proposto da Mulvenna (1991), opportunamente modificato. I campioni sono stati filtrati su membrana da $0,45\ \mu\text{m}$ e trattati con Diacetilmonossima e Tiosemicarbazide a 80°C per 20 minuti, successivamente raffreddati in bagno d'acqua per 5 minuti e sottoposti alla misura dell'assorbanza a 520 nm, impiegando uno spettrofotometro Varian Cary@50. Il limite di rilevabilità calcolato per il metodo con le procedure statistiche dell'UNICHIM è stato di $1,5\ \text{mg l}^{-1}$ con un'incertezza della misura per i dati analitici pari a $\pm 1,5\ \text{mg l}^{-1}$. Il PCS, l'umidità, le sostanze volatili, le ceneri, il carbonio fisso, il contenuto in Carbonio, Idrogeno, Azoto è stato determinato con le metodiche e gli strumenti indicati nella sezione 4.2.3.

6.3.7 Procedure operative e monitoraggio del processo

Le prove sperimentali sono incominciate inoculando i reattori con una concentrazione media iniziale di biomassa algale pari a $0,045 \text{ g l}^{-1}$ cui corrisponde un valore di densità ottica di 0,088. I valori di temperatura e di pH impostati per le prove di crescita sono stati rispettivamente di $22^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ e $7,60 \pm 0,20$. Questi valori sono stati mantenuti per tutta la durata dell'esperimento, con l'esclusione, per quanto concerne il pH, delle prove nelle quali non era prevista l'aggiunta della CO_2 . I parametri temperatura e pH sono stati misurati e registrati in continuo. La portata volumetrica dell'aria è stata regolata ottenendo un valore di $20 \text{ l l}_{\text{reattore}}^{-1} \text{ h}^{-1}$, mentre la portata volumetrica della CO_2 è stata regolata ad un valore di $0,30 \text{ l min}^{-1}$. Occorre comunque considerare che l'ingresso della CO_2 nel reattore si sia avuto solamente quando richiesto dal sistema di controllo per la regolazione del valore del pH.

La misura e la registrazione della CO_2 disciolta e dell' O_2 disciolto sono state eseguite in continuo nei reattori da 120l, alternativamente, impiegando rispettivamente i sensori da processo INPRO 5000 I/12/320 e INPRO 6860 I/12/420 della Mettler Toledo.

Durante tutto il corso degli esperimenti sono state misurate e registrate giornalmente la conduttività elettrica espressa in mS cm^{-1} e la radiazione fotosintetica attiva (PAR) come densità di flusso fotonico (DFF), espressa in $\mu\text{moli s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, sulla superficie esterna dei reattori. Per la misura della PAR è stato impiegato il LI-190SA *quantum sensor* della LI-COR, Inc., Lincoln Nebraska, USA. La misura è stata compiuta in differenti sezioni delle due taglie di fotobioreattori. Per i reattori da 120l, 2 lampade sono in grado di fornire mediamente, alla parete dal lato interno della coltura, una DFF di $116 \mu\text{moli s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ($25,2 \text{ Wm}^{-2}$), mentre 4 lampade una DFF di $170 \mu\text{moli s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ($36,9 \text{ Wm}^{-2}$), tutte le prove sperimentali sono state quindi condotte in queste condizioni. Per i reattori da 6l, 2 lampade sono in grado di fornire, alla parete dal lato interno della coltura una DFF di $179 \mu\text{moli s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ($38,9 \text{ Wm}^{-2}$), mentre 4 lampade una DFF di $267 \mu\text{moli s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ($58,0 \text{ Wm}^{-2}$), tutte le prove sperimentali sono state quindi condotte in queste condizioni. E' stato impiegato un regime di illuminazione di 24 ore e solamente una prova è stata condotta impiegando la tecnica del fotoperiodo con un ciclo di 12 ore di illuminazione seguito da 12 ore senza illuminazione.

Sono state condotte tre serie di prove. Le prove previste dal piano fattoriale frazionario illustrato nella sezione 6.2. Quattro repliche della prova con la massima concentrazione di nitrati, la massima concentrazione di urea prevista dal DoE e l'immissione di CO_2 (due per ciascuna taglia di reattore). Una prova con due concentrazioni elevate di nitrati (500 e 1000 mg l^{-1} rispettivamente), impiegando le due taglie di reattori e utilizzando la tecnica del fotoperiodo (12 h di luce) per quelli da 120l.

Tutte le prove sono state eseguite, prelevando dai reattori solamente la biomassa microalgale necessaria all'esecuzione delle analisi chimico-fisiche e conducendo la coltura fino al termine della fase esponenziale di crescita senza alcun reintegro del *medium* colturale. Al termine di ciascuna prova sperimentale una quota pari al 50 % circa del volume contenuto nei reattori da 120l e tutto il volume contenuto nei reattori da 6l sono stati prelevati per il recupero della biomassa algale.

6.4 Risultati e discussione

I profili di temperatura e pH sono riportati di seguito per le condizioni di lavoro con e senza insufflazione di CO_2 per le due taglie di reattori. Nelle Figg. 51 - 54 sono mostrati i risultati relativi ai reattori da 6l e da 120l. Come si può notare, in assenza di CO_2 il pH tende a salire a un livello elevato, spostandosi dal valore di 7,60, prescelto per la crescita della *Nannochloropsis oculata* fino a 8,50-9,00.

Questo è dovuto al fatto che nel corso della degradazione dei nitrati sono liberati ioni OH^- che fanno innalzare il pH (Lamers, 2013). La correzione effettuata mediante l'immissione di CO_2 , invece, consente di mantenere il pH al valore ottimale. Questo tuttavia rappresenta un limite per l'assorbimento della CO_2 da parte delle alghe che è quindi realizzabile solamente entro quantità che non determinino importanti variazioni del pH rispetto al valore ottimale necessario alla crescita. Nelle Figg. 55 e 56 sono riportati gli andamenti della concentrazione della CO_2 e dell' O_2 nella coltura algale sia in condizioni di immissione artificiale di CO_2 che con la sola quantità presente nell'aria. Senza l'insufflazione di CO_2 si registra un valore medio di concentrazione pari a $1,65 \text{ mg l}^{-1}$, mentre con l'immissione di gas si ottiene un valore medio pari a $2,60 \text{ mg l}^{-1}$. L'immissione di gas consente un incremento della concentrazione di CO_2 pari al 60% circa rispetto al valore rilevato senza immissione, al netto della quantità utilizzata per la neutralizzazione dell'alcalinità della coltura. La concentrazione di O_2 disciolto è stata mediamente di $8,70 \text{ mg l}^{-1}$ in tutte le prove, pari circa al livello di saturazione dell'aria nell'acqua salata alla temperatura di 22°C , confermando i bassi valori riscontrati in genere nei reattori verticali a bolle (Sánchez-Mirón *et al.*, 2003).

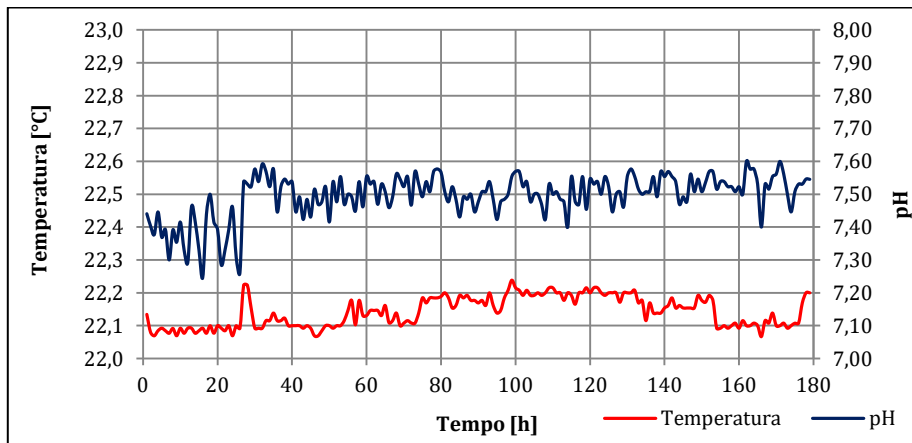


Figura 51: Profili di temperatura e pH per il reattore da 6l con l'immissione di CO_2 .

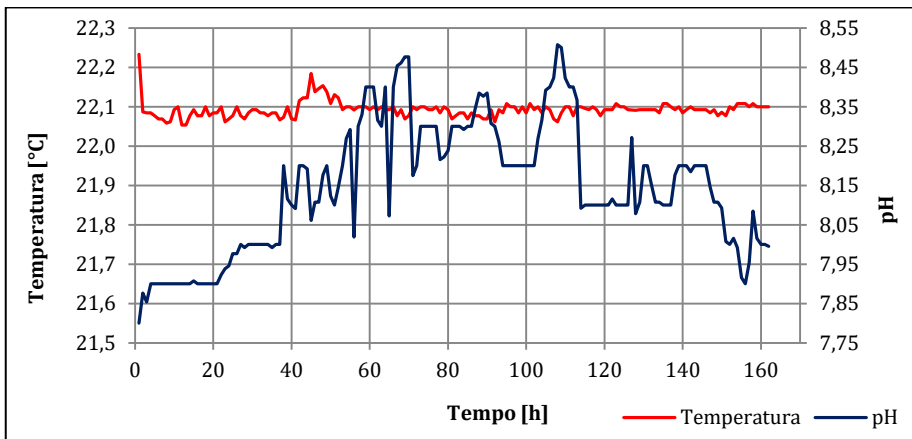


Figura 52: Profili di temperatura e pH per il reattore da 6l senza l'immissione di CO_2 .

La conducibilità elettrica sia nei reattori della taglia di 6l che in quelli della taglia di 120l è rimasta pressoché costante nel corso di tutti gli esperimenti eseguiti, con valori medi di $55,60 \text{ mS cm}^{-1}$ e $55,90 \text{ mS cm}^{-1}$ per i primi e di $54,18 \text{ mS cm}^{-1}$ e $53,83 \text{ mS cm}^{-1}$ per i secondi. Questo è un indice della scarsa influenza su questo parametro da parte del *medium* di Guillard, per cui in pratica è importante solo la salinità dell'acqua.

Le curve di crescita, in termini di densità ottica a 750 nm e di peso secco ottenute con i reattori da 6l nelle diverse condizioni di illuminazione, sono mostrate nelle Figg. 57-60. Sono stati riportati anche gli andamenti del peso secco misurato perché essi sono effettivamente rappresentativi della biomassa prodotta. Le misure di densità ottica alla lunghezza d'onda di 750 nm sono più adatte a un rapido controllo del processo, però non rappresentano solamente la biomassa presente, ma anche altre sostanze capaci di assorbire la luce a quella lunghezza d'onda. Nella letteratura diversi autori fanno uso di relazioni lineari per prevedere la biomassa algale con semplici misure di densità ottica, (Spolaore *et al.*, 2006, Converti *et al.*, 2009). Tuttavia le relazioni lineari sono verificate solamente per concentrazioni di biomassa algale molto basse. Come sarà mostrato più avanti per le prove sperimentali condotte con due repliche per ciascuna taglia di reattore, esse sono di tipo non lineare per cui è più opportuno fare riferimento alla misura diretta del peso secco.

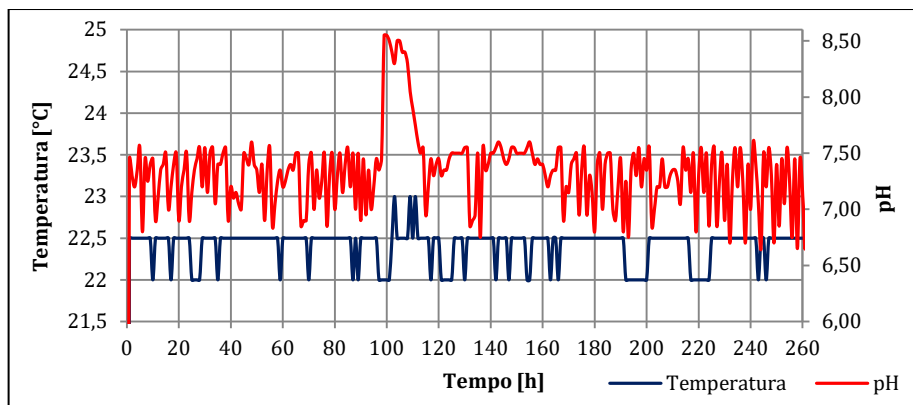


Figura 53: Profili di temperatura e pH per il reattore da 120l con l'immissione di CO_2 .

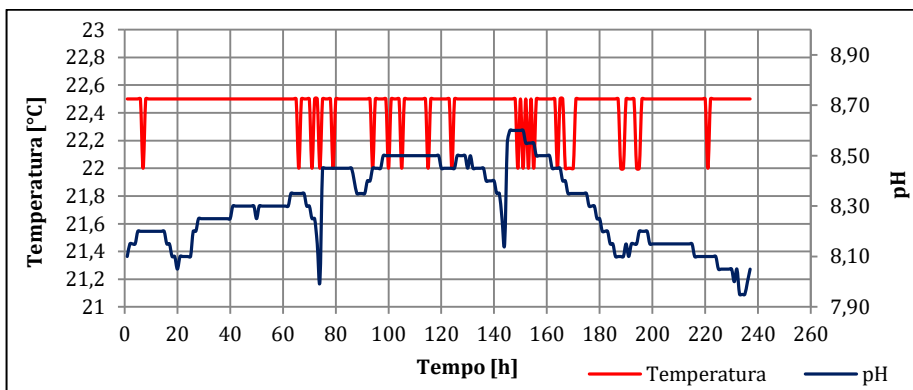


Figura 54: Profili di temperatura e pH per il reattore da 120l senza l'immissione di CO_2 .

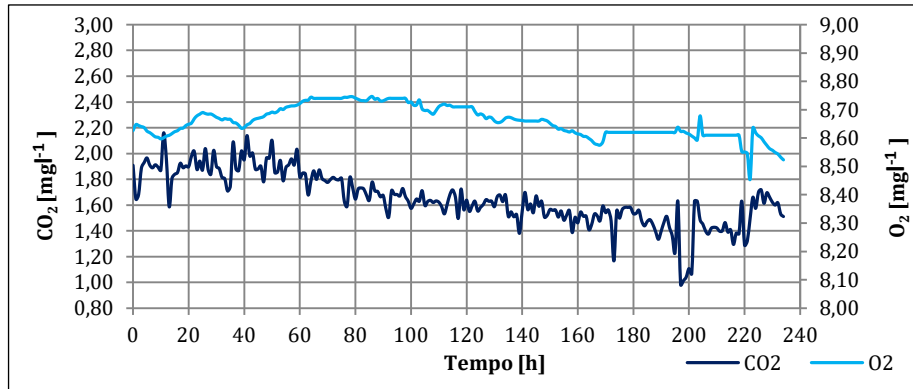


Figura 55: Profili di concentrazione di CO₂ e O₂ per il reattore da 120l senza immissione di CO₂.

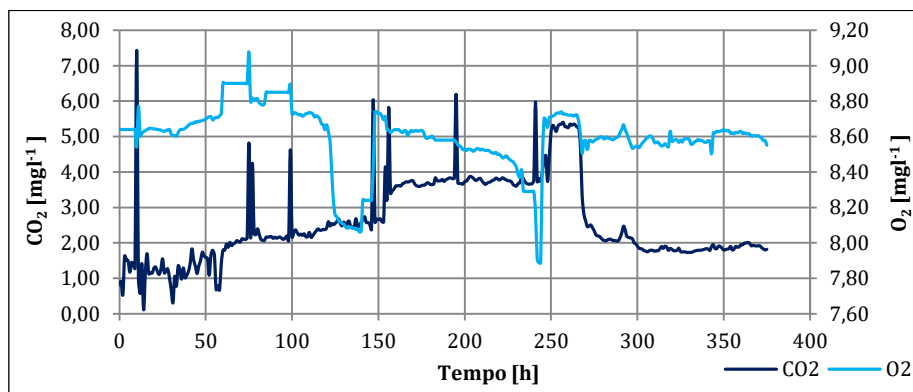


Figura 56: Profili di concentrazione di CO₂ e O₂ con immissione di CO₂.

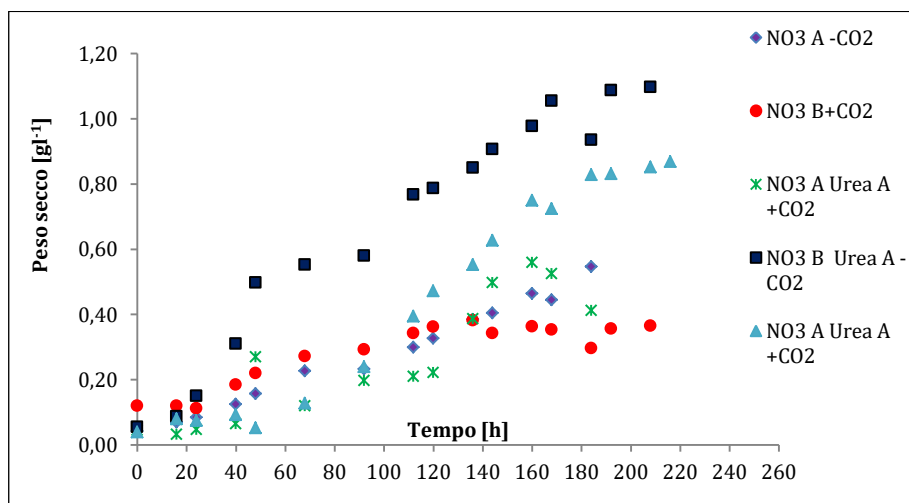


Figura 57: Curva di crescita in base al peso secco per il reattore da 6l con DFF 267 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

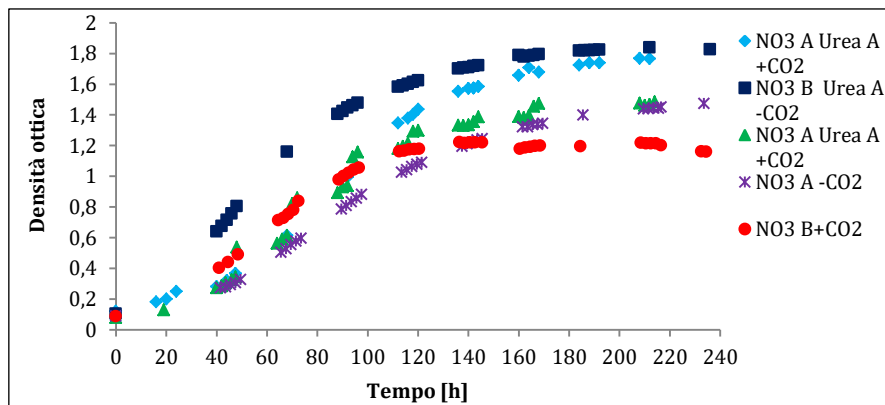


Figura 58: Curva di crescita in base alla densità ottica per un reattore da 6l con DFF 267 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

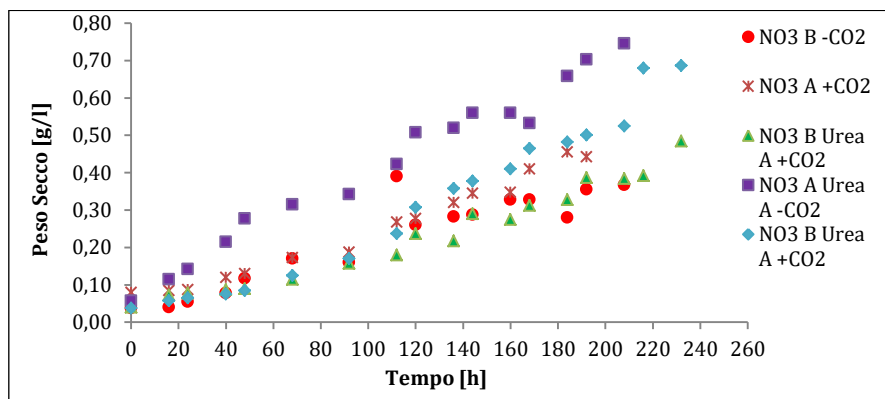


Figura 59: Curva di crescita in base al peso secco per il reattore da 6l con DFF 179 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

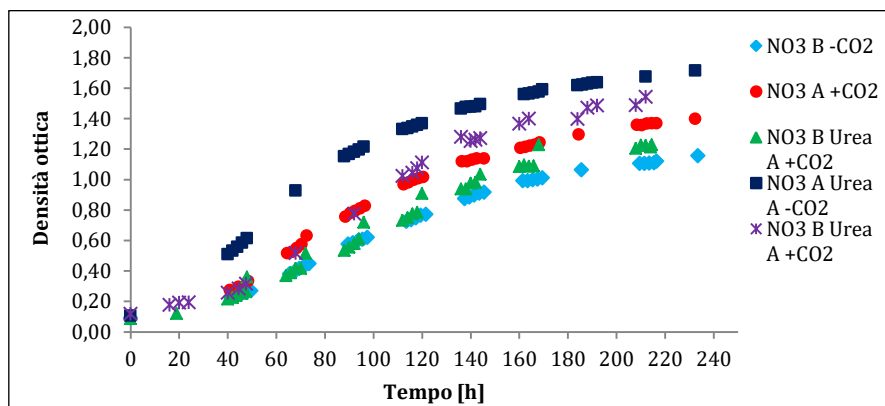


Figura 60: Curva di crescita in base alla densità ottica per un reattore da 6l con DFF 179 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

Analizzando qualitativamente le curve di crescita per i reattori da 6l sia in base al peso secco che alla densità ottica si può notare come le concentrazioni maggiori di biomassa si ottengano sempre in condizioni di DFF più elevata e con la massima concentrazione di urea. I livelli di nitrati considerati consentono di ottenere una concentrazione di biomassa algale elevata solamente per i valori massimi. La presenza o l'assenza della CO₂, invece, sembra non avere influenza.

