

open access journal

Italian Journal of Agronomy

Rivista di Agronomia

A Journal of Agroecosystem Management

ISSN 1125-4718

www.agronomy.it

2013 | volume 8 | issue s1



Convegni di Bologna e Bari.
Arundo donax: valutazioni agronomiche,
energetiche e di sostenibilità

Guest Editor: Prof. Gianpietro Venturi

Table of Contents

Agroenergie: materie prime e sostenibilità Gianpietro Venturi1	Produzione di bioetanolo di seconda generazione dalla canna comune (<i>Arundo donax</i> L.) Danilo Scordi, Salvatore L. Cosentino, Venera Copani, Giorgio Testa, Thomas W. Jeffries25
Efficienza di utilizzo dell'azoto in impianti maturi di specie erbacee perenni da biomassa nel nord Italia Lorenzo Capecchi, Giuseppe Di Girolamo, Angela Vecchi, Lorenzo Barbanti5	Raccolta meccanica della canna comune (<i>Arundo donax</i> L.) a destinazione energetica, cantieri a confronto Roberta Martelli, Marco Bentini34
Giant reed (<i>Arundo donax</i> L.) as energy crop in Central Italy: a review Nicoletta Nassi o Di NassoNeri Roncucci, Enrico Bonari10	Esperienze nel nord-est Italia: la combustione del pellet di canna comune ed altre colture erbacee in impianti di piccola potenza Denis Picco40
Agamic propagation of giant reed (<i>Arundo donax</i> L.) in semi-arid Mediterranean environment Venera Copani, Salvatore Luciano Cosentino, Giorgio Testa, Danilo Scordia18	All articles are also available at www.agronomy.it

Italian Journal of Agronomy

Editors

Michele Perniola, School of Agriculture, Forest, Food and Environmental Science, University of Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza, Italy

Michele Rinaldi, Agricultural Research Council, Cereal Research Centre, S.S. 16 km 675, 71122 Foggia, Italy

Editorial Advisory Board

Muhammad Kaleem Abbasi - Department of Soil & Environmental Sciences, The University of Poonch, Rawalakot Azad Jammu and Kashmir, Pakistan

Arturo Alvino – Dip. Scienze Animali, Vegetali e dell'Ambiente, Università del Molise, Italy

Gaetano Amato – Dip. Agronomia Ambientale e Territoriale, Università di Palermo, Italy

Paolo Annicchiarico – Centro di ricerca per le produzioni foraggere e lattiero-casearie, CRA, Lodi, Italy

Bruno Basso – School of Agriculture, Forest, Food and Environmental Science, University of Basilicata, Italy

Luca Bechini – Dip. Produzione Vegetale, Università di Milano, Italy

Giorgio Borreani – Dip. Agronomia, Selvicoltura e Gestione del Territorio, Università di Torino, Italy

Vincenzo Candido - School of Agriculture, Forest, Food and Environmental Science, University of Basilicata, Italy

Raffaele Casa – Dip. Produzione Vegetale, Università della Toscana, Italy

Ana Castagnino - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Azul, Argentina

Sseyewa Charles – Uganda Martyrs University, Kampala, Uganda

Giuseppe Corti - Dip. di Scienze Ambientali e delle Produzioni Vegetali, Università Politecnica delle Marche, Italy

Marinus de Bakker – Van Hall Institute Dept. of Environmental Sciences Groningen, The Netherlands

Giovanni Dinelli – Dip. Scienze e Tecnologie Agroambientali, Università di Bologna, Italy

Antonio Elia - Dept. of Agro-Environmental Sciences, Chemistry and Plant Protection, University of Foggia, Italy

Christof Engels – Fachgruppe Geowissenschaften, Abteilung Agrarökologie, Universität Bayreuth, Germany

Juan Antonio Fernández Hernández - Dep. de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Cartagena, Spain

Daniel Gomez Sanchez – Inst. Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Durango, Mexico

Luis Lopez Bellido – Dept. de Ciencias y Recursos Agrícolas y Forestales, Universidad de Cordoba, Spain

Giovanni Mauromicale – Dip. Scienze Agronomiche, Agrochimiche Produzioni Animali, Università degli Studi di Catania, Italy

Jean Meynard– Unité d'Agronomie, INRA Thiverval Grignon, France

Domenico Palumbo – Unità di ricerca per i sistemi colturali degli ambienti caldo-aridi, CRA, Bari, Italy

Alberto Pardossi - Dip. di Biologia delle Piante Agrarie, Università di Pisa, Italy

Cristina Patané - Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo, CNR Catania, Italy

Laszlo Radics – Dept. of Ecological and Sustainable Production Systems, Budapest, Hungary

Gianfranco Rana – Unità di ricerca per i sistemi colturali degli ambienti caldo-aridi, CRA, Bari, Italy

Joe Ritchie – Dept. of Crop and Soil Science, East Lansing, MI, USA

Pier Paolo Roggero - Dipartimento di Agraria, Università di Sassari, Italy

Pietro Rubino - Dip. di Scienze delle Produzioni Vegetali, Università di Bari, Italy

Maurizio Sattin – Istituto di Biologia Agroambientale e Forestale - CNR Padova, Italy

Peter Stamp – Institute of Plant Sciences ETH Zentrum, Zurich, Switzerland

Claudio Stockle – Dept. of Biological Systems Engineering - Pullman, WA, USA

Leonardo Sulas – Centro di Studio sui Pascoli Mediterranei, CNR Sassari, Italy

Francesco Tei – Dip. Scienze Agrarie e Ambientali, Università di Perugia, Italy

Yüksel Tüzel - Dept. of Horticulture, Ege University, Bornova Izmir, Turkey

Editorial Staff

Paola Granata, Managing Editor

Cristiana Poggi, Production Editor

Claudia Castellano, Production Editor

Anne Freckleton, Copy Editor

Filippo Lossani, Technical Support

Publisher

PAGEPress Publications

via Giuseppe Belli 7

27100 Pavia, Italy

Tel. +39.0382.1751762 – Fax. +39.0382.1750481.

info@pagepress.org – www.pagepress.org

The Italian Journal of Agronomy (IJA) is the official journal of the Italian Society of Agronomy for the publication of original research papers reporting experimental and theoretical contributions to agronomy and crop science. Typical subjects covered by the IJA include: i) crop physiology, ii) crop production and management, iii) agroclimatology and modelling, iv) plant-soil relationships, v) crop quality and post-harvest physiology, vi) farming and cropping systems, vii) agroecosystems and the environment, viii) agricultural ecology, ix) advances in traditional and innovative crops, x) crop and system modelling.