I risultati del DoE sono riportati nelle Figg.61-63. Nella Fig.61 è riportato il diagramma di Pareto con gli effetti dei diversi fattori e si può vedere come l'effetto più importante sia la luce. Sono comunque significativi con un livello di significatività del 10 % gli effetti della luce e dell'interazione luce-nitrati. Seguono, in ordine di importanza, anche se non sono significativi, l'effetto dell'urea e dell'interazione luce-CO₂.

Le curve di livello della Fig.62 mostrano l'andamento della velocità specifica di crescita della microalga in funzione della concentrazione dei nitrati e dell'intensità luminosa. I valori della velocità specifica di crescita aumentano con l'incremento dell'intensità luminosa, mentre si ha una diminuzione per l'incremento della concentrazione di nitrati. Nella Fig.63 è riportato il grafico delle interazioni tra i quattro fattori prescelti per l'esecuzione del piano fattoriale.

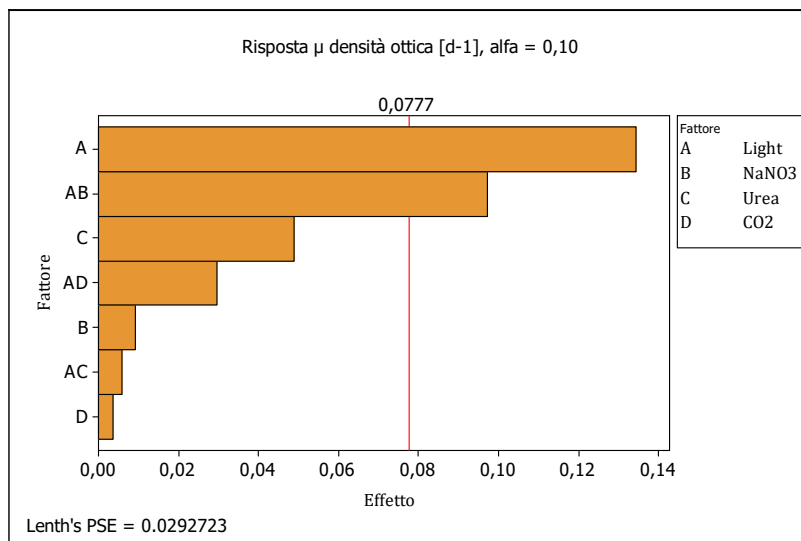


Figura 61: Effetti dei diversi fattori sulla velocità di crescita con una significatività del 10%.

Si può vedere come si abbia una convergenza dell'effetto di luce e nitrati, nessuna interazione luce-urea e luce-CO₂, deboli interazioni nitrati-urea e urea-CO₂, nessuna interazione nitrati-CO₂.

Nella Tab.66 sono riportati i valori degli effetti e dei coefficienti per la velocità specifica di crescita. Impiegando i dati nella Tab.66 se ne ricava un modello polinomiale per la velocità di crescita, dato dall'espressione:

$$\mu = 0,31642 + A 0,06720 - AB 0,04855 + \varepsilon \quad (31)$$

nella quale

μ è la velocità specifica di crescita in d⁻¹

A è il fattore luce

AB è l'interazione tra il fattore luce e il fattore NaNO_3 .
 ε è la componente casuale dell'errore

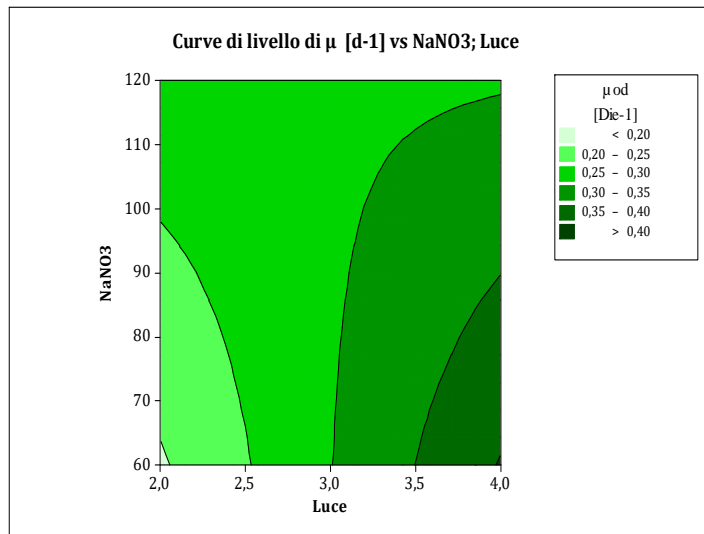


Figura 62: Curve di livello per la velocità specifica di crescita.

Le curve di crescita in termini di densità ottica a 750 nm e di peso secco, relative alle prove per i reattori da 120l nelle diverse condizioni di illuminazione sono mostrate nelle Figg. 64-67.

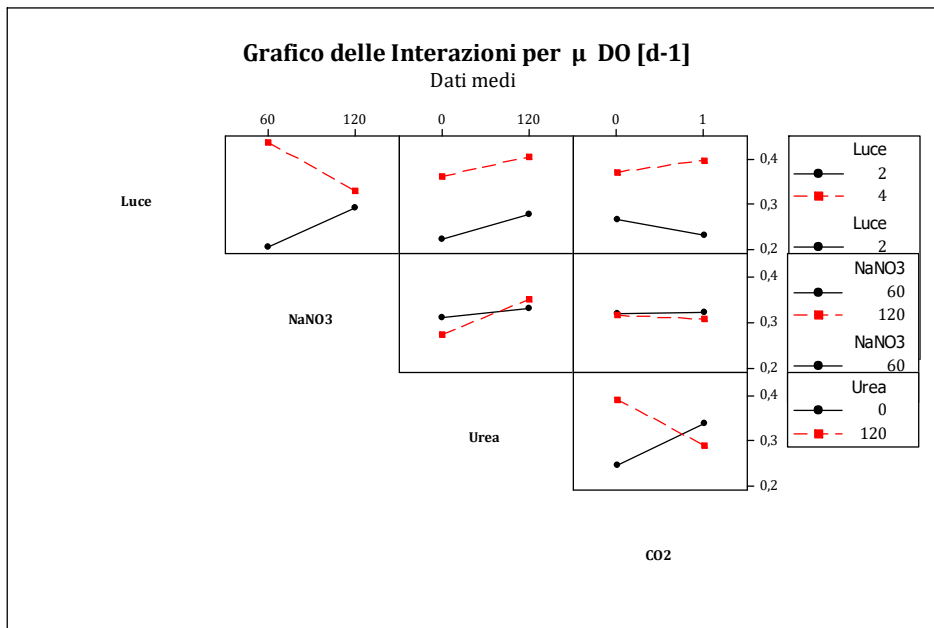


Figura 63: Grafico delle interazioni tra i diversi fattori.

Fattore	Effetto	Coefficiente
Costante	0,31642	
Luce	0,13440	0,06720
NaNO ₃	-0,00931	-0,00466
Urea	0,04875	0,02438
CO ₂	-0,00370	-0,00185
Luce* NaNO ₃	-0,09710	-0,04855
Luce*Urea	-0,00600	-0,00300
Luce*CO ₂	0,02971	0,01486

Tabella 66: Stima dei coefficienti e degli effetti per la velocità specifica di crescita.

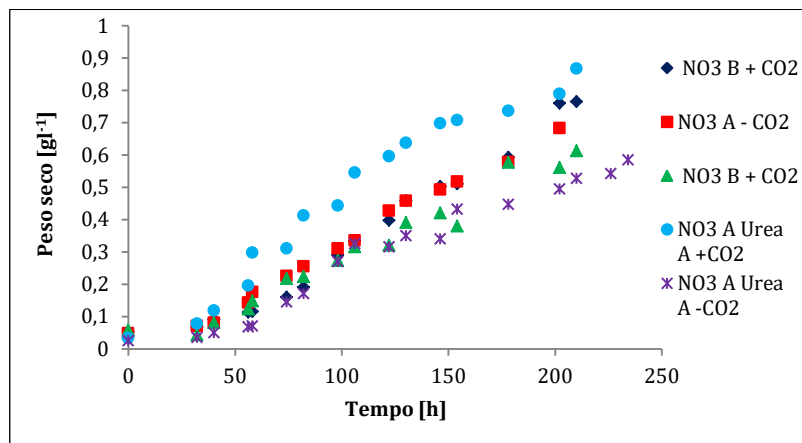


Figura 64: Curva di crescita in base al peso secco per il reattore da 120l con DFF 170 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

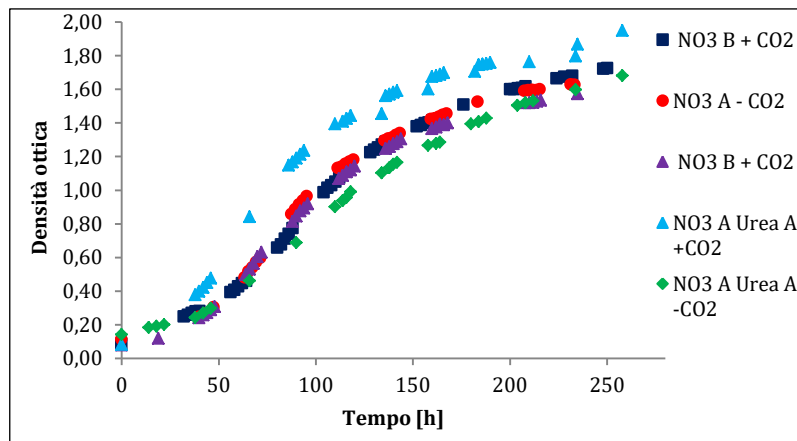


Figura 65: Curva di crescita in base alla densità ottica per un reattore da 120l con DFF 170 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

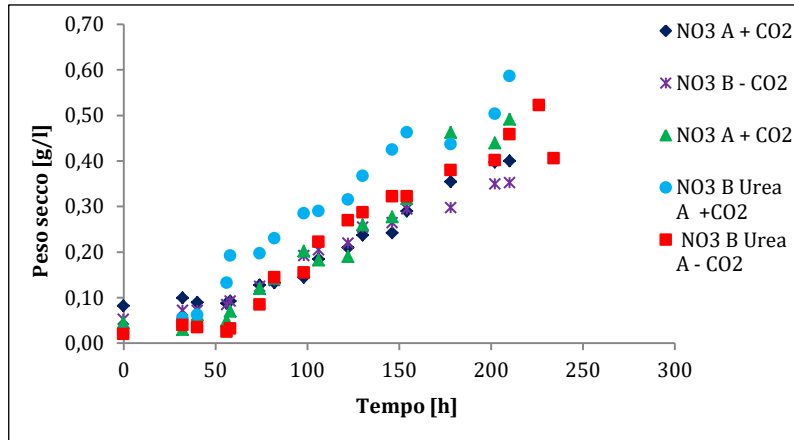


Figura.66: Curva di crescita in base al peso secco per il reattore da 120l con DFF $116 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

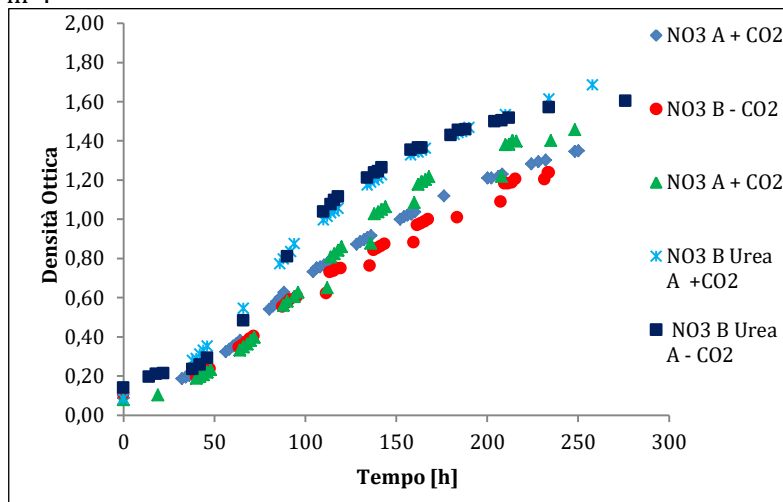


Figura 67: Curva di crescita in base alla densità ottica per un reattore da 120l con DFF $116 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

Analizzando qualitativamente le curve di crescita per i reattori da 120l sia in base al peso secco che alla densità ottica si può notare come le concentrazioni maggiori di biomassa si ottengano sempre in condizioni di DFF più elevata e con la massima concentrazione di urea e di nitrati. La presenza o l'assenza della CO_2 , invece, sembrano non avere influenza. I risultati del DoE sono riportati nelle Figg.68-70.

Nella Fig.68, che mostra il diagramma di Pareto per gli effetti, è evidente come l'unico fattore significativo sia la luce; tuttavia i nitrati e l'urea, pur non risultando statisticamente significativi vengono immediatamente dopo.

Nella Fig.69 sono riportati i principali effetti sulla velocità di crescita e come si può vedere, ancora una volta, l'effetto maggiore è dato dalla luce, seguita dai nitrati e dall'urea, mentre la CO_2 ha anch'essa un piccolo effetto. Nella Fig.70 è riportato il grafico delle interazioni tra i diversi fattori. E' molto evidente come nel caso dei reattori da 120l non si registri alcuna interazione tra i fattori, a differenza di quanto riscontrato in quelli da 6l, nei quali c'erano deboli interazioni.

E' molto probabile che questo sia dovuto al fattore di scala dei reattori, ma la conferma di questa affermazione richiede l'esecuzione di specifiche prove sperimentali.

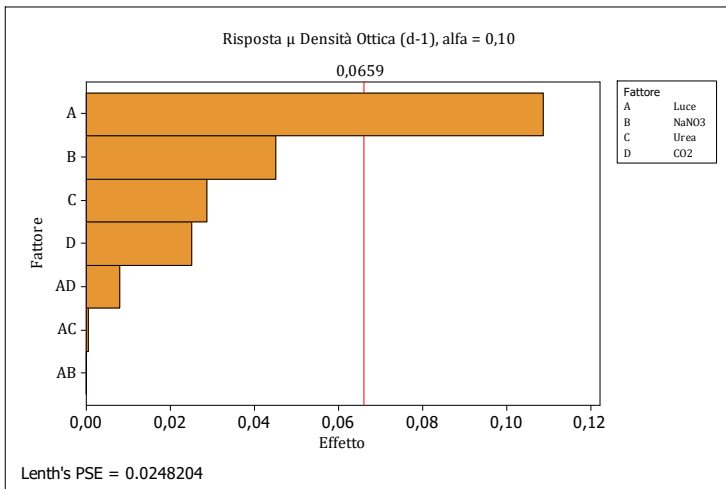


Figura 68: Effetti dei diversi fattori sulla velocità di crescita con una significatività del 10%.

Data la non significatività dei fattori CO₂ e urea nelle condizioni esplorate, si è ritenuto opportuno rielaborare il piano fattoriale escludendo questi fattori dall'analisi (Montgomery, 2013). In particolare è stato riscritto un piano, fattoriale completo 2², tra luce e nitrati, con una replica. Questo ha permesso di compiere l'analisi della varianza e di verificare l'eventuale perdita di informazioni dovuta alla frazione del piano. I risultati dell'analisi sono illustrati nelle Figg.71-73.

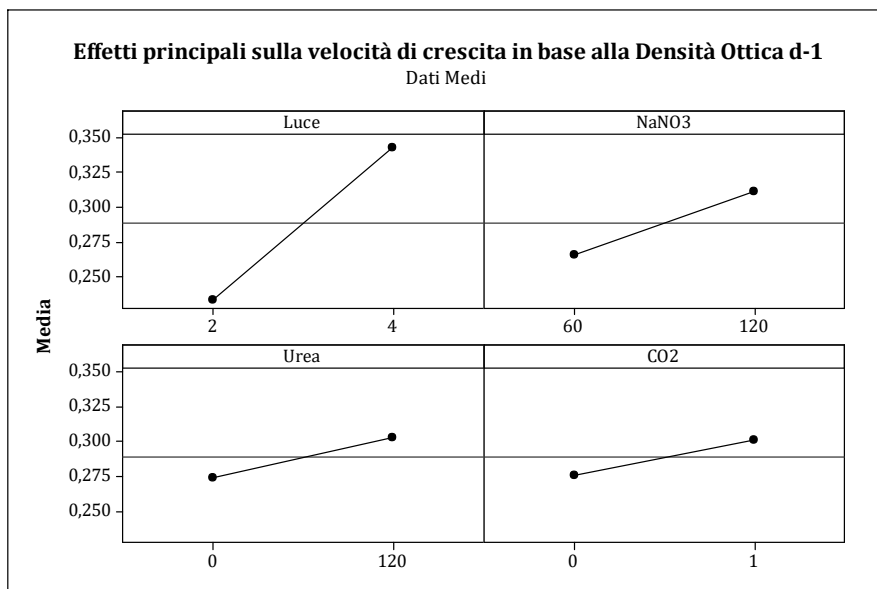


Figura 69: Principali effetti sulla velocità di crescita della *Nannochloropsis oculata*.

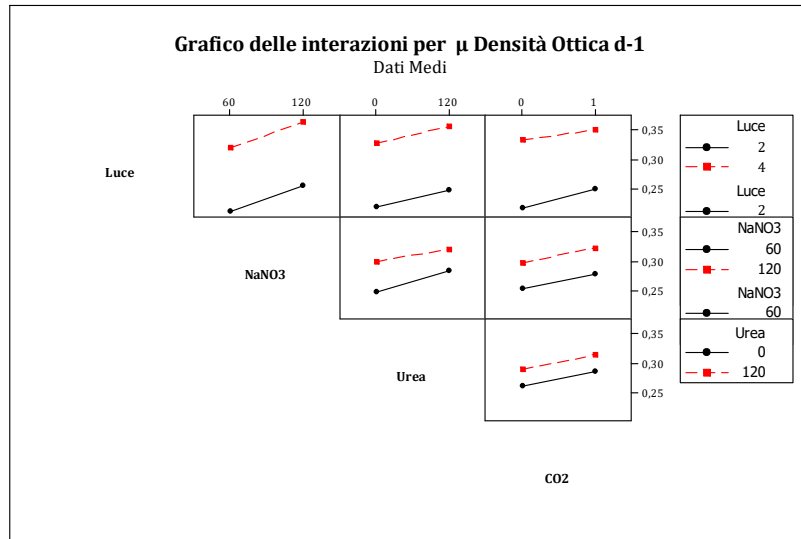


Figura 70: Grafico delle interazioni tra i diversi fattori.