Instructions to Authors

Manuscripts must be submitted online at www.agronomy.it only; do not submit via e-mail or surface mail.

Manuscripts must be written in English. Authors whose native language is not English are strongly recommended to have their manuscript checked by a language editing service, or by an English mother-tongue colleague prior to submission. Manuscripts should be saved and submitted as a single WORD file containing the full text, references, tables and figures. In case of acceptance, original text and figures must be provided for publication.

Original Articles should normally be divided into an abstract, introduction, materials and methods, results, discussion and references. The abstract should contain a maximum of 400 words. A maximum of 20 authors is permitted, and additional authors should be listed in an *ad hoc* appendix. *Review Articles*: no particular format is required for these articles. However, they should have an informative, unstructured abstract of about 250 words. Reviews may also include meta-analyses, guidelines and consensus papers by scientific societies or working groups. These studies must be conducted following proper, widely accepted *ad hoc* procedures. *Short Communications* are articles with a simple layout and containing limited data (no more than two figures or tables) and a small number of citations (not more than 25). They should be limited to 2,000 words of text (figure captions, table headings and reference lists are additional to this limit). *Letters to the editor* should be from 250 to 1,000 words in length. Authors of letters to the editor should provide a short title for their letter.

Manuscripts should be double spaced with numbered lines and wide margins and should be arranged as follows. *Title page*: including the full title, the name(s) of the author(s), their affiliation and the name of the corresponding author to whom proofs and requests for off-prints should be sent. *Abstract*: should not exceed 400 words. *Keywords*: three to six keywords characterizing the content of the article in alphabetical order. *Introduction*: a brief introduction. *Materials and methods*: this section should provide sufficient information and references on the techniques adopted to permit their replication. *Results*: the content of this section should permit full comprehension of the data reported in figures and tables. *Discussion*: this should underline the significance of the results and place them in the context of previous research. *Acknowledgements*: a brief text. *References* (see below for style). References to personal communications and unpublished data should be incorporated in the text and not placed under the numbered

References. *Units*: authors are recommended to use the International System of Units (SI). *Scientific names*: common names of organisms should always be accompanied, when first cited, by their complete scientific name in italics (genus, species, attribution and, if appropriate, cultivar). *Formulae*: mathematical formulae must be carefully typed, possibly using the equation editor of Microsoft Word when a paper contains several equations they should be identified with a number in parentheses (e.g. Eq. 1). Please note that each accepted paper will undergo technical and scientific copyediting before publication. *Tables*: tables are numbered consecutively in Arabic numbers without "no." before the number. References should be made in the text to each table. The desired style of presentation can be found in published articles. Titles of tables should be descriptive enough to be able to stand alone. Do not present the same data in tabular and graphic form. *Figures*: figures are numbered consecutively in Arabic numbers. References should be made in the text to each figure. Each figure should have a caption. The term "figure" is used also for graphs and photos. *Symbols and abbreviations* used in figures can be defined in the figure caption or note or within the figure itself. Please avoid the use of bold face or greater size for the characters. Symbols and abbreviations used in figures can be defined in the figure caption or note or within the figure itself. The figures must be submitted as .tif or .jpg files, with the following digital resolution: 1. Color (saved as CMYK): minimum 300 dpi; 2. Black and white/grays: minimum 600 dpi; lettering of figures must be clearly labelled. *Movies* can be submitted and uploaded as "Supplementary Files" during the manuscript submission procedure. Dimension should not exceed 5 MB. *Citations in the text*: the journal follows the "author, year" style of citation. When a citation has one, two or three authors, cite the reference throughout using the name(s) and the date. When a citation has more than three authors, cite the reference throughout the text with *et al.* following the last name of the first author. When two or more references are included in a grouping within a sentence, they are arranged and separated by a semicolon. The first criterion is the year (former citations precede recent ones); multiple citations for a given year are further arranged alphabetically and multiple citations for the same initial letter are arranged as follows: first the citation with one author, secondly the citation with two authors, then the other (with *et al.*). When the same author has two references with different dates, cite them in chronological order, separating the dates with a comma; when the same author has two references with the same date, arrange the dates as *a* and *b* (also in the reference list) and separated by a comma. Example: (Foury, 1967, 1972; Burns *et al.*, 1970; Allen *et al.*, 1990; Basnizki and Zohary, 1994; White *et al.*, 1990a, 1990b). Citation should be made in the text to each reference. Citations are listed in strict alphabetical order by first author's last names. Use capital and lower case letters for authors' names. If all authors are identical for two or more citations, chronological order of publication should dictate the order of citations. When more than one paper in a given year is listed by authors whose names are in the same order in each paper, the papers are arranged in alphabetical order of the paper title. Use the following system to arrange your references:

1. periodicals: Hennighausen L.G., Sippel A.E. 1982. Characterization and cloning of the mRNAs specific for the lactating mouse mammary gland. *Eur. J. Biochem.* 125:131-41.

2. books: National Research Council 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 7th rev. ed. National Academy Press, Washington, DC, USA.

3. multi-authors books: Brouwer I. 1965. Report of the sub-committee on constants and factors. In: K.L. Blaxter (ed.) Energy metabolism. EAAP Publ. N. 11, Academic Press Ltd., London, UK, pp 441-3.

4. proceedings: Rossi A., Bianchi B. 1998. How writing the references. Proc. 4th World Congr. Appl. Livest. Prod., Armidale, Australia, 26:44-6. or Blanco P., Nigro B. 1970. Not numbered volumes. Page 127 (or pp 12-18) in Proc. 3rd Int. Conf. Cattle Dis., Philadelphia, PA, USA.

5. thesis. Rossi P. 1999. Stima di parametri genetici nella razza Reggiana. Degree Diss., Università di Milano, Italy.

6. material from a www site: Food and Drug Administration, 2001. Available from: <http://www.fda.gov>

7. In press: Manuscripts that have been accepted for publication but are not yet published can be listed in the literature cited with the designation (In press) following the journal title.