La Fig.71 mostra che sono significativi, con un livello del 10%, gli effetti della luce e dei nitrati sulla velocità specifica di crescita. Non si modifica l'impatto sulla velocità specifica di crescita (Fig.72), ma non si ha alcuna interazione tra luce e nitrati (Fig.73). Nella Tab.67 sono riportati i valori degli effetti e dei coefficienti per la velocità specifica di crescita, mentre l'analisi della varianza nella Tab.68.

Fattore	Effetto	Coefficiente	SE Coef.	T	P
Costante		0,288635	0,009748	29,61	0,000
Luce	0,108764	0,054382	0,009748	5,58	0,000
NaNO ₃	0,045164	0,022582	0,009748	2,32	0,005
Luce* NaNO ₃	0,000070	0,000035	0,009748	0,00	0,997

Tabella67: Stima dei coefficienti e degli effetti per la velocità specifica di crescita.

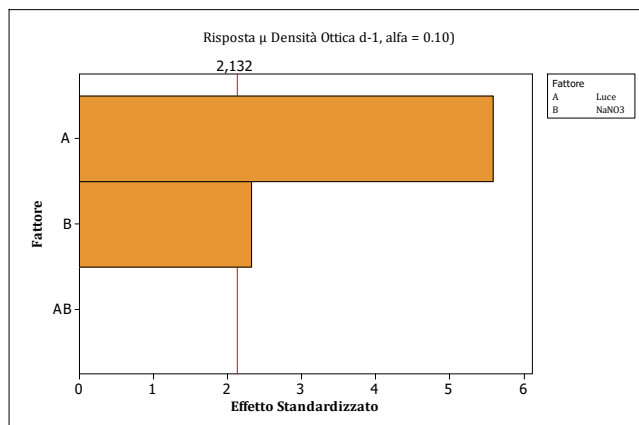


Figura 71: Effetti dei diversi fattori sulla velocità di crescita con una significatività del 10%.

Impiegando i dati nella Tab.67 se ne ricava un modello polinomiale per la velocità di crescita, dato dall'espressione:

$$\mu = 0,288635 + A 0,054382 + B 0,022582 + \varepsilon \quad (32)$$

nella quale

μ è la velocità specifica di crescita in d^{-1}

A è il fattore luce

B è il fattore $NaNO_3$.

ε è la componente casuale dell'errore

	GdL	Seq SS*	Adj SS*	Adj MS*	F	P
Effetti Principali	2	0,0277389	0,0277389	0,0138694	18,24	0,010
Luce	1	0,0236593	0,0236593	0,0236593	31,12	0,005
$NaNO_3$	1	0,0040796	0,0040796	0,0040796	5,37	0,081
Interazioni a due vie	1	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,00	0,997
Luce* $NaNO_3$	1	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,00	0,997
Errore Residuo	4	0,0030410	0,0030410	0,0007603		
Totale	7	0,0307799				

*Seq SS = Somma sequenziale dei quadrati. *Adj SS =Somma dei quadrati adattata. *Adj MS = Media dei quadrati adattata. P=*p-value*

Tabella 68: Analisi della varianza.

I risultati dell'analisi della varianza confermano le conclusioni riportate in precedenza per quanto concerne gli effetti della luce e dei nitrati e l'assenza di un'interazione luce-nitrati.

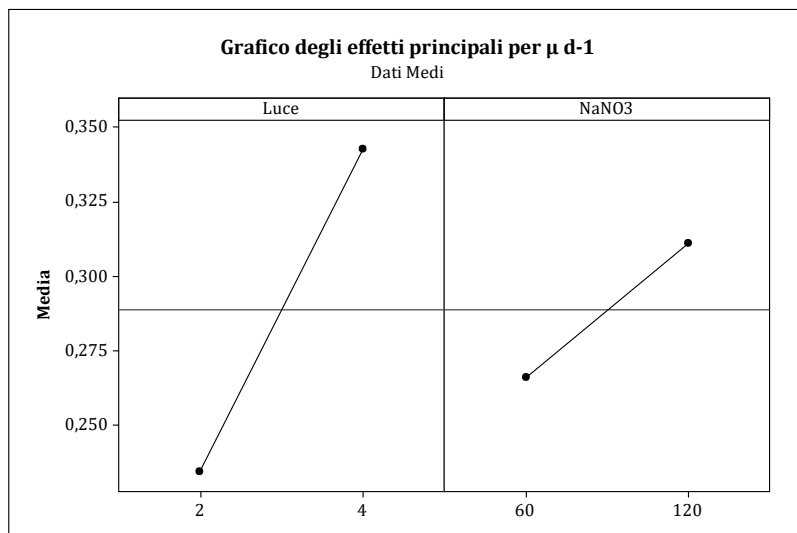


Figura 72: Principali effetti sulla velocità di crescita della *Nannochloropsis oculata*.

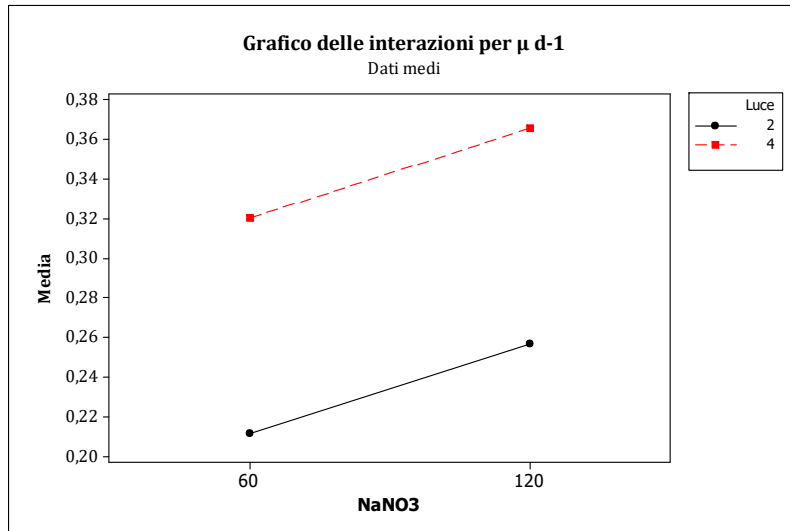


Figura 73: Grafico delle interazioni tra i diversi fattori.

Nelle Figg.74 e 75 sono riportate le curve di crescita in termini di densità ottica e di peso secco per le prove condotte con la massima concentrazione di nitrati e di urea previste dal DoE e con l'immissione di CO_2 per tutti e quattro i reattori.

Sia i valori finali di Densità Ottica sia i valori finali di peso secco sono sensibilmente più elevati nel caso dei reattori da 6l. Una spiegazione plausibile è data dal fatto che, nelle condizioni sperimentali adottate, l'energia conferita dal sistema di illuminazione dei reattori da 6l è superiore a quella fornita dal sistema dei reattori da 120l del 50% circa. Tuttavia questo non si traduce in un incremento proporzionale di biomassa di algale. Si riscontra, infatti, una differenza media del 15% circa a favore dei reattori da 6l, ma questo indica comunque una maggiore efficienza produttiva dei reattori da 120l.

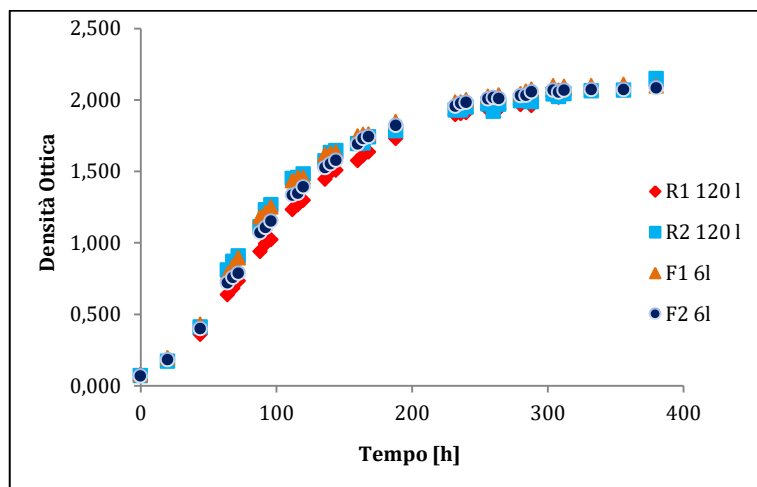


Figura 74: Curve di crescita in base alla densità ottica per tutti i reattori con le medesime concentrazioni di nitrati e urea e con l'immissione di CO_2 .

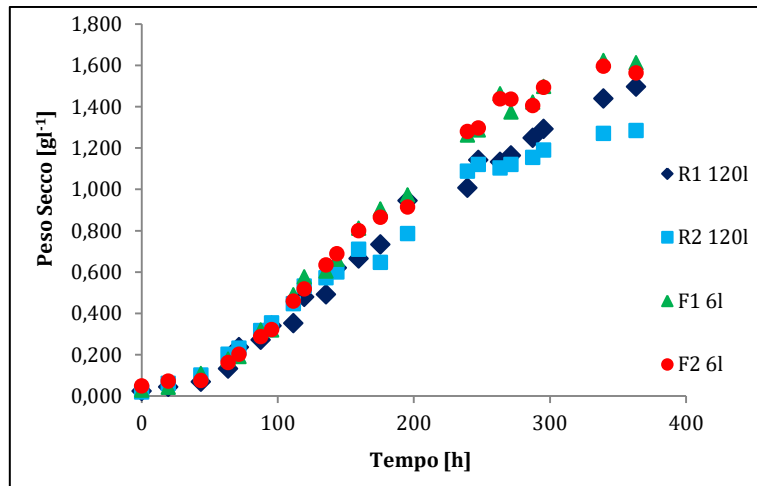


Figura 75: Curve di crescita in base al peso secco per tutti i reattori con le medesime concentrazioni di nitrati e urea e con l'immissione di CO_2 .

In considerazione del fatto che queste prove possono essere considerate due repliche per ciascuna scala di reattore è stata studiata la relazione esistente fra i valori di densità ottica e di peso secco, nel tentativo di trovare un'espressione che correlasse queste due variabili. La curva ottenuta mediante una regressione non lineare è mostrata nella Fig.76.

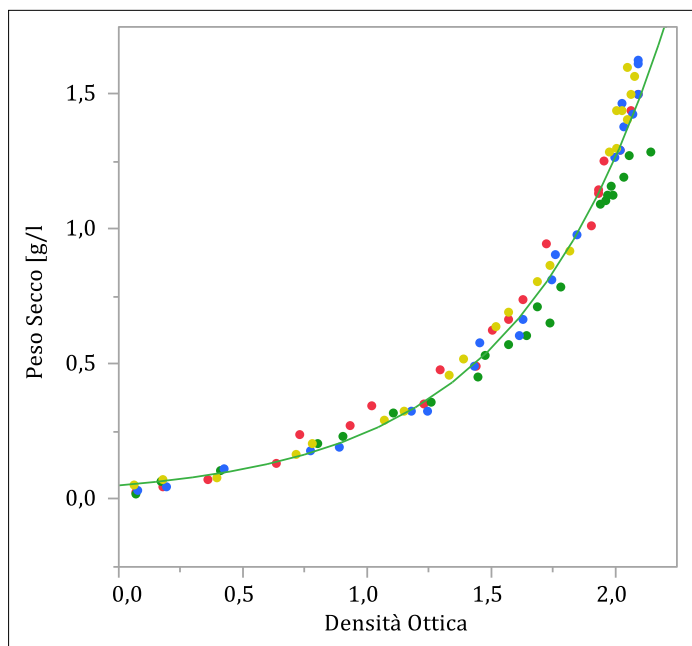


Figura 76: Curva di regressione Densità Ottica-Peso secco.

L'espressione ricavata è la seguente:

$$DW = a \cdot (1 - b \cdot \exp(-c \cdot DO)) \quad (33)$$

nella quale

DO è la densità ottica

DW è il peso secco espresso in g/l.

a , b e c sono i parametri della regressione.

Nel caso specifico per i tre parametri sono stati ricavati i valori 2,124, 1,007, 2,271 rispettivamente. Come si può vedere il segmento di linearità corrisponde a valori di peso secco molto bassi, per cui se s'impiega questa parte della curva per la previsione del peso secco di campioni incogniti, occorre introdurre alti fattori moltiplicativi. Infatti, è necessario diluire i campioni spostandoli, di fatto, dalla zona di non linearità a quella di linearità e questo può essere causa di un errore molto elevato. In questo lavoro, comunque, è stata ampiamente impiegata la determinazione diretta del peso secco che, per quanto richiede tempi abbastanza lunghi, è indispensabile per la valutazione più precisa possibile della produttività in biomassa algale.

Nella Fig.77a-d è riportata la previsione dei valori di peso secco nel tempo per le due diverse taglie di reattori, ottenuta impiegando l'equazione di Gompertz modificata (27), eseguendo la regressione con l'algoritmo di Marquardt.

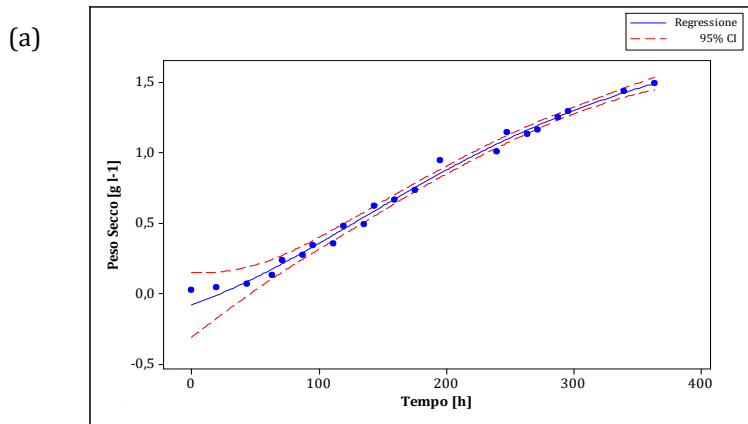


Figura 77a: Curva di regressione reattore R1 120l.

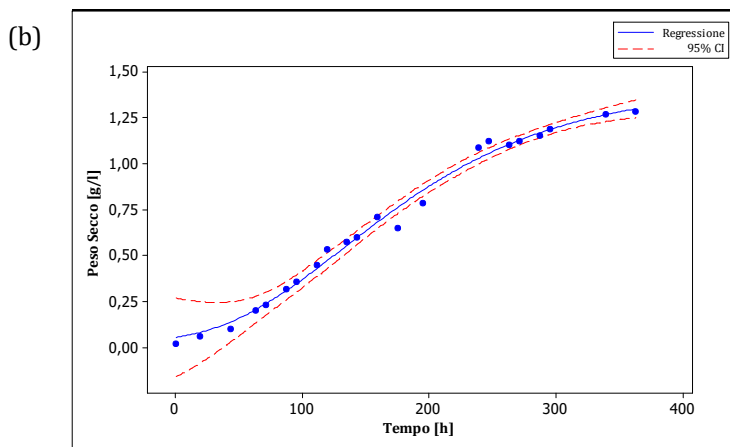


Figura 77b: Curva di regressione reattore R2 120l.

(c)

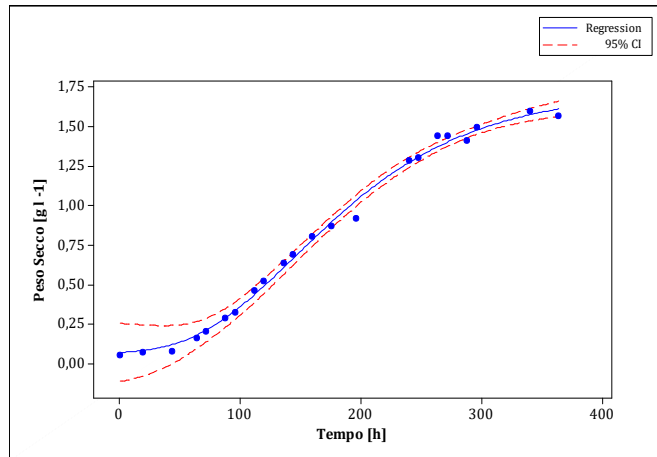


Figura 77c: Curva di regressione F1 6l

(d)

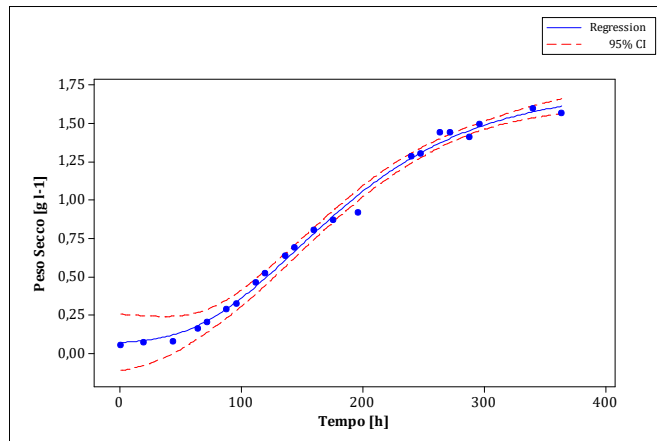


Figura 77d: Curva di regressione F2 6l.

Nella Tab.69, infine, sono riportati i parametri stimati per la regressione condotta con l'equazione di Gompertz modificata, unitamente ai risultati dell'analisi statistica.

Parametro	R1 120l	R2 120l	F1 6l	F2 6l
A_0	-0,2923	0,0308	0,0026	0,0659
A	1,9439	1,4187	1,8053	1,7216
μ	0,0046	0,0055	0,0070	0,0077
λ	-21,6049	36,4127	46,5027	62,2302
SSE*	0,0204183	0,0240612	0,0253254	0,0310936
DFE*	18	18	18	18
MSE*	0,0011343	0,0013367	0,0014070	0,0017274
S*	0,0336801	0,0365614	0,0375096	0,0415623

*DFE = Gradi di libertà degli errori. *SSE = Somma residua dei quadrati degli errori.

*MSE = errore quadratico medio.*S = Errore standard della regressione.

Tabella 69: Parametri della regressione con l'equazione di Gompertz modificata.

Le curve di regressione ottenute consentono di affermare che il modello adottato permette di prevedere con un buon grado di precisione i valori di biomassa algale per entrambe le taglie di reattori nelle condizioni operative adottate.

I reattori da 6l con l'illuminazione continua permettono di ottenere una concentrazione di biomassa maggiore rispetto ai reattori da 120l, con la stessa concentrazione di nitrati, ma con un'illuminazione per il 50% del tempo.

Le curve di crescita per le prove con un elevato carico di nitrati sono mostrate nelle Figg.78-79 per entrambi i reattori.

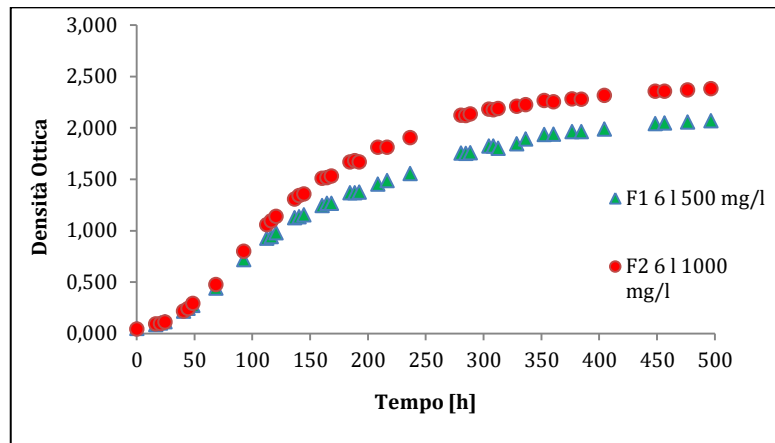


Figura 78: Curva di crescita per i reattori da 6l con diverse concentrazioni di nitrati.