8. Other: Citations such as personal communication, unpublished data, *etc.* should be incorporated in the text and NOT placed into the Reference section.

Copyright

All material published by PAGEPress Publications, whether submitted to or created by PAGEPress, is published under an Open Access license that lets others remix, and build upon your work non-commercially, and although their new works must also acknowledge you and be non-commercial, they don't have to license their derivative works on the same terms.

PAGEPress strives to set the highest standards of excellence in all aspects of its activities, whether this be its journal image, its style of presentation, the quality of the editorial process at every level, the transparency of its operations and procedures, its accessibility to the scientific community and the public, and its educational value.

PAGEPress welcomes and actively seeks opportunities to work together with any group (scientific/scholarly societies, physicians, patient advocacy groups, educational organizations) and any publisher who shares our commitment to Open Access and to making scientific information available for the benefit of science and the public good.

PAGEPress charges authors a price that reflects the actual costs of publication. However, the ability of authors to pay publication charges will never be a consideration in the decision as to whether to publish.

PAGEPress aims to be a truly international organization by providing access to the scientific literature to anyone, anywhere, by publishing works from every nation, and by engaging a geographically diverse group of scientists in the editorial process.

Peer-review policy

All manuscript submitted to our journals are critically assessed by external and/or inhouse experts in accordance with the principles of Peer Review, which is fundamental to the scientific publication process and the dissemination of sound science. Each paper is first assigned by the Editors to an appropriate Associate Editor who has knowledge of the field discussed in the manuscript. The first step of manuscript selection takes place entirely inhouse and has two major objectives: a) to establish the article's appropriateness for our journals' readership; b) to define the manuscript's priority ranking relative to other manuscripts under consideration, since the number of papers that the journal receives is much greater than that it can publish. If a manuscript does not receive a sufficiently high priority score to warrant publication, the editors will proceed to a quick rejection. The remaining articles are reviewed by at least two different external referees (second step or classical peer-review). Authorship. All persons designated as authors should qualify for authorship according to the CSE' criteria (<http://www.councilscienceeditors.org/4a/pages/index.cfm?pageid=3355>) Each author should have participated sufficiently in the work to take public responsibility for the content. Authorship credit should be based only on substantial contributions to (a) conception and design, or analysis and interpretation of data; and to (b) drafting the article or revising it critically for important intellectual content; and on (c) final approval of the version to be published. These three conditions must all be met. Participation solely in the acquisition of funding or the collection of data does not justify authorship. General supervision of the research group is not sufficient for authorship. Any part of an article critical to its main conclusions must be the responsibility of at least one author. Authors should provide a brief description of their individual contributions.

Italian Journal of Agronomy

Rivista trimestrale registrata al Tribunale di Udine n. 3/97 del 12-2-1997.

Direttore Responsabile: Michele Perniola.

Proprietà: Società Italiana di Agronomia.

Stampa: Press Up s.r.l.

via La Spezia, 118/C 00055 - Ladispoli (RM)

Tel. e Fax: +39.076.15.27.351.

Agroenergie: materie prime e sostenibilità

Gianpietro Venturi

Già Ordinario di Agronomia all'Università di Bologna; Coordinatore Progetto BIOSEA; Presidente Biofuels Italia

Negli ultimi anni le bioenergie, e più in specifico le agroenergie, sono oggetto di ampie discussioni. Fra i molti aspetti vengono spesso trattati, la produzione (quali, come, dove, ecc.) delle biomasse e la sostenibilità dell'intero sistema o di singole componenti della filiera.

Il Progetto BIOSEA (biosea.dista.unibo.it) ha affrontato questi argomenti in due convegni: Bologna, 29 maggio 2012, e Bari, 19 settembre 2012. Il primo, che ha avuto il patrocinio dell'Accademia Nazionale di Agricoltura e della Piattaforma Biofuels Italia, è stato incentrato sulla *Arundo donax* L., coltura da biomassa di grande interesse. Erano previste 19 relazioni (delle quali solo dieci sono state esposte, causa l'immediato abbandono degli edifici universitari per il noto terremoto), tutte disponibili nel sito BIOSEA.

Il Workshop di Bari, organizzato (Prof. De Mastro) col patrocinio di quella Università, della Regione Puglia e della Società Italiana di Agronomia, ha trattato l'uso sostenibile del suolo per la produzione di calore ed energia elettrica, con dieci relazioni che hanno spaziato su diversi aspetti della filiera. Alle due note introduttive del Coordinatore, seguono alcune delle relazioni presentate nei due convegni.

La canna comune: coltura da energia (intervento introduttivo al Workshop di Bologna, 29 maggio 2012)

Premessa

La canna comune può interessare per diversi aspetti, ma principalmente per il suo ruolo nelle filiere bioenergetiche. Queste ultime, soprattutto negli ultimi tempi, hanno trovato sostenitori convinti e detrattori altrettanto decisi.

Le motivazioni a favore e contro le bioenergie sono numerose e ben note. Io, personalmente, considero molto quelle ambientali.

In realtà la scelta vera è fra le bioenergie prodotte ed usate bene e quelle prodotte ed usate male.

Corrispondente: Gianpietro Venturi, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali, viale Fanin 44, 40127 Bologna, Italia.
Tel. +39.051.2096652 - Fax: +39.051.2096245.
E-mail: gianpietro.venturi@unibo.it

Ringraziamenti: si ringrazia il Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (MiPAAF) che ha finanziato il progetto BIOSEA, Ottimizzazione delle filiere Bioenergetiche per una Sostenibilità Economica ed Ambientale.

©Copyright G. Venturi, 2013

Licensee PAGEPress, Italy

Italian Journal of Agronomy 2013; 8(s1):e1

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License (by-nc 3.0) which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

Quali sono le une e quali sono le altre?

Dipende da come l'uomo riesce a trovare la combinazione più adatta fra specie-genotipo-fitotecnica, in funzione delle condizioni pedoclimatiche in cui opera. Poi, di non minor importanza, sono i successivi anelli della filiera: la trasformazione e l'uso.

Qualsiasi scelta non potrà, e non dovrà, prescindere dalla sostenibilità dell'intero sistema. Sostenibilità ambientale, economica e sociale. Molte sono le necessarie conoscenze già disponibili, molte ancora mancano. La strada è ancora lunga, ma per tanti versi si intravedono possibili accelerazioni rispetto ai tempi previsti sia in sede UE, sia in ambito nazionale.