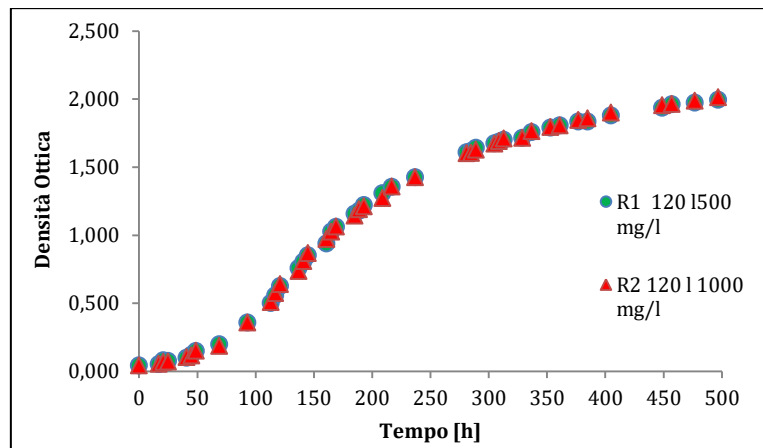


Figura 79: Curva di crescita per i reattori da 120l con diverse concentrazioni di nitrati.

Il reattore F1 con la quantità doppia di nitrati porta a una concentrazione di biomassa algale superiore del 42% rispetto al reattore F2. Per i reattori da 120l si riscontra, per il reattore R2, una concentrazione di biomassa algale superiore dell'11% circa rispetto al reattore R1. Per entrambi i reattori, quindi, è evidente l'effetto dell'elevata concentrazione dei nitrati sulla produzione complessiva della biomassa algale.

Nelle Tabb.70-73 è riportato il valore di peso secco massimo ottenuto per ciascuna prova, unitamente alla produttività giornaliera di biomassa e olio in tutte le serie di

prove eseguite. Analizzando i dati contenuti nelle Tabb.71 e 72 si nota come, per entrambe le taglie di reattore, le velocità specifiche di crescita e le produttività giornaliere siano più elevate quando si hanno le concentrazioni più elevate di nitrati e urea. In generale, comunque i reattori da 120l presentano una velocità specifica di crescita superiore a quella dei reattori da 6l, mentre per la produttività specifica non si ha una prevalenza netta dell'una o dell'altra taglia. Con le concentrazioni elevate di nitrati e urea, i reattori da 120l manifestano una produttività specifica più elevata, mentre l'inverso accade con le concentrazioni basse dei medesimi nutrienti. Nel secondo caso sembra prevalere l'effetto della maggiore quantità di energia erogata dai reattori da 6l. La produttività specifica di olio è in genere maggiore per i reattori da 6l confermando questa tendenza. Inoltre una minore concentrazione di nutrienti e in particolare la carenza di Azoto, stimola le alghe a produrre lipidi, come ampiamente riportato in letteratura (Rodolfi *et al.*, 2009, Converti *et al.*, 2009, Xin *et al.*, 2010, Han *et al.*, 2014). La percentuale d'olio riscontrata, riferita alla biomassa algale secca, in questa serie di prove per i reattori da 6l, è oscillata tra un minimo del 10,04% e un massimo del 38,40%, con un valore medio del 23,71%. Per i reattori da 120l, invece si ha un intervallo tra l'11,50% e il 51,60% con un valore medio del 22,93%.

Reattore	DFP	NaNO ₃	Urea	CO ₂	Peso secco g l ⁻¹	μ d ⁻¹	P _d g d ⁻¹	P _{olio} g d ⁻¹
F1	267	120	0	0	0,578	0,290	1,005	0,312
F2	179	60	0	0	0,368	0,254	0,559	0,159
F1	267	60	0	1	0,366	0,112	0,245	0,094
F2	179	120	0	1	0,443	0,171	0,455	0,087
F2	179	60	120	1	0,412	0,227	0,743	0,075
F1	267	120	120	1	0,484	0,256	2,004	0,354
F1	267	60	120	0	1,097	0,304	2,004	0,499
F2	179	120	120	0	0,746	0,262	1,171	0,233

Tabella 70: Produttività di biomassa e olio per i reattori da 6l.

Reattore	DFP	NaNO ₃	Urea	CO ₂	Peso secco g l ⁻¹	μ d ⁻¹	P _d g d ⁻¹	P _{olio} g d ⁻¹
R1	170	120	0	0	0,665	0,264	21,060	6,444
R2	116	60	0	0	0,353	0,190	8,055	2,172
R1	170	60	0	1	0,613	0,244	17,921	2,061
R2	116	120	0	1	0,492	0,245	14,483	1,825
R1	116	60	120	1	0,587	0,337	23,726	12,242
R2	170	120	120	1	0,867	0,338	35,206	8,379
R1	170	60	120	0	0,584	0,326	22,860	2,835
R2	116	120	120	0	0,406	0,312	15,184	2,126

Tabella 71: Produttività di biomassa e olio per i reattori da 120l.

I risultati delle prove, condotte con due repliche per ciascuna delle due taglie di reattore con la massima concentrazione di nitrati e di urea e la massima quantità di energia disponibile, sono riportati nella Tab.73.

Le velocità specifiche di crescita sono abbastanza simili tra le due taglie di reattori, anche se quelli da 120l presentano dei valori leggermente più elevati. Per la produttività specifica della biomassa sono stati calcolati valori compresi tra 0,35 e 0,42 $g\ l_{reattore}^{-1}\ d^{-1}$, per i reattori da 6l, mentre valori compresi tra 0,35 e 0,40 $g\ l_{reattore}^{-1}\ d^{-1}$ per i reattori da 120litri, e quindi abbastanza simili.

Il valore leggermente più elevato per i reattori da 6l si può spiegare in termini di maggiore quantità di energia erogata dal sistema di illuminazione.

La percentuale d'olio riscontrata, riferita alla biomassa algale secca, in questa serie di prove per i reattori da 6l, è oscillata tra un minimo del 22,73% e un massimo del 25,75%, con un valore medio del 24,14%. Per i reattori da 120l, invece si ha un intervallo tra il 21,60% e il 22,90% con un valore medio del 22,25%. La produttività specifica di olio è stata compresa tra 0,092 e 0,096 $g\ l_{reattore}^{-1}\ d^{-1}$ per i reattori da 6l e tra 0,076 e 0,093 $g\ l_{reattore}^{-1}\ d^{-1}$ per i reattori da 120l. Nella Tab.74 sono riportati i risultati delle prove eseguite con elevate concentrazioni di Azoto.

Reattore	DFP	NaNO ₃	Urea	CO ₂	Peso secco g l ⁻¹	μ d ⁻¹	P_d g d ⁻¹	P_{olio} g d ⁻¹
F1	267	120	120	1	1,613	0,263	2,547	0,574
F2	267	120	120	1	1,563	0,227	2,132	0,549
R1	170	120	120	1	1,496	0,270	48,516	11,110
R2	170	120	120	1	1,285	0,275	42,398	9,158

Tabella 72: Produttività di biomassa e olio per i reattori da 6l 120l con le due repliche.

Le velocità specifiche di crescita differiscono di poco tra le due taglie di reattori, con l'esclusione del valore per il reattore da 6l con 1000 mg l⁻¹ di nitrati che è il più elevato fra tutti. Per la produttività specifica della biomassa sono stati calcolati valori compresi tra 0,29 e 0,61 $g\ l_{reattore}^{-1}\ d^{-1}$ per i reattori da 6l, mentre valori compresi tra 0,21 e 0,23 $g\ l_{reattore}^{-1}\ d^{-1}$ per i reattori da 120litri, e quindi abbastanza differenti. Il valore più elevato per i reattori da 6l si può spiegare con una migliore utilizzazione dei nitrati che si traduce in una maggiore crescita della biomassa algale e dipende soprattutto dalla maggiore quantità di energia disponibile.

Nei reattori da 120l non si osserva una grande differenza nella produttività specifica di biomassa algale che comunque è più alta per la concentrazione maggiore di nitrati.

La tecnica del fotoperiodo con la conseguente minore disponibilità di energia non permette un'efficiente utilizzazione dell'elevato quantitativo di nitrati.

La percentuale d'olio riscontrata, riferita alla biomassa algale secca, in questa serie di prove per i reattori da 6l, è oscillata tra un minimo del 6,23% e un massimo dell'8,00%, con un valore medio del 7,12%. Per i reattori da 120l, invece si ha un intervallo tra il 6,00% e l'8,00% con un valore medio del 7,00%.

La produttività specifica di olio è stata compresa tra 0,018 e 0,049 $g\ l_{reattore}^{-1}\ d^{-1}$ per i reattori da 6l e tra 0,014 e 0,017 $g\ l_{reattore}^{-1}\ d^{-1}$ per i reattori da 120l.

In condizioni di forti concentrazioni di nitrati, se da un lato si ha una buona produzione di biomassa algale, dall'altro si ha una forte riduzione del contenuto d'olio che ne può rendere difficile l'uso nel settore dei biocombustibili.

Reattore	DFF	NaNO ₃	Fotoperiodo	CO ₂	Peso secco g l ⁻¹	μ d ⁻¹	P _d g d ⁻¹	P _{olio} g d ⁻¹
F1	267	500	24 h	1	1,600	0,183	1,756	0,109
F2	267	1000	24 h	1	2,750	0,224	3,689	0,295
R1	170	500	12 h	1	1,232	0,176	25,959	2,077
R2	170	1000	12 h	1	1,303	0,178	27,904	1,674

Tabella 73: Produttività di biomassa e olio per i reattori da 6l 120l con elevate concentrazioni di nitrati.

L'influenza della concentrazione di nitrati sulla quantità di olio e sulla quantità di biomassa per le diverse prove sperimentali eseguite, è mostrata nelle Figg.80-83.

Nella Fig.80 è evidente come la concentrazione dell'olio sia legata alla concentrazione dei nitrati. Nella prima parte in cui la concentrazione dei nitrati è mantenuta ai valori più bassi (60 mg l⁻¹), si ha complessivamente un incremento della percentuale d'olio nella biomassa algale. Incrementando la concentrazione di nitrati fino a 500 mg l⁻¹ si ottiene una biomassa algale con un contenuto di olio minimo. Lo stesso fenomeno si osserva incrementando la concentrazione di nitrati fino a 1000 mg l⁻¹.

La biomassa algale, invece, presenta un andamento inverso (Fig.81). Infatti, al crescere della concentrazione di nitrati si osserva un aumento del peso secco con un incremento che raggiunge il valore più elevato al massimo valore dei nitrati.

Tutte queste considerazioni valgono in egual misura per gli andamenti riportati nelle Figg.82-83.

Nel corso dell'attività sperimentale è stato studiato anche l'andamento della concentrazione dei nitrati e dell'urea per verificarne la rapidità di consumo alle differenti concentrazioni nelle condizioni operative impiegate. A titolo di esempio, nella Tab.74 sono riportati i tempi di consumo per l'urea e per i nitrati con le diverse concentrazioni impiegate per i reattori da 6l.

Esaminando i dati, si può notare come alle concentrazioni più basse (60 mg l⁻¹) i nitrati siano degradati in un tempo variabile tra 1,3 e 4 giorni, con una velocità proporzionale alla DFF fornita ai reattori. Per le stesse concentrazioni, con la presenza di urea, si registrano tempi decisamente superiori, soprattutto con la DFF inferiore. Per le concentrazioni più elevate (120 mg l⁻¹) i tempi si allungano ovviamente rispetto alle concentrazioni più basse, ma si accorciano con la presenza dell'urea che sembra avere un effetto accelerante nei confronti della loro degradazione. Alle concentrazioni molto elevate (500, 1000 mg l⁻¹) si hanno tempi di degradazione più lunghi, sia pure di poco, per la concentrazione inferiore.

Una possibile spiegazione è data dal fatto che un'elevata concentrazione di nitrati produce un notevole incremento nella biomassa algale e questo ne rende più rapido il consumo. Questo dato è molto importante se si vogliono contestualmente applicare le microalghe per l'abbattimento del carico di nitrati e per la produzione di olio.

La durata della prima fase, infatti, è importante per la riduzione della concentrazione dei nitrati che tuttavia non deve essere completa. La seconda invece deve essere dedicata completamente alla crescita della coltura algale con l'accumulo di olio nella biomassa in una condizione di mancanza di nitrati.

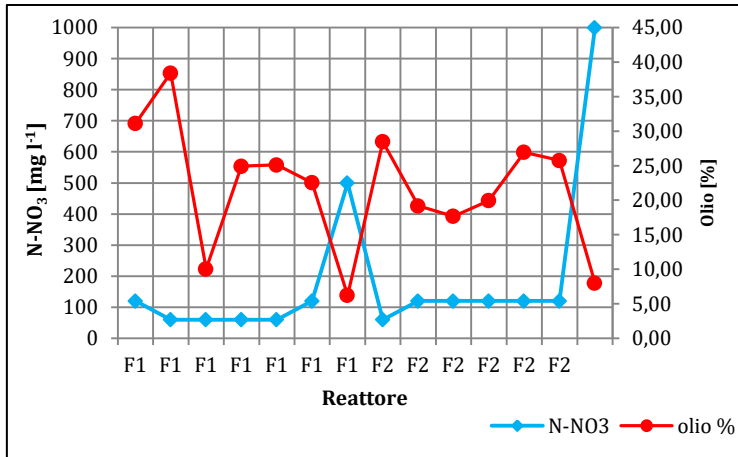


Figura 80: Andamento della concentrazione dei nitrati e dell'olio nei reattori da 6l.

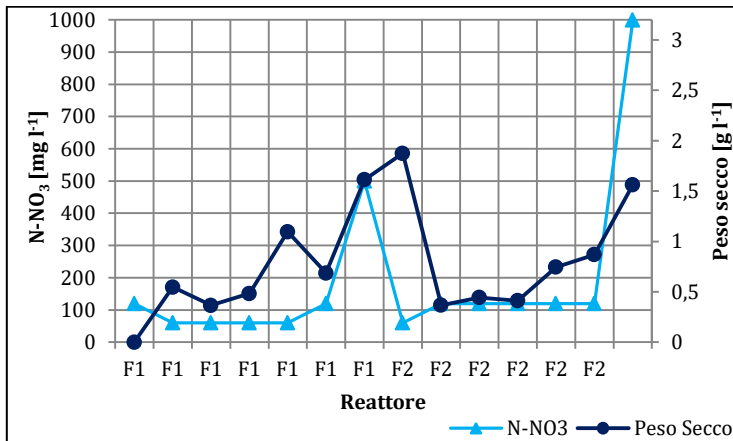


Figura 81: Andamento della concentrazione dei nitrati e della biomassa algale nei reattori da 6l.

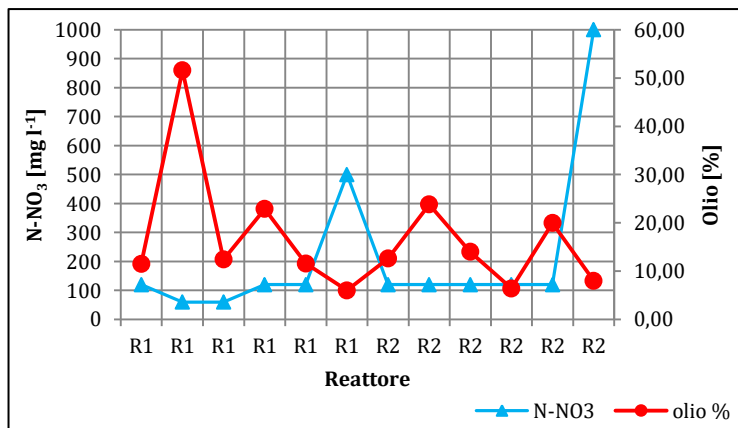


Figura 82: Andamento della concentrazione dei nitrati e dell'olio nei reattori da 120l.

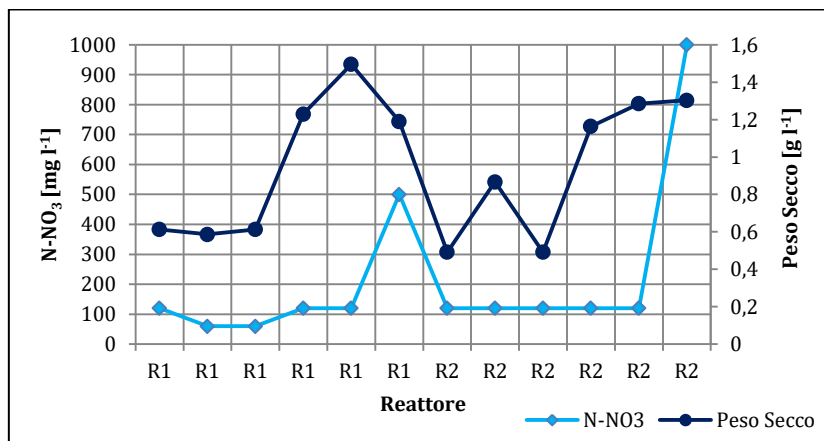


Figura 83: Andamento della concentrazione dei nitrati e della biomassa algale nei reattori da 120l.

Prova	DFD $\mu\text{m s}^{-1} \text{m}^{-2}$	NaNO_3 $[\text{mg l}^{-1}]$	Urea $[\text{mg l}^{-1}]$	CO_2	Tempo consumo NaNO_3 h	Tempo consumo urea d	Tasso riduzione Urea %
1	179	60	0	0	97	-	-
2	267	60	0	1	32	-	-
3	179	120	0	1	208	-	-
4	267	120	0	0	88	-	-
5	179	60	120	1	112	10	57,7
6	267	60	120	0	88	10	72,2
7	179	120	120	0	160	10	44,8
8	267	120	120	1	112	5	26
9	267	500	-	1	324	-	-
10	267	1000	-	1	312	-	-

Tabella 74: Tempi di consumo per i nitrati e l'urea alle differenti concentrazioni per i reattori da 6l.

Nelle Tabb.75-80 è riportato i risultati concernenti, l'analisi prossima, all'analisi ultima e alla determinazione del potere calorifico di alcuni campioni prelevati nel corso delle tre diverse serie di prove. Nella Tab.75 sono mostrati i risultati concernenti le prove condotte secondo il piano riportato nella Tab. 75 e cioè secondo il piano fattoriale previsto inizialmente. I valori dei solidi volatili sono abbastanza elevati rispetto a quelli di altre biomasse trattate nel corso dell'intera attività di ricerca e questo renderebbe le microalghe, ottenute in queste condizioni, particolarmente adatte anche per la conversione energetica mediante processi biochimici. Il valore del carbonio fisso è in genere più basso, mentre il tenore in ceneri è in linea con quello di diverse altre

biomasse vegetali erbacee e lignocellulosiche. Nella Tab.76 sono mostrati i risultati concernenti le prove condotte utilizzando la massima concentrazione di nitrati (120 mg l⁻¹) e di urea (120 mg l⁻¹) previste dal DoE e con l'immissione di CO₂ per tutti e quattro i reattori. In pratica, come affermato in precedenza, queste prove possono essere considerate due repliche per ciascuna taglia di reattore. Anche in questo caso si riscontrano valori elevati di sostanze volatili, bassi valori delle ceneri e un contenuto in carbonio in linea con i risultati delle prove relative al piano fattoriale.

Prova	Umidità %	ST %	SV_{tq} %	Ceneri_{tq} %	Carbonio fisso_{tq} %
F1 Prova 4	3,29	96,71	87,41	1,94	7,37
F2 Prova 1	5,41	94,59	84,1	2,45	8,05
F2 Prova 8	4,65	95,35	88,04	2,22	5,09
R1 Prova 2	3,12	96,88	90,43	1,97	4,48
R1 Prova 6	4,02	95,98	87,59	1,53	6,86
R2 prova 3	3,91	96,09	91,23	3,17	1,69
R2 Prova 7	5,65	94,36	82,66	4,43	7,28

Tabella 75: Analisi prossima per le prove relative al piano fattoriale.

Reattore	Umidità %	ST %	SV_{tq} %	Ceneri_{tq} %	Carbonio fisso_{tq} %
F1	4,16	95,83	85,87	1,70	8,26
F2	4,53	95,48	84,98	2,45	8,05
R1	6,25	93,75	80,18	3,74	9,83
R2	5,99	94,01	81,72	2,00	10,29

Tabella 76: Analisi prossima per le prove relative alle due repliche per ciascuna taglia di reattore.

Nella Tab.77 sono mostrati i risultati concernenti le prove condotte utilizzando elevate concentrazioni di nitrati (500 e 1000 mg l⁻¹), di urea e con l'immissione di CO₂ per tutti e quattro i reattori. In questo caso si nota come la biomassa algale abbia caratteristiche nettamente differenti rispetto a quelle ottenute nelle altre due prove e cioè un tenore in sostanze volatili molto inferiore, un tenore in ceneri molto più elevato, anche se con un contenuto in carbonio abbastanza simile.

Reattore	Umidità %	ST %	SV_{tq} %	Ceneri_{tq} %	Carbonio fisso_{tq} %
F1	7,65	92,35	59,15	25,27	7,93
F2	6,87	93,13	62,85	22,22	8,06
R1	5,90	94,10	69,90	12,13	12,08
R2	8,11	91,90	69,68	10,71	11,51

Tabella 77: Analisi prossima per le prove relative alle elevate concentrazioni di nitrati.

Questi risultati, come si vedrà più avanti, sono anche confermati dal basso tenore in carbonio e da un basso potere calorifico.

Già in precedenza, comunque, era stata rilevata anche la minore percentuale in olio rispetto a tutte le altre prove. Nella Tab.78 sono mostrati i risultati concernenti le prove condotte secondo il piano riportato nella Tab.64 e cioè secondo il piano fattoriale previsto inizialmente.

Si riscontrano un contenuto di Carbonio molto elevato e un contenuto in Azoto altrettanto alto, con un potere calorifico per tutti i campioni superiore a 25 MJ kg_{ss}⁻¹ e quindi decisamente superiore a quello di molte altre biomasse vegetali. L'elevato valore del Carbonio, ma anche dell'Azoto indicano una capacità della biomassa algale di assorbire elevate quantità di questi elementi. Il rapporto C/N è tipico di una biomassa particolarmente adatta alla conversione energetica mediante processi biochimici. Nella Tab.79 sono riportati i dati relativi alle prove con due repliche per ciascuna taglia di reattore, con la massima concentrazione di nitrati (120 mg l⁻¹) e urea (120 mg l⁻¹), con l'immissione di CO₂ e la massima intensità luminosa disponibile.

Reattore	C _{ss} %	H _{ss} %	N _{ss} %	O _{ss} %	C/N	PCI MJkg _{ss} ⁻¹
R1 Prova 2	67,22	10,01	2,03	20,74	33,08	30,76
R2 Prova 3	60,14	9,13	4,74	22,70	12,70	25,16
R1 Prova 6	61,00	9,38	5,91	20,49	12,00	26,64
R2 Prova 7	55,53	8,57	6,03	27,53	9,83	26,28

Tabella 78: Analisi ultima e PCI per le prove relative al piano fattoriale.

Reattore	C _{ss} %	H _{ss} %	N _{ss} %	O _{ss} %	C/N	PCI MJkg _{ss} ⁻¹
F1	63,06	8,95	4,08	23,92	15,46	28,32
F2	62,05	8,80	4,21	24,94	14,74	28,76
R1	60,24	8,41	6,13	23,46	10,17	26,26
R2	59,41	8,51	6,38	22,76	9,42	24,92

Tabella 79: Analisi ultima e PCI per le prove relative alle due repliche per ciascuna taglia di reattore.

Anche in questo caso si ottiene una biomassa algale con un elevato contenuto in Carbonio e Azoto e con un alto potere calorifico inferiore. Come si può notare osservando i dati, i due reattori da 120l sembrano avere una diversa capacità di assorbimento dell'Azoto, manifestando quindi una differente efficienza nei confronti della crescita microalgale. Differenze tra le prestazioni delle due taglie di reattori sono state già evidenziate in precedenza. Nello stesso tipo di prove i reattori da 120l, infatti, hanno presentato una velocità specifica di crescita leggermente più elevata. Tuttavia la conferma di questo risultato richiede l'esecuzione di prove sperimentali specifiche e una conseguente ulteriore attività di ricerca.

Nella Tab.80, infine, sono riportati i dati relativi alle prove condotte con alte concentrazioni di nitrati. Ancora una volta le biomasse algali ottenute con i reattori da 120l presentano un contenuto in Azoto molto superiore rispetto a quelle ottenute con i

reattori da 6l. Il contenuto di Carbonio è in generale più basso rispetto a quello riscontrato in tutte le altre prove e i valori di potere calorifico inferiore sono i più bassi in assoluto.

Questo andamento è confermato anche dai risultati relativi alle velocità di crescita, risultate le più basse in assoluto, nonché alla produttività in olio molto bassa anch'essa. Si può ipotizzare che elevate concentrazioni di nitrati abbiano un effetto rallentante nei confronti della crescita microalgale, a parità di altre condizioni, per cui si deve tenere conto di questo aspetto se s'intende impiegarle in processi depurativi integrati con la produzione di energia.

Reattore	C _{ss} %	H _{ss} %	N _{ss} %	O _{ss} %	C/N	PCI MJ kg _{ss} ⁻¹
F1	38,57	6,04	3,88	51,51	9,93	16,34
F2	40,47	6,29	4,88	48,36	8,29	17,71
R1	51,13	7,18	8,04	20,77	6,36	21,24
R2	52,63	7,64	8,74	19,33	6,02	22,03

Tabella 80: Analisi ultima e PCI per le prove relative alle elevate concentrazioni di nitrati.

6.5 Conclusioni

I risultati dell'analisi DoE hanno messo in evidenza come la crescita della *Nannochloropsis oculata* sia influenzata significativamente dall'intensità luminosa e dalla presenza di nitrati. Sono state rilevate anche interazioni tra la luce e i nitrati.

Le concentrazioni maggiori di biomassa algale si ottengono sempre nelle condizioni di intensità luminosa più elevata e con la massima concentrazione di urea e nitrati.

La presenza o l'assenza della CO₂, invece, non sembra influenzare in modo determinante la crescita algale. La quantità di olio prodotto nelle diverse condizioni è compresa tra il 6% e il 51% del peso secco. La massima produttività in olio si ottiene con basse concentrazioni di nitrati e alti livelli di urea. L'urea sembra avere un effetto positivo sulla crescita microalgale e questo potrebbe portare a una più rapida degradazione dei nitrati per cui le colture algali rimangono rapidamente in condizioni di carenza di Azoto, nelle quali producono elevate quantità di olio.

Le concentrazioni elevate di nitrati incrementano, in generale, la produzione di biomassa algale, ma deprimono fortemente la produzione di olio.

Le produttività ottenute con questa specie algale sono in linea o superiori a quelle riportate in altri studi, la gran parte dei quali peraltro ottenuti su scala di laboratorio e con volumi colturali al massimo di qualche litro (Chiu *et al.*, 2009, Converti *et al.*, 2009, Campaña-Torres *et al.*, 2012, Kandilian *et al.* 2013, Olofsson *et al.*, 2014)

In linea puramente teorica, considerando una produttività media in olio di 0,090 g l_{reattore}⁻¹d⁻¹ per produrre una tonnellata al giorno di olio occorrerebbero reattori con un volume complessivo di circa 11.000 m³, che ipotizzando uno spessore della coltura pari a 0,05 m e un'installazione con pannelli piani richiederebbe una superficie di circa 22 ha di reattori. Tuttavia considerando invece la produzione per 15 giorni sarebbero necessari circa 2 ha e quindi con una resa enormemente superiore rispetto per esempio ad una oleaginosa comune (il colza) che richiede 1 ha per la produzione della medesima quantità di olio, ma con un ciclo colturale lungo diversi mesi.

La coltivazione della *Nannochloropsis oculata* può trovare spazio in Sardegna per via delle specifiche condizioni del territorio e dell'entità dell'irradiazione luminosa.

La disponibilità di acqua salina, di aree marginali e la possibilità di impiegarla in acquacoltura, nel settore della depurazione e nella produzione di energia ne può rendere possibile la coltivazione in questa regione.

Capitolo 7

Conclusioni

Questo lavoro di ricerca è stato svolto tenendo conto del contesto economico, ambientale e delle scelte strategiche adottate per l'energia a livello regionale.

Lo scopo di questa tesi di dottorato era, infatti, quello di verificare le possibilità di impiego delle biomasse vegetali e algali in Sardegna per la produzione di energia inquadrando all'interno della pianificazione energetica regionale.

L'obiettivo generale perseguito è stato quello di cercare soluzioni tecniche per la produzione di energia da biomasse vegetali, residuali e algali, impiegando processi realmente praticabili in base alla disponibilità di risorse e alla specificità del territorio isolano.

Un piano energetico regionale in Sardegna, infatti, non può prescindere dalla condizione d'insularità e questo impone di operare secondo criteri improntati alla sostenibilità economica e ambientale, oltre che alla certezza della disponibilità delle risorse. La strategia regionale in campo energetico si basa su una gestione efficiente, intelligente, integrata e distribuita dell'energia. Le linee tracciate per attuare questa strategia prevedono fundamentalmente azioni di efficientamento energetico, di integrazione e interconnessione dei sistemi energetici, di generazione distribuita dell'energia, sia da fonti rinnovabili che tradizionali. Nella regione è indispensabile avere la maggiore diversificazione possibile delle fonti energetiche e disporre preferibilmente di un numero elevato di operatori nel mercato dell'energia in modo da avere costi competitivi con quelli di altri mercati internazionali. È molto importante valorizzare dal punto di vista energetico le risorse interne dell'isola, delle quali le biomasse costituiscono una parte fondamentale (PEAR Sardegna, 2014).

La valenza delle biomasse nel comparto energetico è stata rafforzata dalle scelte programmate in Sardegna che prevedono l'incentivazione per la valorizzazione energetica dei residui agroindustriali, il finanziamento di impianti pilota di tipo cogenerativo, per il teleriscaldamento e per la valorizzazione delle colture microalgali.

È prevista l'attuazione inoltre di progetti di promozione e sviluppo dell'energia da biomasse mediante accordi di filiera per la produzione di energia termica da biomasse legnose, biocombustibili da colture dedicate e comunque l'impiego delle biomasse residuali.

Lo scenario "sviluppo" ipotizzato nel PEAR, 2014 prevede la creazione di distretti energetici per lo sviluppo di reti intelligenti, la realizzazione nei medesimi distretti di micro-reti alimentate da fonti rinnovabili, il sostegno di attività manifatturiere e dei servizi nel settore dell'energia distribuita.

A livello europeo e nazionale la generazione distribuita di energia rappresenta, infatti, una nuova linea di sviluppo per l'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili con la rete dell'utenza. Gli scenari previsti nel PEAR 2014 considerano le biomasse come vettore energetico per la micro e la mini-cogenerazione a livello domestico e industriale.

Lo studio sulle potenzialità energetiche delle biomasse, noto anche come Piano regionale delle biomasse, rappresenta uno strumento efficace per la ricognizione delle biomasse di diverso genere presenti sul territorio. Esso ha consentito di individuare con precisione sia la quantità sia la distribuzione della risorsa biomassa nell'intero territorio isolano. Questo ha reso possibile l'individuazione di specifici bacini di approvvigionamento, dislocati sul territorio, per ciascuna tipologia. In questo modo è stato possibile prevedere la potenzialità energetica di ciascuna zona della regione e

date le caratteristiche chimico-fisiche delle biomasse, considerare per la conversione energetica processi biochimici e termochimici.

Il medesimo studio, infatti, evidenzia come nella regione siano disponibili circa 6.300.000 t a⁻¹ di biomasse, delle quali oltre 5.000.000 t a⁻¹ rappresentate da biomasse residuali. Se ne ricava un potenziale in biogas pari a 260.000.000 m³ a⁻¹ che corrisponde a 136 ktep e un potenziale energetico da processi termochimici pari a 284 ktep.

Le biomasse residuali in particolare possono fornire un contributo molto importante nel settore energetico in Sardegna. Nel Piano regionale delle biomasse è stato stimato che esse possono teoricamente consentire l'installazione di impianti per una potenza complessiva di 157 MW nell'ambito dei processi di produzione di biogas e per 327 MW nell'ambito di processi termochimici. Questi sono dati riferiti alle potenze in ingresso agli impianti. Se si considerano i rendimenti di conversione energetica si possono evidentemente avere valori molto diversi, laddove si considerino caldaie (85-90%) o piccoli impianti di generazione elettrica (15-20%).

Se si prendono in considerazione gli impianti a biomasse presenti in Sardegna, si rileva che è impegnato l'11% circa del potenziale energetico per il biogas, mentre il 45% del potenziale energetico da processi termochimici. Ne risulta ancora un potenziale energetico da biomassa disponibile pari a circa 260 ktep di energia primaria trasformabile in energia termica ed elettrica.

Le biomasse residuali derivano quasi completamente dal sistema agroindustriale e in genere la loro gestione è problematica sia perché sono molto deperibili, sia perché sono originate da produzioni contraddistinte dal carattere della stagionalità.

Quest'aspetto determina anche il governo di quantità elevate di biomasse in brevi periodi e ne complica notevolmente gli aspetti logistici. C'è dunque la necessità di impianti che possano trattare in breve tempo elevate quantità di materie prime e che nel contempo producano energia con elevata efficienza.

Potere inviare le biomasse residuali a processi di conversione energetica, significa comunque valorizzarle dal punto di vista economico e questo consente anche significativi recuperi economici destinati alla riduzione dei costi industriali dei prodotti principali. Se si considera per esempio la trasformazione del latte ovino, nella quale la Sardegna detiene il primato in Italia, come già detto in precedenza, la resa in formaggio e altri prodotti si attesta intorno al 20%, mentre il restante 80% è costituito da materiali residui. In assenza di altre soluzioni tecniche questi residui devono essere destinati a un costoso smaltimento. La disponibilità di un adeguato processo di digestione anaerobica consente di ricavarne energia da reimpiegare eventualmente nei processi di trasformazione, oltre che di stabilizzare un residuo molto deperibile.

La digestione anaerobica, su scala pilota, ha consentito di trovare una soluzione al problema del trattamento di diversi residui agroindustriali e di valutare anche la possibilità di progettare impianti di piccola taglia (< 50 kW) destinati a unità produttive o commerciali di dimensione ridotta.

Nel caso dei residui ortofrutticoli è stato messo a punto un processo di trattamento per l'impiego come singolo substrato e questo comporta numerosi vantaggi per il Mercato Ortofrutticolo della Sardegna, ma in prospettiva per tutti i mercati italiani.

E', infatti, possibile coprire con l'energia prodotta dai residui il 25 % dei consumi di energia elettrica del mercato stesso. E' possibile impiegare l'energia termica per la produzione di acqua calda necessaria per esempio al processo di lavaggio delle cassette che contengono la frutta e i vegetali, consentendone il riciclo per 2-3 volte. Si ha una riduzione del volume e la stabilizzazione microbiologica dei residui da conferire eventualmente in discarica, oppure si può destinare il digestato all'impiego in campo agronomico. Il trattamento di altri residui, reperibili a breve distanza dall'impianto di trattamento (prodotti invenduti dei dettaglianti, residui agricoli) può consentire un

aumento della taglia dell'impianto con una maggiore produzione di energia elettrica e termica.

Nel caso dei residui dell'industria delle patate è stato messo a punto un processo per il trattamento contestuale di residui solidi, acque reflue e *chips* di scarto in condizioni termofile. L'impiego di una miscela equilibrata dei residui solidi e delle acque di processo consente di evitare il ricorso a due trattamenti separati ottenendo la produzione di una quantità di energia superiore rispetto al trattamento dei soli scarti solidi. In questo modo è possibile arrivare a produrre circa il 20% dell'energia elettrica necessaria al processo di trasformazione industriale, oltre all'impiego integrale dell'energia termica per gli usi di fabbrica.

Sempre nell'ambito della digestione anaerobica un risultato rilevante per il sistema regionale è quello che si è ottenuto con le prove di sostituzione delle colture dedicate con miscele appropriate di biomasse residuali. È stato possibile sostituire per una quota molto elevata (fino al 70 %) le colture dedicate, alimentate agli impianti di digestione anaerobica, con miscele di sanse d'oliva, acque di vegetazione, scotta di latte ovino e letame. Questo ha richiesto la messa a punto di un processo di co-digestione specifico e lo stretto controllo dei parametri fondamentali del processo. È stato verificato che l'adozione del trattamento di triturazione preliminare delle biomasse non sembra avere un effetto significativo sulla resa produttiva in biogas.

La disponibilità in quantità elevata di queste biomasse in Sardegna può consentire di ridurre notevolmente i costi di approvvigionamento delle materie prime, l'impegno di terreni agricoli e di risolvere annosi problemi ambientali generati dalla presenza di specifiche attività agroindustriali.

Se si dovessero alimentare solamente i 18 impianti da 1 MW di potenza elettrica installata con trinciato di mais occorrerebbero circa 350.000 t a⁻¹ e sarebbero necessari circa 7.000 ha. Se si impiegasse la miscela di letame, scotta, acque di vegetazione, sanse in sostituzione del 70% del trinciato di mais, la superficie da occupare si ridurrebbe a circa 2.000 ha. Anche utilizzando totalmente tutta la scotta prodotta in Sardegna, unitamente a tutte le acque di vegetazione e alla sanse denocciolata, i 18 impianti sardi potrebbero assorbire ancora 40.000 t di acque di vegetazione e di 4.500 t di sanse.

Il lavoro sperimentale e in particolare il confronto con un impianto industriale ha messo quindi in evidenza come gli impianti industriali di digestione anaerobica presenti in Sardegna, in genere tutti con la stessa configurazione, possano incrementare in una misura importante le loro prestazioni.

Un aspetto che è importante considerare per l'immediato futuro è rappresentato dalla possibilità di trovare un impiego all'energia termica prodotta dai co-generatori. Attualmente, data la localizzazione degli impianti in aree distanti da possibili utilizzi, solo una minima parte di questa energia è impiegata dagli impianti di digestione anaerobica stessi per il mantenimento delle temperature di processo, mentre la gran parte è dispersa nell'ambiente.

Una possibile soluzione è di impiegare questa energia per il trattamento di alcuni residui agroindustriali, normalmente caratterizzati da percentuali elevate di acqua per la riduzione dei volumi, con la loro stabilizzazione che ne consentirebbe l'impiego differito nel tempo sia negli stessi impianti di digestione anaerobica che quale materia prima per alimentare altri processi industriali.

Il trattamento con la digestione anaerobica di biomasse derivanti dai processi di trasformazione agroindustriale può consentire un interessante recupero energetico per le imprese di un settore fondamentale per l'economia isolana. È possibile sfruttare integralmente le materie prime, ridurre i costi di produzione e ottenere residui

stabilizzati da inviare allo smaltimento, da reimpiegare in campo agronomico o da destinare ad altri usi.

L'applicazione di tecniche statistiche multivariate, condotta mediante l'analisi delle componenti principali e l'analisi discriminante lineare, ha consentito di individuare le differenze tra le diverse fasi del processo e di esplorare più compiutamente le relazioni tra le diverse variabili implicate nel processo stesso. In particolare l'analisi discriminante lineare ha permesso di distinguere le diverse fasi del processo di digestione anaerobica in funzione delle variazioni della miscela dei residui ortofrutticoli e di individuare le caratteristiche necessarie delle materie prime per la produzione di energia. La stessa tecnica ha consentito una differenziazione netta tra fasi di processo condotte con o senza l'impiego dell'operazione di triturazione del substrato e questo è molto importante per fare una scelta di processo in modo oggettivo.