Tuttora, nonostante il fiorire di impegni, direttive, iniziative pubbliche e private, a tutti i livelli, ancora per molti anni le bioenergie sostituiranno solo in minima parte i combustibili fossili.

Nei Paesi industrializzati, il carbone ha impiegato oltre 150 anni a sostituire il legno, per essere a sua volta sostituito dal petrolio in circa 90 anni. Attualmente il gas sta sostituendo il petrolio. Le bioenergie tentano di inserirsi fra le fonti energetiche e finora hanno conquistato un ruolo con peso estremamente variabile, a seconda degli areali, del grado di sviluppo delle popolazioni e delle modalità di utilizzo; in complesso rappresentano a livello mondiale appena il 10-12% del consumo di energia.

Le bioenergie hanno però un potenziale enorme e un ruolo ambientale importante. Basta ricordare che ogni anno lo scambio di carbonio fra terra e cielo è di circa 150 miliardi di tonnellate.

Petrolio, carbone e gas naturale, che annualmente ne portano 6 miliardi di tonnellate dal sottosuolo all'atmosfera, rappresentano solo il 4% del flusso globale di carbonio.

Il contributo di energie alternative pari al 20% del consumo globale di energia, programmato nell'UE per il 2020, è un obiettivo ben noto che ha la motivazione di salvaguardare l'ambiente.

Ma va anche ricordato che le energie rinnovabili darebbero 3 milioni di posti di lavoro nel 2030, contribuendo sia alla sostenibilità economica che a quella sociale.

L'impiego di bioenergie può quindi gradualmente divenire una componente di qualche rilievo nel sistema.

In particolare di grande interesse sono le colture produttrici di lignocellulosa, materia prima anche per i biocarburanti di seconda generazione.

Il Progetto BIOSEA (biosea.dista.unibo.it) finanziato dal MiPAAF studia diverse di queste piante, fra le quali la canna, alla quale è dedicata la odierna giornata di studio.

Infatti, fra le colture poliennali da biomassa, la canna comune ricopre un ruolo importante nel progetto BIOSEA, coinvolgendo tutti i quattro gruppi di ricerca: agrotecnica (WP1), miglioramento genetico (WP2), qualità tecnologica (WP3) e tematiche trasversali (WP4).

In particolare, relativamente al primo settore, le ricerche agronomiche hanno riguardato l'impiego di reflui zootecnici, l'effetto di diverse tecniche colturali quali lavorazioni del terreno, apporto di azoto, densità di investimento, interazione fra epoca di impianto e irrigazione.

Molta attenzione è stata dedicata all'impianto della coltura, fase delicatissima che condiziona quelle successive e che finora ha creato diversi problemi.

Di grande interesse pratico saranno i risultati dei confronti, effettuati in diversi ambienti, dell'Arundo con altre specie poliennali. Di interesse più generale gli studi sul bilancio energetico e su quello del carbonio.

La variabilità genetica è stata studiata usando marcatori molecolari.

La valutazione della qualità tecnologica è stata incentrata soprattutto su analisi fisico-meccaniche della biomassa impiegata per termoelettricità.

Infine meccanizzazione e logistica sono indagate anche in funzione di valutazioni economiche, ambientali e territoriali.

Un cenno alla storia

La canna comune, o canna gentile, era ed è diffusa soprattutto nell'areale mediterraneo e in situazioni pedoclimatiche similari. Per la sua rusticità e capacità di adattamento ad una molteplicità di situazioni ambientali, è spesso considerata una pianta invasiva, una infestante. La si trova soprattutto nelle ripe dei corsi d'acqua e anche lungo i bordi delle capezzagne.

Per migliaia di anni però, oltre che essere usata come siepe e frangivento, è stata anche coltivata, soprattutto in Asia, Nord Africa e Sud Europa. I fusti, duri, resistenti, flessibili, venivano utilizzati per supporti, stuoie, coperture e per fabbricare strumenti musicali.

Nel secolo scorso è stata di interesse anche per la produzione di cellulosa per l'industria cartaria.

In Italia ebbe un periodo di fulgore dal 1937 in Friuli, a Torviscosa, dove ad opera della SNIA ne furono impiantati circa 5400 ettari su terreni bonificati. In piena autarchia, l'obiettivo era produrre la viscosa, una fibra artificiale, ottenuta dalla cellulosa, da cui, nell'industria del raion, si ricavano tessuti simili alla seta. L'esperienza è continuata fino agli anni sessanta, con un discreto impegno, soprattutto nei primi anni, nella selezione di genotipi più produttivi. Purtroppo la quasi totalità del materiale genetico ottenuto è andata perduta.

Al di fuori dell'iniziativa friulana, negli anni '40 i canneti, coltivati su piccole superfici ad uso familiare, censiti al catasto del Regno, raggiungevano quasi 20.000 ettari, localizzati principalmente in zone collinari di Abruzzo, Piemonte, Marche. Poi un lento, continuo, declino fino, in pratica, alla scomparsa dei canneti coltivati.

L'attualità

L'attuale rinnovato interesse per l'Arundo donax è legato ad alcune sue caratteristiche e principalmente alla destinazione energetica. Negli ultimi anni è stata perciò oggetto di molte iniziative di ricerca che hanno coinvolto l'intera filiera, dal miglioramento genetico, alla fitotecnica, alla trasformazione, considerando sia gli aspetti tecnico-agronomici e industriali, sia quelli ambientali.

Possono essere ricordati i Progetti dell'USDA e di Università e privati in USA, Canada, Cina, ecc..

Dei Progetti UE terminati, voglio ricordare i due coordinati dalla Myrsini Christou, il *Giant reed (Arundo donax L.) Network* (1997-2001) e, soprattutto, il *Bio-energy chains, Bioenergy chains from Perennial Crops in South Europe* (2001-2005) coordinato dalla Ephi Alexopoulou, che ha coinvolto quattro Paesi (Francia, Spagna, Grecia e Italia) ponendo a confronto quattro colture poliennali (miscanto, panico, cardo e canna), studiate sotto molteplici aspetti. I risultati di quei Progetti sono una buona base per le ulteriori ricerche.

Fra i Progetti italiani recenti che hanno riguardato anche la canna comune, vanno citati: PRiSCA, Progetto di Ricerca sulle Colture Alternative (1992-1997); PNERB, Programma Nazionale Energia Rinnovabile da Biomasse (1998-2001); TISEN Biomasse (2002-2005), tutti finanziati dal MIPAAF; *Bioenergy Farm* (2001-2004) dell'Università di Pisa; PANACEA, Progetto Agricoltura Non Alimentare Colture Energetiche Alternative (2004) del CRA-ING-Regione Lazio; ACTIVA

(2004-2008) di ARSIA-Regione Toscana; PROBIO biomasse (2006-2007) e Filiera Agroenergetica (2007-2009), entrambi del CRPV, Regione Emilia-Romagna; Progetto di Ricerca sulle bioenergie (2007-2009) dell'ISCI-CRA; PRIN, Tecniche di propagazione e coltivazione dell'Arundo donax, DiSTA Bologna (2007-2008); SUSCACE, Supporto Scientifico alla Conversione Agricola verso le Colture Energetiche, e FAESI, Filiere Agroenergetiche nel Sud Italia (entrambi 2008-2014), di CRA-ING; SOBIMA, SOstenibilità di filiere Bioenergetiche per valorizzare le aree semiaride MArginali e semimarginali (2011-2014) del CRA-SCA, gli ultimi tre progetti finanziati dal MIPAAF; e certamente altri di cui non ho notizia.

Dei progetti in atto verrà detto oggi.

Vorrei poi ricordare il WATBIO, *Development of improved perennial and non-food biomass and bioproducts crops for water stressed environments* (2012-2016), che sta iniziando. La canna come fonte di energia ha punti di forza e di debolezza, già messi in rilievo da Bonari e Galli nel Progetto Activa e poi da Di Candilo, Facciotto, ai quali rimando.

Mi sembra opportuno ricordare infine che i riflessi applicativi di tutti gli aspetti tecnico-scientifici oggetto di ricerca vanno inquadrati entro le scelte politiche dell'UE.

In questo momento ci si può riferire alla bozza (Staff Working Document) di comunicazione della Commissione UE intitolata *Renewable energy: a major player in the energy market*. Probabilmente dopo il 2020 sarà necessario un quadro normativo vincolante, che consideri anche una maggior valorizzazione del carbonio, per assicurare continuità e anche far crescere l'energia rinnovabile nel 2030 e oltre. Gli aspetti ora in fase di esame sono numerosi.

Voglio sottolineare anche le due opzioni in questi giorni al vaglio della Commissione Europea a seguito di studi che non sembrerebbero favorevoli alla sostenibilità ambientale dei carburanti di prima generazione. La prima opzione prevede dal 2016 l'innalzamento dal 35 al 60% della soglia di riduzione di emissioni di gas effetto serra garantito dai biocarburanti rispetto ai carburanti fossili. La seconda opzione prevede di inserire anche l'ILUC fra i fattori considerati nelle direttive su qualità carburanti e su energie rinnovabili. I bioetanoli più efficienti e i biocarburanti di seconda generazione ne sarebbero favoriti. Entrambe le ipotesi sembrano poter incentivare lo sviluppo di colture di canna.

Dal confronto con altre specie sembrano comunque prevalere alcune caratteristiche positive che danno luogo ad iniziative industriali come quella di Mossi e Ghisolfi nell'Alessandrino, ma è ovvio che l'ottimizzazione della filiera richiede ancora l'acquisizione di nuove conoscenze, anche per identificare la combinazione ottimale fra genotipo e fitotecnica in funzione dello specifico ambiente di coltivazione.

È un impegno assunto da alcune delle U.O. del BIOSEA che stanno studiando diversi aspetti di cui verranno riferiti oggi i primi risultati.

La giornata di studio

L'odierna giornata di studio ha l'obiettivo di fare il punto non solo sull'attività finora svolta dal Progetto, ancora in fase iniziale, ma anche su conoscenze ottenute da precedenti ricerche o da ricerche parallele.

In questa ottica viene dato inizio alla costituzione di un database che riporta sia l'elenco dei Progetti che hanno considerato l'Arundo in Italia, sia dei lavori scientifici e tecnici che la riguardano. Il database è nella fase iniziale e tutte le aggiunte sono benvenute.

Il programma di oggi prevede la trattazione prima di aspetti generali e specifici di fitotecnica, in particolare di impianto della coltura, poi di esperienze operative, alcuni aspetti di fisiologia, di raccolta meccanica, per finire con la trasformazione della materia prima, considerando sia diverse destinazioni d'uso, sia differenti tecnologie di conversione. Obiettivo generale è l'ottimizzazione dell'intera filiera, con innovazioni sia di prodotto sia di processo nell'ambito di singoli anelli della catena, per assicurare la sostenibilità ambientale, economica e socia-

le. L'obiettivo è ambizioso, oggi cerchiamo di realizzarne almeno un poco.

Agroenergie e sostenibilità: introduzione al tema (intervento introduttivo al Workshop di Bari, 19 settembre 2012)

La concorrenza fra uso del suolo per produzioni a destinazione alimentare o non alimentare è un argomento da qualche tempo frequentemente trattato dai mass-media e di crescente interesse per l'opinione pubblica. Oggetto di discussione è soprattutto la produzione di bioenergie. Sostenitori ed avversari si affrontano in occasione di ogni decisione, a livello europeo, nazionale o locale, che in qualche modo possa influire in proposito.

I motivi del contendere sono numerosi e, tra i tanti, compare con frequenza l'uso corretto del suolo. Anche in questo caso le motivazioni addotte, pro e contro, sono molteplici, ma possono essere fatte rientrare in un unico concetto: l'uso sostenibile.

La sostenibilità va valutata sotto diversi aspetti, principalmente: ambientale, energetico, economico, sociale. Aspetti spesso legati fra loro e con peso molto variabile a seconda dei tempi, dei luoghi e della scala (livello mondiale, continentale, nazionale, in aree geografiche particolari, in specifiche situazioni locali, ecc.).

Anche la destinazione finale delle bioenergie (calore, energia elettrica, biocarburanti, ecc.) va tenuta presente in funzione delle situazioni produttive sopra ricordate.