Con l'analisi delle componenti principali è stato possibile individuare oggettivamente le variabili realmente utili per la conduzione del processo di digestione anaerobica.

Per tutti i substrati utilizzati nell'esecuzione delle prove sperimentali e in tutte le condizioni di temperatura è necessario tenere sotto controllo principalmente i parametri SV e OLR poiché tutte le risposte del sistema anaerobico dipendono principalmente da questi.

La simulazione del possibile impatto ambientale delle emissioni generate dalla combustione del biogas prodotto mediante la digestione anaerobica dei residui agricoli e agro-industriali, non ha messo in evidenza particolari problematiche.

Nel settore della pianificazione relativa alla produzione di energia da biomasse forestali, un altro interessante risultato ottenuto nel corso della attività di ricerca è dato dalla messa a punto di una specifica metodologia per la valutazione del potenziale energetico di uno specifico territorio regionale. In particolare, la metodologia è stata applicata al caso-studio dell'Ogliastra, la Provincia che detiene il territorio con il maggiore indice di boscosità della Sardegna. La conoscenza con precisione del potenziale energetico è di assoluta rilevanza per la pianificazione della produzione di energia e soprattutto per la definizione della taglia degli impianti installabili.

L'analisi di dettaglio è partita con un'indagine delle caratteristiche del territorio, proseguendo con l'impiego del suolo, con l'esplorazione della carta della vegetazione, con la valutazione delle caratteristiche chimico-fisiche delle biomasse forestali, con la determinazione della quantità di biomasse effettivamente ritraibile, con la scelta della tecnologia di conversione energetica più adatta e con una valutazione della possibile taglia degli impianti.

E' emerso che con le biomasse realmente disponibili in quel territorio si possono installare solamente impianti di combustione di piccola taglia. I vantaggi stanno nel fatto che essi possono essere alimentati con biomasse provenienti interamente da filiere locali e contribuire a una migliore gestione del territorio e a un utilizzo razionale delle risorse forestali. La pulizia dei boschi, per esempio, è di fondamentale importanza anche nella prevenzione di calamità quali gli incendi che nel periodo estivo rappresentano una grave minaccia per il patrimonio forestale dell'intera regione e può rappresentare una fonte costante di materie prime.

Tuttavia per lo sfruttamento ragionato delle biomasse forestali a fini energetici continuo nel tempo, è necessario che ciascun territorio si doti di strumenti di pianificazione forestale che consentano una programmazione a lungo termine dell'intera filiera.

La pianificazione forestale territoriale e di dettaglio è una condizione essenziale affinché le amministrazioni, i proprietari e i gestori di aree forestali possano programmare in modo sostenibile l'utilizzo delle superfici forestali, al fine di

perpetuare nel tempo le risorse boschive locali, a beneficio della produzione di biomasse per l'autoconsumo.

Poiché una parte rilevante del patrimonio forestale vocato alla produzione di biomasse ricade all'interno delle terre civiche, la destinazione delle biomasse forestali dell'Ogliastra dovrebbe essere destinata al soddisfacimento del mercato locale.

Occorre, inoltre, evidenziare che la gestione e la proprietà forestale in Ogliastra sono ascrivibili a una pluralità di soggetti, ma non è stato possibile discriminare la gestione comunale pubblica dalla proprietà privata.

Il lavoro svolto in Ogliastra può rappresentare un valido modello operativo per tutte le altre aree della Sardegna. In particolare la metodologia utilizzata e verificata in questo contesto ha mostrato la sua efficacia in termini di rapidità e semplicità d'uso.

Uno strumento di questo genere può trovare un'estensione della sua applicazione in tutto il territorio regionale, anche per altre tipologie di biomasse, per valutare l'opportunità di impiego di queste materie prime rinnovabili da un punto di vista economico e ambientale.

Nel settore delle biomasse algali, i risultati delle prove di crescita eseguite per la specie algale *Nannochloropsis oculata* con due taglie di reattori applicando la tecnica DoE hanno consentito di trarre diverse conclusioni interessanti per future applicazioni in Sardegna.

La velocità specifica di crescita di questa specie algale è influenzata principalmente dall'intensità luminosa e dalla presenza di elevate concentrazioni di nitrati. L'intensità luminosa tende a incrementare la velocità di crescita, mentre la combinazione con i nitrati non sembra avere lo stesso effetto. La velocità di crescita è differente per le diverse taglie di reattori, presentandosi più elevata per quelli di taglia maggiore. Questo aspetto tuttavia va considerato in una prospettiva futura di ricerca con un'attività sperimentale specifica che studi l'influenza della taglia del reattore sulla velocità di crescita microalgale.

La presenza di urea determina un consumo più rapido dei nitrati e porta a una concentrazione di biomassa finale in genere più elevata rispetto all'assenza.

Il contenuto d'olio nella biomassa algale è influenzato notevolmente dalla presenza dei nitrati e quando la concentrazione di questi ultimi aumenta in modo importante, se ne riscontra una rilevante riduzione.

Occorre dunque trovare un compromesso accettabile tra la degradazione dell'Azoto da parte delle microalghe per la produzione di una buona quantità di biomassa algale e un contenuto d'olio sufficientemente alto per l'impiego in campo energetico.

La possibilità di utilizzare la *Nannochloropsis oculata* nel settore dell'acquacoltura sia come alimento, sia per la depurazione delle acque reflue ne può rendere sostenibile anche l'uso nel settore della produzione di energia.

L'irradiazione abbastanza elevata in Sardegna (mediamente $1.600 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), le temperature medie intorno ai $18\text{-}25^\circ\text{C}$ per almeno 7 mesi all'anno, soprattutto nelle zone costiere, la presenza di numerose aree marginali incolte fanno sì che il suo territorio sia abbastanza vocato per le colture microalgali. L'elevata produttività di biomassa e olio per unità di superficie (par. 6.5) possono rappresentare una nuova e interessante opportunità economica per la regione.

In sintesi, si può dire che le biomasse vegetali, residuali e algali possono essere rilevanti non solo per il settore energetico, ma anche per l'intera l'economia agroindustriale dell'isola. Esse sono a tutti gli effetti materie prime totalmente rinnovabili e possono consentire di ripensare completamente la produzione agroindustriale.

Un approccio che si può utilizzare è l'applicazione del concetto di bioraffineria che permette di concepire sistemi produttivi integrati con i quali si realizza

contestualmente la produzione di alimenti sia per l'uomo sia per animali, sostanze chimiche e naturalmente energia, con notevoli benefici dal punto di vista economico e ambientale.

Una biomassa vegetale, ampiamente disponibile in Sardegna, è rappresentata dalla pianta di carciofo (la cui potenzialità è stata valutata anche nel Piano regionale delle biomasse) che rimane sul campo al termine della coltura. La Sardegna è, infatti, il terzo produttore italiano di questa ortiva con circa 12.000 ha ripartiti in quattro bacini concentrati in diverse zone della regione e i residui colturali, stimati in modo prudenziale, ammontano a circa 180.000 t a⁻¹.

E' teoricamente possibile sfruttare integralmente questa biomassa ottenendone energia sia mediante la digestione anaerobica, sia con la pirolisi, sostanze chimiche di interesse alimentare e farmaceutico quali l'inulina e le sostanze fenoliche, alimenti freschi e trasformati, fibre vegetali per l'impiego nel settore dell'imballaggio.

Questo naturalmente richiederà in futuro una specifica attività di ricerca necessaria alla valutazione della reale fattibilità, ma il settore sembra essere sicuramente promettente.

Bibliografia

- Abubaker J, Risberg K, Pell M, Biogas residues as fertilizers – Effects on wheat growth and soil microbial activities, *Applied Energy*, 99,126–134, 2012.
- Agenzia Laore, 2013.
- Agris Sardegna, “Le colture agroenergetiche: un’opportunità per l’agricoltura? I risultati della sperimentazione in Sardegna”, Uta 2012.
- Ahmad A. L., Mat Yasin N.H., C. Derek C. J., Lim J. K., Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 584-593, 2011.
- Alburquerque J. A., De la Fuente C., Campoy M., Carrasco L., Najera I., Baixauli C., Caravaca F., Roldan Cegarra A., Bernal J., M. P., Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties, *Biomass and Bioenergy*, 48, 111-120, 2013.
- Álvarez J., Otero L., Lema J.M., A Methodology for optimizing feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes, *Bioresource Technology*, 101, 1153-1158, 2010.
- Andriani D., Wresta A., Atmaja T. Dwi, Saepudin A., A Review on Optimization Production and Upgrading Biogas Through CO₂ Removal Using Various Techniques, *Applied Biochemical Biotechnology*, 2010.
- Apparecchi per la conversione energetica di biogas, Comitato Termotecnico Italiano, 2007.
- Appels L., Baeyens Jan, Degreve Jan, Dewil R., Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge *Progress in Energy and Combustion Science* 34, 755–781, 2008.
- Arioli A., Guida per investire nella pirogassificazione, *Informatore Agrario*, supplemento Vol. 64, 5, 29-32, 2009.
- Asquer C., De Gioannis G., Orrù G., Piredda M., Spiga D., Biomass ash characterization and perspectives for their reuse in composting admixtures, 15th International Waste Management and Landfill Symposium, Forte Village_S.Margherita di Pula (CA)_Italy, 5-9 ottobre 2015.
- Asquer C., Pistis A., Cocco D., Scano E. A., Energy-Oriented optimization of an anaerobic digestion plant for the combined treatment of solid and liquid wastes in a potato chips industrial plant, 22nd European Biomass Conference and Exhibition, 23-26 June, Hamburg, 2014.
- ASTM D4239, Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion.
- ASTM D5142, Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures (withdrawn 2010, replace by D7582), 2010.
- ASTM D5373, Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke.
- Azeem K., Muhammad A., Muzammil A., Tariq M., Lorna D., The anaerobic digestion of solid organic waste, *Waste Management*, 31, 1737-1744, 2011.
- Beccali M., Columba P., D’Alberti V., Franzitta V., Assessment of bioenergy potential in Sicily: a GIS-based support methodology, *Biomass and Bioenergy*, 33 (1), 79-87, 2009.
- Benemann J., Microalgae for biofuels and animal feeds, *Energies*, 6, 5869-5886, 2013.

- Bernard O., Rémond B., Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth, *Bioresource Technology*, 123, 520-527, 2012.
- Berndes G., Hoogwijk M., Van de Broek, R., The contribution of biomass in the future global energy suppl: a review of 17 studies, *Biomass and Bioenergy*, 25, 1-28, 2003.
- Bianchi M., Spina P.R., Tomassetti G., Forni D., Ferrero E., Le tecnologie innovative ed efficienti nei sistemi di generazione in assetto co-trigenerativo e nei sistemi integrati con unità a pompa di calore nelle applicazioni industriali e del terziario, ENEA, MISE, Report RSE/18, 2009.
- Biocombustibili solidi, caratterizzazione del pellet a fini energetici, Comitato Termotecnico Italiano (CTI), 2004.
- Biocombustibili-Specifiche e classificazione, Comitato Termotecnico Italiano (CTI), 2000.
- Bocci, Sisinni M., Moneti M., Vecchione L., Di Carlo A., Villarini M., State of art of small scale biomass E. gasification power systems: a review of the different technologies, *Energy Procedia*, 45, 247-256, 2008.
- Bohn I., Björnsson L., Mattiasson B., The energy balance in farm scale anaerobic digestion of crop residues at 11–37°C, *Process Biochemistry*, 42, 57-64, 2007.
- Bouallagui H., Torrijos M., Godon J.J., Moletta, R., H, Y. Touhami, Delgenes J.P., Hamdi M., Two-phases anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactors performance, *Biochemical Engineering Journal*, 21, 193-197, 2004.
- Bouallagui H., Haouari O., Touhami Y., Cheikh R. Ben, Marouani L., Hamdi M., Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste, *Process Biochemistry*, 39, 2143-2148, 2004.
- Bouallagui H., Touhami Y., Cheikh R. Ben, Hamdi M., Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes, *Process Biochemistry*, 40, 989–995, 2005.
- Brambilla M., Araldi F., Marches M., Bertazzoni B., Zagni M., Navarotto P., Monitoring of the startup phase of one continuous anaerobic digester at pilot scale level. *Biomass and Bioenergy*, 36, 439-446, 2012.
- Brennan L., Owende P., Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 557-577, 2010.
- Bridgewater A. V., Meier D., Radlein D., An overview of fast pyrolysis of biomass, *Org Geochem*, 30, 1479-1493, 1999.
- Bryan A.B., Ward J., Hobbs T., An assessment of the economic and environmental potential of biomass production in an agricultural region, *Land Use Policy*, 25, 4, 533-49, 2008.
- Calvert K., Mabee W., Spatial analysis of Biomass Resources within a Socio-Ecologically Heterogeneous Region: Identifying Opportunities for a Mixed Feedstock Stream, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3, 209-232, 2014.
- Campaña-Torres A., Martínez-Córdova L. R., Martínez-Porchas M., López-Elías J. A., Porchas-Cornejo M. A., Productive response of *Nannochloropsis oculata*, cultured in different media and efficiency as food for the rotifer *Brachionus rotundiformis*, *PHYTON*, 81, 45-50, 2012.
- Campbell J. E., Lobell D.B., Genova R. C., Field C. B., The global potential of bioenergy on abandoned agriculture lands, *Environmental Science & Technology*, 42, 5791-5795, 2008.

- Capros P., De Vita A., Taxis N., EU Energy transport and GHG emission trends to 2050, European Commission, p.44, 2013.
- Cavinato C., Fatone F., Bolzonella D., Pavan P., Thermophilic anaerobic co-digestion of cattle manure with agro-wastes and energy crops: Comparison of pilot and full scale experiences, *Bioresource Technology*, 101, 545-550, 2010.
- CEN EN 14918:2009, Solid biofuels – Determination of calorific value.
- Cerullo S., Pellegrini A., Stima delle quantità di residui legnosi prodotti in Italia. AssoLegno, 2002.
- Chavero Jorge, Harrold Duff, Marbach Timothy, “*Equilibrium and kinetics analysis of NOx reduction from biogas combustion*”, ASME 2011 power conference , vol. 1, USA July 12-14, ISBN: 978-0-7918-4459-5, 2011.
- Cheng J. L., Timilsina G. R., Status and barriers of advanced biofuel technologies: A review, *Renewable Energy*, 36, 3541-3549, 2021.
- Chiaramonti D., Prussi M., Casini D., Tredici Mario R, Rodolfi L., Bassi N., Chini Zittelli G., Bondioli P., Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible, *Applied Energy*, 102, 101-111, 2013.
- Chisti Y., Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, 25, 294-306, 2007.
- Cioffi A., Rilievo indici di relazione tra produzioni agricole e biomassa residuale associata, analisi del mercato delle biomasse residuali nelle province delle regioni: Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria, Sicilia e Sardegna, Report RSE 2009/50, ENEA 2009.
- Clasceri L., Greenberg A., Eaton A., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. Amer Public Health Assn, 1931, 1999.
- Cocco D., Deligios Paola A., Ledda L., Sulas L., Viridis A., Carboni G., LCA Study of Oleaginous Bioenergy Chains in a Mediterranean Environment, *Energies*, 7, 10, 6258-6281, 2014.
- Cocco D., Palomba C., Puddu P., Tecnologie delle energie rinnovabili, SGE editoriali, 2008.
- Converti A., Casazza A. A., Ortiz E. Y, P. Perego, Del Borghi M., Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris*, for biodiesel production, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48, 1146-1151, 2009.
- CORINE land Cover 2012.
- Corpo Forestale dello Stato, Inventario nazionale delle foreste e dei serbatoi forestali di carbonio, INFC, 2005.
- Ćosić B., Stanić Z., Duić N., Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: Case study Croatia, *Energy*, 36 (4), 2017-2028, 2011.
- Cresme Ricerche SPA, Il mercato delle costruzioni e le prospettive degli impianti termici e di condizionamento – Settore Residenziale, 2010.
- Cuetos M. J., Fernández C., Gómez X., Morán A., anaerobic Co-digestion of Swine Manure with Energy Crop Residues, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 16, 1044-1052, 2011.
- De Bashan Luz E., Bashan Y., Immobilized microalgae for removing pollutants: Review of practical aspects, *Bioresource Technology*, 101, 1611-1627, 2010.
- De Meester S., Demeyer J., Velghe F., Peene A., Van langenhove H., Dewulf Jo, The environmental sustainability of anaerobic digestion as a biomass valorization technology, *Bioresource Technology*, 121,, 396-403, 2012.
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 e s.m.i..

- Demirbas A., Demirbas F., *Algae Energy, Algae as a New Source of Biodiesel*, Springer-Verlag London, 2010.
- Demirbaş A., Demirbaş M. F., Importance of algae oil as a source of biodiesel, *Energy Conversion and Management*, 52, 163-170, 2011.
- Demirbaş A., Determination of combustion heat of fuels by using non-calorimetric experimental data. *Energy Edu Science Technology*, 1, 7-12, 1998.
- Demirbaş A., Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels, *Energy Explor Exploit*, 20, 2105-11, 2002.
- Demirbaş A., Sustainable cofiring of biomass with coal. *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, Issue 9, Elsevier, 1472, 2003.
- Demirel B., Yenigun O., Two-phase anaerobic digestion processes: a review, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77, 7, 743-755, 2002.
- Dettoni S., Paesaggi rurali della Sardegna, Dipartimento di Scienze della Natura e del Territorio, Università degli Studi di Sassari, 2015.
- Deublein D., Steinhauser A., *Biogas from waste and renewable resources - An introduction*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2008.
- Di Maria F., Sordi A., Micale C., Energy production from mechanical biological treatment and composting plants exploiting solid anaerobic digestion batch: an Italian case study, *Energy Conversion and Management*, 56, 112-120, 2012.
- Domac J., Segon V., Przulj I., Raijc K., Regional energy planning methodology, drivers and implementation-Karlovac County case study, *Biomass and Bioenergy*, 35, 4504-4510, 2011.
- Dong L., Liu H., Riffat S., Development of small scale and micro-scale biomass fuelled CHP systems-A literature review, *Applied Thermal Engineering*, 29, 2119-2126, 2009.
- Dornburg V., Van Vuuren D., Van de G. Ven, Langveld H., Meeusen M., Banse M., Van Oorsshot M., J., Van den Born Ros, G.J., Aiking H., Londo M., Mozaffarian H., Verweij P., Lysen E., Faaij André P.C., *Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy*, *Energy & Environmental Science*, 3, 258-267, 2010.
- Dragone G., Fernandes B., Vicente António A., Teixeira José A., *Third generation biofuels from microalgae*, Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology, Badajoz, Spain: Formatex Research Center, 2010.
- Durruty I., Zaritzky E., González J. F., Organic fractions influence on biogas generation from potato residues. Kinetic model generalization, *Biomass and Bioenergy*, 59, 458-467, 2013.
- Ehimen E. A., Sun Z. F., Carrington C. G., Birch E. J., Eaton-Rye J. J., *Anaerobic Digestion of microalgae residues from the biodiesel production process*, *Applied Energy*, 88, 10, 3454-3463, 2011.
- European Commission, *EU energy in figures*, Statistical Pocketbook 2012
- FAO, *Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand*. Main Report. ECE/TIM/SP/17, UN, New York and Geneva, 2000.
- FAO, *Global Forest Resources Assessment 2000- Main Report*. FAO Forestry paper 140, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2001.
- Faravelli T., Frassoldati A., Granata S., Cuoci A., Ranzi E., *Fenomenologia della combustione di biomasse*, Progetto E.C.A.T.E., 2006.