In altri termini deve sempre essere valutata la sostenibilità dell'intera filiera e, così come la sostenibilità di ogni singolo anello determina la sostenibilità globale della catena, quest'ultima deve rientrare nella valutazione di ognuna delle singole componenti.

Il problema è complicato dalla incidenza di molti fattori esterni che, in diversi modi, interferiscono sul sistema.

Può essere opportuno ricordare alcuni aspetti generali.

Va premesso che i termini *bioenergie* e *agroenergie* non sono sinonimi. Il primo ha un significato più ampio e si riferisce a energie ricavate da biomasse comunque ottenute: da agricoltura, foreste, agro-industria, ma anche da deiezioni animali e da qualsiasi rifiuto o residuo di origine biologica, ecc.. La materia prima perciò non è prodotta appositamente. Il secondo invece indica energie ottenute dall'agricoltura (da colture dedicate, da sottoprodotti di colture con altre destinazioni d'uso) o dalla foresta (impianti dedicati o sottobosco). Le agroenergie implicano quindi il concetto di imprenditorialità.

L'opinione pubblica tende normalmente a confondere i due termini. Qualche numero può essere utile.

Innanzitutto, qual è il peso delle bioenergie rispetto al consumo mondiale di energia?

A livello globale le bioenergie soddisfano appena il 10-12% del fabbisogno di energia primaria (circa 45 EJ su 425).

Mediamente nei Paesi con economia di transizione raggiungono il 20% (con punte del 90%) e sono utilizzate per cottura del cibo e riscaldamento. Nei Paesi industrializzati contribuiscono solo per il 3-5%, tuttavia con trend in aumento abbastanza rapido. In Italia apportano appena il 2%. Infatti nel mondo le principali fonti di energia sono petrolio (33-35%), carbone (25-28%) e gas naturale (21-26%), che assieme concorrono per oltre l'80%, seguite da nucleare (6-7%) e idroelettrico (2-3%).

Gli usi dell'energia primaria sono ovviamente molto diversi in differenti areali in funzione del tipo di economia prevalente.

Nei prossimi decenni è previsto, a livello globale, un crescente consumo di energia, con un aumento più che proporzionale dell'apporto di bioenergie; dal circa 11% attuale, raggiungeranno il 12,2% nel 2020, il 14,3% nel 2030 e il 16,1% nel 2040 (Rosillo-Calle *et al.*, 2007).

L'attuale crisi economica mondiale sembra aver rallentato, soprattutto in USA, UE e Giappone, il consumo energetico ma favorito l'incidenza crescente delle bioenergie che vanno rapidamente affermandosi nei Paesi ad economia in forte sviluppo, quali principalmente Cina, Brasile e, meno, anche India.

Nell'UE è previsto che nel 2030 sia destinato alla produzione di bioenergie circa il 12% della superficie, pari a 19 milioni di ettari. Sembra però possibile prevedere che il probabile incremento delle rese areiche medie e la diffusione dei biocarburanti di seconda generazione consentano di ridurre tali superfici.

Le bioenergie rivestiranno comunque un ruolo cruciale nei prossimi decenni per raggiungere i previsti obiettivi UE. In particolare avranno grande rilievo i biocarburanti nel settore del trasporto (European Commission, 2006, 2009a, 2009b, 2012). Da tener presente anche l'uso nel trasporto aereo.

Le diverse Commissioni ora al lavoro in sede UE concordano nel prevedere che biocarburanti e bioliquidi saranno essenziali nel ridurre le emissioni di gas con effetto serra (GHG). Ciò pur con serie limitazioni alla loro produzione, riguardanti l'uso diretto e indiretto dei suoli, delle foreste, dei pascoli con biodiversità, dei terreni paludosi, ecc..

A livello più generale, i biocarburanti sono considerati uno dei quattordici strumenti a disposizione dell'uomo in grado di contrastare o rallentare il cambiamento climatico (Pacala e Socolow, 2004).

Per l'Italia, la Strategia Energetica Nazionale (SEN), ora in fase finale di approvazione, prevede che nel 2030 le rinnovabili complessivamente (settori elettrico, termico e trasporti) soddisfino il 20% dei consumi finali lordi (la previsione 2020 è 17%). Anche a livello di previsioni nazionali si confida molto sull'affermazione di biocombustibili di seconda generazione (lignocellulosiche) e addirittura di terza (alghe).

Ma perché puntare sulle bioenergie?

Le motivazioni per il loro sviluppo sono diverse a seconda degli areali e del tipo di utilizzazione. Ad esempio per i biocarburanti gli aspetti ambientali sono prevalenti per l'UE e importanti anche per USA, Cina e India. In questi tre ultimi Paesi, prevale però la sicurezza energetica, che tuttavia interessa molto anche l'UE. Il Brasile vede nei biocarburanti soprattutto una importante componente delle esportazioni e un vantaggio per l'agricoltura.

Le suddette motivazioni sono ritenute di scarso valore dagli avversari dei biocarburanti. Viene contestata la loro valenza ambientale (molti lavori scientifici certificano risultati positivi ed altrettanti negativi) e soprattutto viene enfatizzata la concorrenza con le destinazioni alimentari per l'uso del suolo. Si afferma che possono causare una minor disponibilità e un aumento del prezzo del cibo e degli alimenti zootecnici.

In realtà la concorrenza per l'uso del suolo può essere un problema in situazioni specifiche (si pensi ad esempio alla destinazione del mais nel corn belt USA!). Non lo è invece in termini generali e nella maggior parte dei casi ora pubblicamente discussi (Africa, diversi Paesi di Asia e UE, ecc.).

Va infatti evidenziato che lo sviluppo di bioenergie per biocarburanti, oggi il più discusso, interessa nel mondo 30-35 milioni di ettari, quindi circa il 2% dei seminativi. Se si considerano anche i pascoli, la superficie dei terreni sottratta a produzioni destinate all'alimentazione umana e animale raggiunge complessivamente appena lo 0,5% del totale. È anche curioso che si contrastino le destinazioni a produzioni energetiche dei suoli e non ci si preoccupi, e si taccia, della perdita di terreni agricoli per altri usi, ad esempio l'urbanizzazione.

Ciò succede in molti areali del pianeta, e in Italia è un caso emble-

matico in questi giorni messo in evidenza anche dal Ministro dell'Agricoltura ed anche (finalmente) giunto all'onore della cronaca.

Va ricordato: in 40 anni la SAU italiana ha perso 5 milioni di ettari (oltre il 28%) e, da quasi il 60% della superficie nazionale emersa, è scesa al 43%. La superficie agricola per abitante è perciò calata di oltre un terzo, passando da 3,3 a poco più di 2 ettari.

È stata una destinazione sostenibile dell'uso del suolo?

Ma torniamo al tema specifico di oggi: la destinazione sostenibile del suolo per produrre calore ed energia. Tema di importanza attuale e futura.

In proposito si conosce già molto, ma è molto maggiore la mancanza di conoscenze, se non indispensabili, certamente utili.

Gli aspetti da considerare sono infatti moltissimi. Di sicuro di più dei 24 indicatori ambientali, sociali ed economici individuati dal *Global Bioenergy Partnership* (GBP), dei numerosissimi bilanci ambientali ed energetici, dei LCA calcolati, dei *foot print*, dei modelli economici e politici a livello globale o solo UE, della miriade di dati già ottenuti dai tanti Progetti, non solo della UE, ecc. (Struik e Venturi, 2000; Saez *et al.*, 2001; Yamamoto *et al.*, 2001; Working Group Sustainable Food Production, 2006; Pretty *et al.*, 2010; Zegada-Lizarazu *et al.*, 2010; Fisher *et al.*, 2012) è forse opportuno ricordare fra tutti l'attività del *Joint Research Centre* (JRC) della Commissione Europea.

In molte ricerche a carattere più generale sono trascurate le variabili agronomiche, che invece, in funzione delle situazioni pedoclimatiche, possono determinare scelte operative in grado di influire sulla sostenibilità del sistema.

In estrema sintesi la *sostenibilità* potrà essere valutata dando risposta a tre domande (Pretty *et al.*, 2010):

- quale è il potenziale biofisico ed economico per produrre bioenergie su un determinato territorio?
- quale è l'effetto della loro produzione sui mercati dell'alimentare e delle fonti energetiche tradizionali?
- quale è il rapporto costi/benefici del loro sviluppo nei riguardi di obiettivi economici, ambientali, sociali ed anche politici (es. sicurezza energetica, rapporti internazionali, ecc.)?

Per ottenere risposte corrette è necessario un forte impegno della ricerca, che dovrà affrontare i molti singoli aspetti e quindi collegare le conoscenze ottenute. Il rischio è la tentazione di generalizzare i risultati e considerarli mediamente validi.

Ci si dovrà attendere risposte diverse a seconda delle situazioni specifiche che perciò comporteranno scelte operative diverse.

Il Workshop di oggi potrà far conoscere risultati della ricerca agronomica ed esempi già applicativi di best-practice.

Bibliografia

- European Commission, 2006. EUR 22066 — Biofuels in the European Union – A vision for 2030 and beyond. Final report of the Biofuels Research Advisory Council. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, available from: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/biofuels_vision_2030_en.pdf
- European Commission, 2009a. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (Text with EEA relevance). In: Official Journal, L 140, 5/6/2009, pp 16-62.
- European Commission, 2009b. Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 98/70/EC as regards the specification of petrol, diesel and gas-oil and introducing a mechanism to monitor and reduce greenhouse gas emissions and amending Council Directive 1999/32/EC as regards the specification of fuel used by inland waterway vessels and repealing Directive 93/12/EEC (Text with EEA relevance). In: Official Journal, L 140, 5/6/2009, pp 88-113.
- European Commission, 2012. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Renewable Energy: a major player in the European energy market 1-2. Renewables Energy Strategy post 2020, 1-42. From: Commission staff Working Document.
- Fisher G, Hizsnyik E, Prieler S, Wiberg D, 2012. Scarcity and abundance of land resource: competing uses and shrinking land resource base. SOLAW Background Thematic Report – TR02. FAO, Rome, Italy, pp 1-58. Available from: http://www.fao.org/fileadmin/templates/solaw/files/thematic_reports/TR_02_light.pdf
- Pacala S, Socolow R, 2004. Stabilization wedges: salvaging the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 395:968-72.
- Pretty J, Sutherland WJ, Ashby J, Auburn J, Baulcombe D, Bell M, Bentley J, Bickersteth S, Brown K, Burke J, Campbell H, Chen K, Crowley E, Crute I, Dobbelaere D, Edwards-Jones G, Funes-Monzote F, Godfray HC, Griffon M, Gypmantisiri P, Haddad L, Halavatau S, Herren H, Holderness M, Izac AM, Jones M, Koohafkan P, Lal R, Lang T, McNeely J, Mueller A, Nisbett N, Noble A, Pingali P, Pinto Y, Rabbinge R, Ravindranath NH, Rola A, Roling N, Sage C, Settle W, Sha JM, Shiming L, Simons T, Smith P, Strzepeck K, Swaine H, Terry E, Tomich TP, Toulmin C, Trigo E, Twomlow S, Vis JK, Wilson J, Pilgrim S, 2010. The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. *Int. J. Agric. Sustain.* 8:219-36.
- Rosillo-Callé F, de Groot P, Hemstock SL, Woods J, 2007. The biomass assessment handbook - Bioenergy for a sustainable environment. CTA Earthscan, Wageningen, The Netherlands.
- Saez RM, Varela M, Barquero CG, Castellano E, Cardiel C, Kallivroussis L, Soldatos PG, Rozakis S, Nikolau I, Schwaiger H, Jungmeier G, 2001. A multiple criteria decision tool for the integration of energy crops into southern Europe energy system. pp 1417-1419 in 1st World Conf. on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June, 2000. James & James (Sci. Publ.) Ltd., London, UK.
- Struik PC, Venturi G, 2000. An integrated approach in evaluation of production of energy from biomass. *Medit II* 4:35-8.
- Working Group Sustainable Food Production, 2006. Outline of strategic research agenda for ETP Food for Life (FFL). Madrid, 29 January, 1-11.
- Yamamoto H, Fujino J, Yamaji K, 2001. Analysis of bioenergy implementation in global energy systems using a global energy and land use model. pp 1289-1292 in 1st World Conf. on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June, 2000. James & James (Sci. Publ.) Ltd., London, UK.
- Zegada-Lizarazu W, Matteucci D, Monti A, 2010. Critical review on energy balance of agricultural systems. *Biofuel Bioprod. Bior.* 4:423-46.