- Fernandes U., Costa M., Potential of biomass residues for energy production and utilization in a region of Portugal, *Biomass and Bioenergy*, 34 (5), 661-6, 2010.
- Field C.B., Campbell J.E., Lobell D. B., Biomass energy: the scale of the potential resource, *Trends in Ecology & Evolution*, 23, (2), 65-72, 2008.
- Fiorese G., Catenacci M., Bosetti V., Verdolini E., The power of biomass: experts disclose the potential for success of bioenergy technologies, *Energy Policy*, 65, 94-114, 2014.
- Fiorese G., Guarisio G., A GIS-based approach to evaluate biomass potential from energy crops at regional scale, *Environmental Modelling & Software*, 25, 702-711, 2010.
- Fishburn P. C., Method for estimating additive utilities. *Management Science*, 13, 7, 435-453, 1967.
- Flynn K. J., Davidson K., Leftley J. W., Carbon-nitrogen relations during batch growth of *Nannochloropsis oculata* (Eustigmatophyceae) under alternating light and dark, *Journal of applied phycology*, 5, 465-473, 1993.
- Franke-Whittle I., Walter A., Ebner C., Insam H., Investigation into the effect of high concentrations of volatile fatty acids in anaerobic digestion on methanogenic communities, *Waste Management*, 34, 2080-2089, 2014.
- Frei D. D., Herder P. M., Wijnia Y., Subrahmanian E., Katsikopoulos K., Clausing D. P., The Pugh Controlled Convergence Method: model-based evaluation and implications for design theory. *Research in engineering design*, 20, Issue 1, pp. 41-58, 2009.
- Gabriel, K. R., The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika*, 58, 3, 453-467, 1971.
- García-Maraver A., Zamorano M., Ramos-Ridao A., Díaz L.F., Analysis of olive grove residual biomass potential for electric and thermal energy generation in Andalusia (Spain), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (1), 16745- 751, 2012.
- Garcia-Peña E. I., Parameswaran P., Kang D. W., Canul-Chan M., Krajmalnik-Brown R., Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: Process and microbial ecology, *Bioresource Technology*, 102, 9447-9455, 2011.
- Ghirardi M. L., Zhang L., Lee J. W., Flynn T., Seibert M., Greenbaum E., Microalgae: a green source of renewable H₂, *Trends in Biotechnology*, 18, 12, 506-511, 2000.
- Gold S., Seuring S., Supply chain and logistic issues of bio-energy production, *Journal of Cleaner Production*, 19, 32-42, 2011.
- Gosh A., Conrad J. R., Klass L., Anaerobic acidogenesis of wastewater sludge, *Journal of the Water Pollution Control Federation* 47,1, 30-44, 1975.
- Guillard R.R.L., J.H. Ryther, Studies of marine planktonic diatoms *I.Cyclotella nana* (Hustedt) and *Detonulaconfervacea* (Cleve), *Can. Journal of Microbiology*, 8, 229-239, 1962.
- Guillard R.R.L., Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates in W.L.Smith, M.H. Chanley (Eds.), *Culture of Marine Invertebrate Animals*, Plenum Press, New York, 26-60, 1975.
- Guschina I. A., Harwood J. L., Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae, *Progress in lipid Research*, 45, 160-186, 2006.

- Haberl H., Beringer T., Bhattacharya S.C., Erb K-H., Hoogwijk M., The global potential of bio-energy in 2050 considering sustainability constraints, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, 394-403, 2010.
- Han L., Pei H., Hu W., Han F., Song M., Zhang S., Nutrient removal and lipid accumulation properties of newly isolated microalgal strains, *Bioresource Technology*, 165, 38-41, 2014.
- Harun R., Davidson M., Doyle M., Gopiraj R., Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility, *Biomass and Bioenergy*, 35, 741-747 2011.
- Harun R., Singh M., Forde G. M., Danquah M. K., Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1037-1047, 2010.
- Havličková K., Weger J., Šediva J., Methodology of analysis of biomass potential using GIS in the Czech Republic, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 58 (5), 159-161, 2005.
- Helsinki Resolution H1, Second Ministerial Conference on the protection of Forests in Europe, 1993.
- Hernández D., Riaño B., Coca M., García-González M.C., Treatment of agro-industrial waste water using microalgae-bacteria consortium combined with anaerobic digestion of the produced biomass, *Bioresource Technology*, 135, 598-603, 2013.
- Herrmann C., Heiermann M., Idler C, Effects of ensiling, silage activities and storage period on methane formation of biogas crops, *Bioresource Technology*, 102, 5153-5161, 2011.
- Hinken I., Vos E., Weichgrebe D., Rosenwinkel K.H., FOS/TAC-Herleitung, Methodik, Anwendung und Aussagekraft, *Biogas Journal*, 6, 94-100, 2012.
- Hirano A., Ueda R., Hirayama S., Ogushi Y., CO₂ fixation and ethanol production with microalgal photosynthesis and intracellular anaerobic fermentation, *Energy*, 22,2/3, 137-142,1997.
- Holm-Nielsen J. B., Dahl C. K., Esbensen K. H., Representative sampling for process analytical characterization of heterogeneous bioslurry system – a reference study of sampling issues in PAT, *Chemometrics and intelligent laboratory systems* 83 (2006), 114-126.
- Holm-Nielsen J. B., Seadi T. Al, Oleskowicz-Popiel P., The future of anaerobic digestion and biogas utilization, *Bioresource Technology*, 100, 5478–5484, 2009.
- Hong-Ei Yen, I. Chen-Hu, C. Yen Chen, Shih-Hsin Ho, Duu-Jong Lee, Jo-Shu Chang, Microalgae-based biorefinery-From biofuels to natural products, *Bioresource Technology*, 135, 166-174, 2013.
- Hong-Wei Yen, David E. Brune, Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane, *Bioresource and Technology*, 98, 130-134, 2007.
- Hoogwijk M., Faaij A., Van den Broek R., Berndes G., Gielen D., Turkenburg W., Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy, *Biomass and Bioenergy*, 25 (2), 119-33, 2003.
- Hoogwijk M., On the global and regional of renewable energy sources, in *Universiteit Utrecht*, 17-5-2004.
- <http://www.eunews.it>
- <http://www.iea.org>
- Hu Q., Environmental effects on cell composition. In Richmond A, Editor. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*.Oxford: Blackwell Science Ltd, 83-93, 2004.

- Hu Q., Sommerfield M., Jarvis E., Ghirardi M., Posewitz M., Seibert M., Darzins A., Microalgal triacylglycerols as a feedstocks for biofuel production: Perspectives and advances. *Plant Journal*, 54, 621-639, 2008.
- Huang G., Chen F., Wei D., Zhang X., Chen G., Biodiesel production by algal biotechnology, *Applied Energy*, 87, 38-46, 2010.
- Iakovou E., Karagiannidis A., Vlachos D., Toka A., Malamakis A., Waste biomass to-energy supply chain management: A critical synthesis, *Waste Management*, 30, 1860-1870, 2010.
- IEA Bioenergy Task 42, 2009.
- IEA Bioenergy, Task 37 Energy from Biogas and Landfill Gas, Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection, 2006.
- Incentivi per energia da fonti rinnovabili elettriche non fotovoltaiche. Decreto Ministeriale 6luglio 2012.
- Incropera F. P., DeWitt D. P., *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons, 2002.
- Indriawati K., Saputra R. A., Jabal A. A., Budiati T., Biyanto T. R., Recent developments in modelling of monitoring in the anaerobic bioreactor system, *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol.7, No.1 56-72, 2012.
- ISTAT- Istituto Nazionale di Statistica. 8° Censimento ISTAT Industrie & Servizi, 2001.
- ISTAT-Istituto Nazionale di Statistica, Dati del 6°Censimento generale dell'Agricoltura, 2012.
- Jenkins B. M., Baxter L. L., Miles T. R. Jr, Miles T.R., Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54, 1-3, 17-46, 1998.
- Jiang Y., Heaven S., Banks C.J., Strategies for stable anaerobic digestion of vegetable waste, *Renewable Energy* 44, 206-214, 2012.
- Jingura R.M., Matengaifa R., The potential for energy production from crop residues in Zimbabwe, *Biomass and Bioenergy*, 32,12, 1287-92, 2008.
- JRC Scientific and Technical Reports, Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan, 2011.
- Kadam K. L., Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring, *Energy*, 27, 10, 905-922, 2002.
- Kandilian R, Lee Euntaek, Pilon L., Radiation and optical properties of *Nannochloropsis oculata* grown under different irradiances and spectra, *Bioresource Technology*, 137, 63-73, 2013.
- Kandilian R., Pruvost J., Legrand J., Pilon L., Influence of light absorption rate by *Nannochloropsis oculata* on triglyceride production during nitrogen starvation, *Bioresource Technology*, 163, 308-319, 2014.
- Kaparaju P., Rintala J. Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure, *Resources Conservation & Recycling*, 43, 175-188, 2005.
- Karaj S., Rehl T., Leis H., Müller J., Analysis of biomass residues potential for electrical energy generation in Albania, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1), 493-9, 2010.
- Kautto N., Peck P., Regional biomass planning-Helping to realize national renewable energy goals, *Renewable Energy*, 46, 23-30, 2012.
- Kinoshita T., Inoue K., Iwao K., Kagemoto H., Yamagata Y., A spatial evaluation of forest biomass usage using GIS, *Applied Energy*, 86 (1), 1-8, 2009.
- Kirrolia A., Bishnoi N. R., Singh R., Microalgae as a boon for sustainable energy production and its future research & development aspects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 642-656, 2013.

- Kleinegris D. M. M., Janssen M., Brandenburg W., Wijffels R. H., Two-phase systems: Potential for *in situ* extraction of microalgal products, *Biotechnology Advances*, 29, 502-507, 2011.
- Kratzeisen M., Starcevic N., Martinov M., Maurer C., Muller J., Applicability of biogas digestate as solid fuel, *Fuel*, 89, 2544-2548, 2010.
- Kromkamp, J.C., Beardall, J., Sukenik, A., Kopecky, J., Masojidek, J., van Bergeijk, S., Gabai, S., Shaham, E., Yamshon, A., Short-term variations in photosynthetic parameters of *Nannochloropsis* cultures grown in two types of outdoor mass cultivation systems, *Aquat. Microb. Ecol.* 56, (2-3), 309-322, 2009.
- Kryvoruchko V., Machmüller A., Bodirosa V., Amon B., Amon T., anaerobic digestion of by-products of sugar beet and starch potato processing, *Biomass and Bioenergy*, 33, 620-627, 2009.
- Kunlapur A., Bruce Eldrige R., Photobioreactors Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 3516-3526, 2010.
- Kwon P. S., Østergard P.A., Priority order in using biomass resources-Energy system analyses of future scenarios for Denmark, *Energy*, 63, 86-94, 2013.
- La valorizzazione energetica dei fanghi di depurazione, *Quaderni del Dipartimento di Ingegneria Ambientale Università di Trento*, 2006.
- Lam M. K., Lee K. T., Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward, *Biotechnology Advances*, 30, 673-690, 2012.
- Lamers P., Microalgae biomass production under day/light regimes, PhD course, Practical, Wageningen University, May 2013.
- Lastella G., Testa C., Cornacchia G., Notornicola M., Voltasio F., Sharma VK, Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification. *Energy Conversion Management*, 43, 1, 63-75, 2002.
- Lebuhn M., Munk B., Effenberger M., Agricultural biogas production in Germany-from practice to microbiological basics, *Energy, Sustainability and Society*, 4:10, 1-21, 2014.
- Ledda L., Deligios Paola A., Farci R., Sulas L., Biomass supply for energetic purposes from some *Carduae* species grown in Mediterranean farming systems, *Industrial Crops and Products*, 47, 218-226, 2013.
- Li J., Wei L., Duan Q., Hu G., Zhang G., Semi-continuous anaerobic co-digestion of dairy manure with three crop residues for biogas production, *Bioresource Technology*, 156, 307-313, 2014.
- Li X., Huang Y., Gong J., Zhang X., A study of the development of bio-energy resources and the status of eco-society China, *Energy*, 35 (11), 4451-6, 2010.
- Li, Y., Horsman M., Wu N., Lan C.Q., Dubois Calero N., Biofuels from microalgae, *Biotechnol. Progress*, 24, 815-820, 2008.
- Lindmark J, Leksell N, Schnurer A, Thorin E, Effects of mechanical pre-treatment on the biogas yield from ley crop silage, *Applied Energy*, 97,498-502, 2012.
- Linke B., Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of solid wastes from potato processing, *Biomass and Bioenergy*, 30, 892-896, 2006.
- Lopez-Rodriguez F., Atanet C.P., Blazquez F.C., Celma A.R., Spatial assessment of the bioenergy potential of forest residues in the western province of Spain, *Caceres, Biomass and Bioenergy* 33 (10),1358-66, 2009.
- Lossie U., Pütz P., Targeted Control of biogas plants with the help of FOS/TAC, (practice report), Hach Lange, 2008.
- MacFarlane W.D., Potential availability of urban wood biomass in Michigan: implications for energy production, carbon sequestration and sustainable

- forest management in the U.S.A, *Biomass and Bioenergy*, 33 (4), 628-34, 2009.
- Macias-Corral M., Samani Z., Hansona A., Smith G., Funk P., Yu H., Longworth J., Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure, *Bioresource Technology*, 99, 8288-8293, 2008.
- Madsen M., Holm-Nielsen J. Bo, Esbensen Kim H., Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3141-3155, 2011.
- Mafakheri F., Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions, *Energy Policy*, 67, 116-126, 2014.
- Maraver D., Sin A., Royo J., Sebastian F., Assessment of CHP systems based on biomass combustion for small-scale application through a review of the technology and analysis of energy efficiency parameters, *Applied Energy*, 102, 1303-1313, 2013.
- Marquardt D. W., An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11, 2, 431-441, 1963.
- Mata T.M., Martins A. A., Caetano Nidia S., Microalgae for biodiesel production and other applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217-232, 2010.
- Mata-Alvarez J., Dosta J., Romero-Güiza M.S., Fonoll X., Peces M., Astals S., A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412-427, 2014.
- Matthies M., Giupponi C., Ostendorf B., Environmental decision support systems: current issues, methods and tools, *Environmental Modelling & Software*, 22, 123-127, 2007.
- Mc Bride Bonnie J., Gordon Sanford; "Computer Program for Calculation of complex Chemical Equilibrium Compositions and Application; Analysis"; Nasa Reference Publication 1311, October 1994.
- Mc Bride Bonnie J., Sanford Gordon; "Computer Program for Calculation of complex Chemical Equilibrium Compositions and Application; User Manual and program description"; Nasa Reference Publication 1311, June 1996.
- Mc Kendry P., Energy production from biomass (part1): overview of biomass, *Bioresource Technology*, 83, 37-46, 2002.
- Ministero della Salute e della Sicurezza Alimentare, 2011.
- Ministero dello Sviluppo Economico, *Bollettino petrolifero*, 11, 2015.
- Minowa T., Yokoyama S-Y, Kishimoto M., Okakura T., Oil production from algal cells of *Dunaliella tertiolecta* by direct thermochemical liquefaction, *Fuel*, 74, 1735-1738, 1995.
- Minowa T., Sawayama S., A novel microalgal system for energy production with nitrogen cycling, *Fuel*, 78, 10, 1213-1215, 1999.
- Molinuevo-Salces B., González -Fernández C., Gómez X., Cruz García- González M., Morán A., Vegetable processing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: Evaluation in terms of methane yield and SEM characterization, *Applied Energy*, 91, 36-42, 2012.
- Möller K., Müller T., Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review, *Engineering in Life Science*, 12,3, 242-257, 2012.
- Montgomery D.C., Design and analysis of experiments, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

- Mordaunt Christopher J., Pierce Wade C.; "Design and preliminary results of an atmospheric-pressure model gas turbine combustor utilizing varying CO₂ doping concentration in CH₄ to emulate biogas combustion", *Fuel*, 124, 258-268, 2014.
- Mulvenna Pamela F., Savidge Graham, The Queen's University of Belfast, Marine Biology Station, Portaferry, Co. Down, BT22 1PF, Northern Ireland - Estuarine, Coastal and Shelf Science, 34, 429-438, 1991.
- Murphy JD, Power N, Technical and economic analysis of biogas production in Ireland utilizing three different crop rotations, *Applied Energy*, 86, 25-36, 2009.
- Murpy J., Braun R., Weiland P., Wellinger A., Biogas from crop digestion, IEA Bioenergy, 2011.
- Murto M., Björnsson L., Mattiasson B., Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure, *J. Environ. Manage* 70, 101-107, 2007.
- Nagel J., Biomass in energy supply, especially in the state of Brandenburg, Germany, *Ecological Engineering*, 16, 103-110, 2000.
- Ni M., Leung D. Y. C., Leung M. K. H., Sumathy K., An overview of Hydrogen production from biomass, *Fuel Processing Technology*, 87, 461-472, 2006.
- Noon C. E., Daly M. J., GIS-based resource assessment with BRAVO. *Biomass and Bioenergy*, 10, 101-109, 1996.
- Nussbaumer T., Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction, *Energy & Fuels*, 17, 1510-1521, 2003.
- Olofsson M., Lamela T., Nilsson E., Bergé J.P., V. del Pino, Uronen P., Legrand C., Combined Effects of Nitrogen Concentration and Seasonal Changes on the Production of Lipids in *Nannochloropsis oculata*, *Marine Drugs*, 12, 1891-1910, 2014.
- Ono E., Quello J. L., Carbon dioxide mitigation using thermophilic cyanobacteria, *Biosystems Engineering*, 96, 129-134, 2007.
- Orrù P. F., Melis E., Fais L., Napoli F., Pilo C., Puxeddu M., Evaluation of the Northern Sardinia Forest Suitability for a Wood Biomass CHP System Installation. Proceedings of Simul 2013: The Fifth International Conferences on Advances in System Simulation, Venezia Mestre, Italy, IARIA, 147-152, 27-31 ottobre 2013.
- Oswald, W. J. Golueke C., Biological transformation of solar energy, *Advanced Applied Microbiology*, 2, 223-262, 1960.
- Parawira W., Murto M., Read J.S., Mattiasson B., A study of two stage anaerobic digestion of solid potato waste using reactors under mesophilic and thermophilic conditions, *Environmental Technology*, 28, 1205-1216, 2007.
- Parawira W., Murto M., Read J.S., Mattiasson B., Profile of hydrolases and biogas production during two stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato waste, *Process Biochemistry*, 40, 2945-2952, 2005.
- Parawira W., Murto M., Zvauya R., Mattiasson B., Comparative performance of a UASB reactor and an anaerobic packed bed reactor when treating potato waste leachate, *Renewable Energy*, 31, 893-903, 2006.
- Parawira W., Murto M., Zvauya R., Mattiasson B., Optimisation of the anaerobic digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves, *Renewable Energy*, 29, 1811-1823, 2004.
- Pasquet V., Chérouvrier J. R., Fahrat F., Thiéry V., Piot J. M., Bérard J. B., Kaas R., Serive B., Patrice T., Cadoret J.P., Picot L., Study on the microalgal pigment

- extraction process: Performance of microwave assisted extraction, *Process Biochemistry*, 46, 59-67, 2011.
- Perry's Chemical Engineers' Handbook, Heat Generation, 27-25, 27-29, 8^a Edizione 2007.
- Pervin Hasina M., Dennis Paul G., Lim Hui J., Tyson Gene W., Batstone Damien J., Bond Philip L., Drivers of microbial community composition in mesophilic and thermophilic temperature-phased anaerobic digestion pre-treatment reactors, *Water Research*, 47, 7098-7108, 2103.
- Petrick I., Dombrowski L., Kröger M., Beckert T., Kuchling T., Kureti S., Algae biorefinery. Material and energy use of algae, Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2013.
- Piano di Azione Regionale per le energie rinnovabili Sardegna (PDAER), Documento di Indirizzo sulle Fonti Energetiche Rinnovabili approvato con Delibera della Giunta Regionale 12/21 del 20 marzo 2012.
- Piano Energetico Ambientale Regionale, Regione Autonoma della Sardegna, 2006.
- Piano regionale dei Rifiuti Speciali- Relazione di Piano, 2012.
- Piano regionale di gestione dei rifiuti, 2008.
- Piazza M., Tomasi R., Modena R., Strutture in legno, Materiale calcolo e progetto secondo le nuove normative europee, Ulrico Hoepli, 13, Milano, 2005.
- Pistis A., Asquer C., Scano E. A., Anaerobic digestion of potato industry by-products on a pilot-scale plant under thermophilic conditions, *Environmental Engineering and Management Journal*, 12, (S11), 93-96, 2013.
- Politecnico di Milano, Biomass Energy Executive Report, 2012.
- Posten C., Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae, *Engineering in Life Science*, 9, 3, 165-167, 2009.
- Posten C., Schaub G., Microalgae and terrestrial biomass as source for fuels-A process view, *Journal of Biotechnology*, 142, 64-69, 2009.
- Poudel R. C., Joshi D. R., Dhakal N. R., Karki A. B., Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Mixture for the Reduction of Indicator and Pathogenic Microorganisms, *Scientific World Vol.8(8)*,47-50, 2010.
- Progetto AgriBiogas, Ricerca riguardante l'utilizzo di sistemi per la produzione di biogas, ai fini della cogenerazione di energia, nei distretti agroalimentari in Sardegna, 2009.
- Ptasinski K. J., Prins M. J., Pierik A., Exergetic evaluation of biomass gasification. *Energy*, Vol. 32, Issue 4, Elsevier, 569, 2007.
- Pugh S., Concept selection: a method that works. *Proceeding of the international conference on engineering design ICED*, Rome, Italy, 1981.
- R Core Team R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2013.
- RAPPORTO ISPRA, Rischi ambientali connessi all'uso di biomassa per produzione diretta di energia, 2010.
- Rasi S., Lantelä J., Rintala J., Trace compounds affecting biogas energy utilisation. A review, *Energy Conversion and Management*, 52, 3369-3375, 2011.
- Reed James P., Devlin D., Esteves Sandra R.R, Dinsdale R., Guwy Alan J., Integration of NIRS and PCA techniques for the process monitoring of a sewage sludge anaerobic digester, *Bioresource Technology*, 133, 398-404, 2013.
- Regione Autonoma della Sardegna, Assessorato dell'ambiente, Piano Forestale Ambientale Regionale, All. III, Analisi di massima sull'utilizzo delle biomasse forestali a scopo energetico, 2007.

- Rizzoli A.E., Young W. Y., Delivery environmental decision support systems: software tools and techniques, *Environmental Modelling & Software*, 12 (2-3), 237-249, 1997.
- Rodolfi L., Chini Zittelli G., Bassi N., Padovani G., Biondi N., Bonini G., Tredici M. R., Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Massa Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor, *Biotechnology and Bioengineering*, 102, 1, 100-112, 2009.
- Ros M., Franke-Whittle I.H., Morales A.B., Insam H., Ayuso M., Pascual J.A., Archaeal community dynamics and abiotic characteristics in a mesophilic anaerobic co-digestion process treating fruit and vegetable processing waste sludge with chopped fresh artichoke waste, *Bioresource Technology*, 136,1-7, 2013.
- Ruiz G., Castellano M., González W., Rica E., Lema J.M., Anaerobic digestion process parameter identification and marginal confidence intervals by multivariate steady state analysis and bootstrap, *European Symposium on Computer Aided Process Engineering-15*, 2005.
- Ruiz J. A., Juárez M.C., Morales M. P., Muñoz P., Mendivil M. A., Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174-183, 2013.
- Ryckebosch E., Douillon M., Vervaeren H., Techniques for transformation of biogas to biomethane, *Biomass and Bioenergy*, 35, 1633-1645, 2011.
- Sánchez-Mirón A., Contreras Gómez A., Garcia Camacho F., Molina Grima E., Chisti Y., Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae, *Journal of Biotechnology*, 70, 249-270, 1999.
- Sawayama Y., Inohue S., Dote Y., Yokoyama S-Y, CO₂ fixation and oil production through microalga, *Energy Conversion Management*, 36, 729-731, 1995.
- Saxena R. C., Seal D., Kumar S., Goyal H. B., Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1909-1927, 2008.
- Sardegna Ricerche, Audit sulle fonti di energie rinnovabili in Sardegna, Progettazione e attuazione di un'indagine ricognitiva. Indagine territoriale conoscitiva sulla distribuzione delle biomasse in Sardegna e individuazione dei bacini di approvvigionamento, 2008.
- Scano E. A., Asquer C., Pistis A., Melis E., Lewandowska Agata J., Rubiu P. A., Muceli F., Ibba E., Coda M., Le Biomasse Forestali Nella Provincia Dell'Ogliastra - Valutazione della possibilità di impiego in campo energetico, Progetto Terre Civiche dell'Ogliastra, Provincia dell'Ogliastra, Sardegna Ricerche, dicembre 2013.
- Scano E. A., Asquer C., Pistis A., Ortu L., Demontis V., Cocco D., Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy conversion and management* 77, 22-30, 2014.
- Scano E. A., Murrioni S., Orrù A., Triverio A., Maxia C., Fenu D., Cossu A., Atzori D., Documento di Indirizzo Sulle Fonti Energetiche Rinnovabili in Sardegna - Studio Sulle Potenzialità Energetiche delle Biomasse, Novembre 2013. Approvato con delibera della Giunta Regionale 50/13 del 3 dicembre 2013.
- Scano E. A., Orrù A., Demontis V., Spanedda L., Potenzialità energetica delle biomasse residuali in Sardegna, *Energia*, 4, 64-71, 2014.
- Schievano A., D'Imporzano G., Adani F., Substituting energy crops with organic wastes and agro-industrial residues for biogas production, *Journal of Environmental Mangement*, 90, 2537-2541, 2009.

- Scholz M., Melin T., Wessling M., Transforming biogas in biomethane using membrane technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 199-212, 2013.
- Scott S. A., Davey M. P., Dennis J. S., Horst I., Howe C. J., Lea-Smith D. J., Smith A. G., Biofuels from algae: challenges and prospects, *Current Opinion in Biotechnology*, 21, 277-286, 2010.
- Scragg A. H., Illman A. M., Carden A., Shales S. W., Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular reactor, *Biomass and Bioenergy*, 23, 67-73, 2002.
- Seyed Ehsan Hosseini, Mazlan A. Wahid, Saber Salehira, Mohsin M. Seis; "Evaluation of Palm Oil Combustion Characteristics by Using the Chemical Equilibrium with Application (CEA) Software", *Applied Mechanics and Materials*, 388, 268-272, 2013.
- Sharma B., Ingalls R.G., Jones C.L., Khanchi A., Biomass supply chain design and analysis: Basis overview, modeling, challenges and future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 608-627, 2013.
- Sharma V.K., Testa, C., Cornacchia G., Lastella G., Farina R., Anaerobic digestion of semi-solid organic waste available from orthofruit market: preliminary experimental results, *Energy Conversion and Management* 40, 287-304, 1999.
- Sheng-Yi Chiu, Chien-Ya Kao, Ming-ta Tsai, Seow-Chin Ong, Chiun-Hsun Chen, Chih-sheng Lin, Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration, *Bioresource Technology*, 100, 833-838, 2009.
- Shuit S.H., Tan K.T., Lee K.T., Kamaruddin A.H., Oil Palm biomass as a sustainable energy source: a Malaysian case study, *Energy*, 34,9, 1225-35, 2009.
- Sialve B., Bernet N., Bernard O., Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable, *Biotechnology Advances*, 27, 409-416, 2009.
- SIL Patto territoriale - Agenzia di Sviluppo Locale della Provincia di Oristano, 2007.
- Singh J., Gu S., Commercialization potential of microalgae for biofuels production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2596-2610, 2010.
- Smeets Edward M.W., Faaij Andrè P.C., Lewandowski Iris M., Turkenburg Wim C., A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050, *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 56-106, 2007.
- Sosnowski P., Wieczorek A., Ledakowicz S., Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes, *Advances in Environmental Research*, 7, 3, 609-616, 2003.
- Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A., Optimization of *Nannochloropsis oculata* growth using the response surface method, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 81, 1049-1056, 2006.
- Studio sull'utilizzo di biomasse combustibili e biomasse rifiuto per la produzione di energia, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Rapporto 111/2010.
- Sturm Belinda S.M., Lamer Stacey L., An energy evaluation of coupling nutrient removal from waste water with algal biomass production, *Applied Energy*, 88, 3499-3506, 2011.
- Tambone F., Scaglia B., D'Imporzano G., Schievano A., Orzi V., Salati S., Adani F., Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost, *Chemosphere* 81, 577-583, 2010.

- Tamburic B., Guruprasad S., Dale T. Radford, M. Szabo, R. McC Lilley, A.W. D. Larkum, J. B. Franklin, Kramer D. M., Blackburn S. I., Raven J. A., Schliep M., Ralph P. J., The effect of Diel Temperature and Light cycles on the Growth of *Nannochloropsis oculata* in a Photobioreactor Matrix, Plos one, 9, 1. 1-13, 2014.
- Tecnologie alternative di trattamento termico dei rifiuti"-ENEA, Unità Tecnica Tecnologie Ambientali, 6/2010.
- Teglia C., Tremier A., Martel J.L., Characterization of Solid Digestates: Part 2, Assessment of the Quality and Suitability for Composting of Six Digested Products, Waste and Biomass Valorization, Volume 2, Issue 2, 113-126, 2011.
- Trobajo R., Ibáñez C., Clavero E., Salvadó Joan, Jørgensen S. E., Modelling response of microalgae to CO₂ addition, Ecological Modelling, 294, 42-50, 2014.
- Ueno Y., Kurano N., Miyachi S., Ethanol production by dark fermentation in the marine green alga, *Chlorococcum littorale*. Journal of Fermentation and Bioengineering, 86, 38-43, 1998.
- Ugwu C. U., Ayoagi H., Uchiyama H., Photobioreactors for mass cultivation of algae, Bioresource Technology, 99, 4021-4028, 2008.
- UN-ECE/FAO, Temperate and boreal forest resources assessment, Terms and definitions, 2000.
- UNI EN 14774:2009, Solid biofuels - Determination of humidity - Oven drying method - Part 1: Total humidity - Reference method, 2009.
- UNI EN 14780:2011, Solid Biofuels – Sample Preparation, 2011.
- UNI EN 14918, Solid Biofuels Determination of calorific value, December 2009.
- Vasco H., Costa M., Quantification and use of forest biomass residues in Maputo province, Mozambique, Biomass and Bioenergy, 33 (9), 1221-8, 2009.
- Viana H., Cohen B.W., Lopes D., Aranha J., Assessment of forest biomass for use as energy. GIS-based analysis of geographical availability and locations of wood fired power plants in Portugal, Applied Energy, 87 (8), 2551-60, 2010.
- Vieira Costa J. A., Greque de Morais M., The role of biochemical engineering in the production of biofuels from microalgae, Bioresource Technology, 102, 2-9, 2011.
- Viswanath P., S. Sumithra Devi P., Krishna Nand S., Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes for biogas production, Bioresource Technology 40, 43-48, 1992.
- Viturtia M.A., Mata-Alvarez, Cecchi F., Two-phase continuous anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes, Resources J., Conservation and Recycling 13, 257-267, 1995.
- VK Sharma, C. Testa, C. Lastella, G. Cornacchia, MP Comparato, Inclined plug-flow type reactor for anaerobic digestion of semi-solid waste, Applied Energy, 65, 173-185, 2000.
- Voivontas D., Assimacopulos D., Koukios E. G., Biomass and Bioenergy, 20, 101-112, 2001.
- VSN International GenStat for Windows 16th Edition. VSN International, Hemel Hempstead, UK, 2013.
- Walker D. A., Biofuels, facts, fantasy, and feasibility, Journal of Applied Phycology, 21, 509-517, 2009.
- Ward A. J., Hobbs P.J., Holliman P.J., Jones D. L., Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources, Bioresource Technology, 99, 7928-7940, 2008.

- Xin L., Hong-ying H., Jia Y., Lipid accumulation and nutrient removal properties of a newly isolated freshwater microalga, *Scenedesmus sp.LX1*, growing in secondary effluent, *New Biotechnology*, 27, 1, 59-63, 2010.
- Yangin-Gomec C., Ozturc I., Effect of maize silage addition on biomethane recovery from mesophilic codigestion of chicken and cattle manure to suppress ammonia inhibition, *Energy and Conversion Management*, 71, 92-100, 2013.
- Yazdani R., Barlaz M.A., Augenstein D., Kayhanian M., Tchobanoglous G., Performance evaluation of an anaerobic/aerobic landfill-based digester using yard waste for energy and compost production, *Waste Management*, 32, 912-919, 2012.
- Yen Chen C., Yeh Kuei-Ling, Aisyah R., Lee Duu-jong, Chang Jo-Shu, Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review, *Bioresource Technology*, 102, 71-81, 2011.
- Zambelli P., Lora C., Ciolli M., Spinelli R., Tattoni C., Vitti A., A GIS decision support system for regional forest management to assess biomass availability for renewable energy production, *Environmental Modelling & Software*, 38, 1-11, 2012.
- Zhang F., Johnson Dana M., Sutherland John W., A GIS-based method for identifying the optimal location for a facility to convert forest biomass to biofuel, *Biomass and Bioenergy*, 35, 3951-3961, 2011.
- Zhu H., Stadnyk A., B eland M., Seto P., Co-production of hydrogen and methane from potato waste using a two-stage anaerobic digestion process, *Bioresource Technology*, 99, 5078-5084, 2008.

Pubblicazioni

Su rivista

1. C. Asquer, A. Pistis, **E. A. Scano**, Characterization of fruit and vegetable wastes as a single substrate for the anaerobic digestion, *Environment Engineering and Management Journal*, 12, S11, Supplement, 89-92, 2013.
2. A. Pistis, C. Asquer, **E. A. Scano**, Anaerobic digestion of potato industry by-products on a pilot-scale plant under thermophilic conditions, *Environmental Engineering and Management Journal*, 12, S11, Supplement, 93-96, 2013.
3. **E. A. Scano**, C. Asquer, A. Pistis, L. Ortu, V. Demontis, D. Cocco, Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy conversion and management* 77, 22-30, 2014.
4. **E. A. Scano**, A. Orrù, V. Demontis, L. Spanedda, Potenzialità energetica delle biomasse residuali in Sardegna, *Energia*, 4, 64-71, 2014.

Atti di convegni internazionali

1. C. Asquer, A. Pistis, D. Cocco, **E. A. Scano**, Energy-Oriented optimization of an anaerobic digestion plant for the combined treatment of solid and liquid wastes in a potato chips industrial plant, 22nd European Biomass Conference and Exhibition, 23-26 June, Hamburg, 2014.
2. **E. A. Scano**, C. Asquer, A. Pistis, L. Ortu, G. Carboni, Study of the main process parameters influencing anaerobic digestion of fruit and vegetable waste through principal components analysis, 22nd European Biomass Conference and exhibition, 23-26 June, Hamburg 2014.
3. E. Melis, C. Asquer, A. Pistis, **E. A. Scano**, The Ogliastro forest biomasses: Evaluations for possible Energy purposes, 22nd European Biomass Conference and exhibition, 23-26 June, Hamburg 2014.
4. D. Cocco, M. Petrollese, C. Asquer, A. Pistis, V. Demontis, L. Ortu and **E. A. Scano**, Energy performance assessment of mesophilic anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes in a pilot-scale reactor, ECOS 2014 - the 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Turku Finland, 2014.
5. **E. A. Scano**, A. Pistis, C. Asquer, G. Saiu, C. Tugulu, F. Floris, Biogas from agro-industrial residues, combustion products evaluation by means of the thermodynamic equilibrium analysis approach, International Congress and EXPO on Biofuels & Bioenergy, Valencia, 2015.
6. F. Floris, A. Pistis, **E. A. Scano**, C. Tugulu, Simulation of the gasification of a characteristic forest biomass of northern Sardinia through the thermodynamic equilibrium analysis. The case study of *Pinus pinaster* International Congress and EXPO on Biofuels & Bioenergy, Valencia, 2015.

Atti di convegni nazionali

1. **E. A. Scano**, A. Orrù, V. Demontis, L. Spanedda, Analisi delle potenzialità energetiche e degli aspetti ambientali connessi all'impiego delle biomasse residuali. Il caso della Sardegna, XXVI Congresso Nazionale di Scienze

Merceologiche, Pisa 2014.

Progetti Regionali

1. **E. A. Scano**, S. Murrone, A. Orrù, A. Triverio, C. Maxia, D. Fenu, A. Cossu, D. Atzori, Documento di Indirizzo Sulle Fonti Energetiche Rinnovabili in Sardegna - Studio Sulle Potenzialità Energetiche delle Biomasse, Novembre 2013.
2. **E. A. Scano**, C. Asquer, A. Pistis, E. Melis, Agata J. Lewandowska, P. A. Rubiu, F. Muceli, E. Ibba, M. Coda, Le Biomasse Forestali Nella Provincia Dell'Ogliastra - Valutazione della possibilità di impiego in campo energetico, Progetto Terre Civiche dell'Ogliastra, Provincia dell'Ogliastra, Sardegna Ricerche, 2013.
3. P. Mossone, M. Baroli, **E. A. Scano**, A. Chindris, A. Pistis, V. Demontis, C. Asquer, A. Pinna, A. Figus, b. Loi, G. Brundu, Studio sulla produzione di microalghe per applicazioni nel campo ambientale e industriale, IMC-Sardegna Ricerche, Progetto finanziato dal Banco di Sardegna, 2014.

Ringraziamenti

Innanzitutto un particolare ringraziamento al mio supervisore Prof. Cocco con il quale ho avuto l'onore e il piacere di scrivere diversi lavori. Lo ringrazio anche per la pazienza e la precisione con la quale ha esaminato questo lungo documento.

Un grazie al Prof. Lallai, mio iniziale supervisore, che mi ha dato la possibilità di iniziare questo Dottorato di Ricerca con i suoi utili consigli.

Uno speciale ringraziamento alla Dott.ssa Simona Murrone per avere fortemente voluto il Piano Regionale Biomasse e all'Ing. Aldo Orrù per l'insostituibile contributo tecnico.

Un grande ringraziamento ai colleghi che hanno collaborato alla stesura del Piano Regionale Biomasse Alberto Triverio, Andrea Cossu, Davide Atzori, Carlo Maxia, Davide Fenu.

Desidero ringraziare tutte le persone che hanno condiviso con me questa lunga e complessa attività di ricerca. In particolare Agata Pistis, Carla Asquer, Valeria Demontis, Emanuela Melis, Giuliano Saiu, Anuta Chindris e Claudio Tugulu.

Un particolare ringraziamento ai colleghi che hanno collaborato allo studio sulla biomasse forestali in Ogliastra Piero Rubiu, Enzo Ibba, Francesco Muceli e Maurizio Coda.

Grazie al Dott. Gianluca Carboni e al Prof. Lorenzo Spanedda per la condivisione di alcuni lavori.

Grazie all'Ing. Massimiliano Grosso per il prezioso supporto nell'analisi dei dati e nella predisposizione dei disegni sperimentali e per la condivisione di alcuni lavori.

Grazie all'Ing. Pierfrancesco Orrù per gli utili consigli tecnici e per la condivisione di alcuni lavori.

Grazie al Prof. Francesco Floris per gli indispensabili suggerimenti e per la condivisione di alcuni lavori.

Uno speciale ringraziamento ai Sigg.ri Gianni Sanna e Marco Mulas per il supporto tecnico nell'installazione e nella manutenzione degli impianti sperimentali. Senza la loro professionalità e competenza questo lavoro non sarebbe stato possibile.

Un sincero ringraziamento a tutti i colleghi del Laboratorio Fotovoltaico-Reti e al Gruppo del Solare Termodinamico per gli importanti suggerimenti ricevuti nel corso di questo lavoro e per la piacevole e simpatica compagnia.

Un grazie ai miei giovani colleghi del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei materiali per il piacevole periodo trascorso insieme.

Un ringraziamento alla Fondazione IMC che ha ospitato tutte le installazioni per le sperimentazioni con le microalghe e in particolare a Maura Baroli e Paolo Mossone.

Un ringraziamento infine a Sardegna Ricerche, presso la cui struttura ho avuto la possibilità di eseguire la gran parte della mia attività sperimentale.