Efficienza di utilizzo dell'azoto in impianti maturi di specie erbacee perenni da biomassa nel nord Italia

Lorenzo Capecchi, Giuseppe Di Girolamo, Angela Vecchi, Lorenzo Barbanti

Dipartimento di Scienze Agrarie, Università di Bologna, Italia

Abstract

Alcune specie erbacee perenni stanno generando molto interesse come fonte di biomassa per la produzione di energia. Al loro interno, l'azoto gioca un importante ruolo ai fini del bilancio energetico e per il possibile impatto ambientale. In questo contesto è iniziata nel 2002 una prova presso l'azienda sperimentale dell'Università di Bologna a Cadriano (BO), volta a valutare il comportamento biologico-produttivo e la risposta alla concimazione azotata di *Arundo donax* (A), *Cynara cardunculus* (C), *Panicum virgatum* (P) e *Miscanthus × giganteus* (M). Le quattro specie sono state saggiate in combinazione con due dosi di azoto (N_0 , testimone non concimato; N_1 con 120 kg N ha⁻¹ in A e P, 100 kg N ha⁻¹ in M e C) in parcelle ripetute quattro volte secondo uno schema completamente randomizzato. Nell'annata 2011 sono stati valutati: produzione di biomassa secca (DBY; Mg ha⁻¹), contenuto di azoto totale nella biomassa (TKN; mg g⁻¹), quantitativo di azoto assorbito (N uptake; kg ha⁻¹), efficienza apparente di assorbimento dell'azoto distribuito (ARF, %) e, infine, efficienza di utilizzazione dell'azoto (NUE; kg kg⁻¹) come rapporto tra DBY e N uptake. Fra le quattro colture, C ha mostrato un DBY (6,1 Mg ha⁻¹) pari a un terzo circa delle altre tre specie (A, M e P), tra loro indifferenziate (DBY medio, 18 Mg ha⁻¹). La fertilizzazione azotata ha significativamente migliorato la produzione (in media +28%), peggiorando l'efficienza di utilizzazione dell'azoto (in media -14%). P e A sono risultate le specie più efficienti in termini di NUE (rispettivamente 320 e 279 kg di biomassa kg⁻¹ di N), seguite statisticamente da M (238 kg kg⁻¹) e da C (147 kg kg⁻¹). L'ARF ha mostrato valori bassi, statisticamente indifferenziati tra le quattro colture (media, 24%). Riunendo in unico dataset 28 casi in letteratura sulle tre specie A, M e P compresi quelli del presente lavoro, l'ARF appare spiegato dall'incremento relativo di biomassa (relazione diretta) e dalla dose N (relazione inversa). In pratica, una buona efficienza di assorbimento del-

l'azoto come premessa per migliori prestazioni energetico-ambientali richiede condizioni ambientali (clima e terreno) non limitanti l'incremento produttivo unite a un contenimento della dose di azoto.

Introduzione

Fra le strategie che l'agricoltura può adottare per mitigare il surriscaldamento globale e l'aumento dei gas serra in atmosfera, le tecniche agronomiche a basso input e la coltivazione di specie perenni da biomassa per energia sono state largamente studiate negli ultimi anni (IPCC, 2011; Berndes *et al.*, 2003; Sims *et al.*, 2006; Orlandini *et al.*, 2007). Per rispondere a queste sfide e stimolare pratiche virtuose, l'Unione Europea promuove l'utilizzo di energie rinnovabili, fra cui proprio le colture agrarie destinate ad uso energetico (European Commission, 2009). In questo contesto, alcune specie erbacee perenni stanno generando molto interesse a livello globale ed anche in Europa, come fonte di biomassa per la produzione di energia (Angelini *et al.*, 2009).

Le colture poliennali, pur essendo meno flessibili da gestire in un sistema agricolo rispetto alle annuali, necessitano di minori input colturali non richiedendo lavorazioni del terreno e semina annuali (Chandel e Singh, 2011). Di conseguenza stanno catalizzando interesse, proprio in virtù dei loro bassi input diluiti su diversi anni.

La dose di azoto fornita alla coltura è uno dei fattori produttivi più importanti dal punto di vista energetico (Frischknecht e Jungbluth, 2003) e per i possibili risvolti ambientali (Metz *et al.*, 2007). Inoltre l'efficienza d'uso del fertilizzante azotato è un importante elemento del bilancio energetico di colture che proprio al settore energetico sono destinate (Lewandowski e Schmidt, 2006). È quindi ampiamente dimostrato che l'azoto, se non è propriamente dosato, si diffonde nell'ambiente a causa della sua caratteristica di mobilità, potendo interessare tutti i comparti del sistema suolo - pianta - atmosfera (Guillard *et al.*, 1995).

Per i motivi illustrati, è iniziata nel 2002 una prova a lungo termine presso l'azienda sperimentale dell'Università di Bologna, rivolta a valutare il comportamento biologico-produttivo e la risposta alla concimazione azotata di due specie poliennali a ciclo fotosintetico C₃, canna comune/arundo (*Arundo donax* L.) e cardo (*Cynara cardunculus* L.), e due specie poliennali a ciclo fotosintetico C₄, switchgrass/panico virgato (*Panicum virgatum* L.) e miscanto (*Miscanthus × giganteus* Greif & Deuter).

L'arundo (A) è una graminacea poliennale a rapida crescita, originaria dell'Asia occidentale, che si propaga tramite rizomi essendo praticamente sterile, ed è una delle colture da biomassa più promettenti in un'ottica di uso a fini energetici (energia e calore; biocarburanti di seconda generazione) nei Paesi del Sud Europa (Angelini, *et al.*, 2005a, 2005b; Lewandowski *et al.*, 2003). Il miscanto (M) è ugualmente una graminacea originaria delle regioni subtropicali dell'Asia; essendo un ibrido interspecifico sterile, necessita di essere propagato per via gamica. Il panico (P) è una graminacea rizomatosa originaria

Corrispondente: Lorenzo Barbanti, Dipartimento di Scienze Agrarie, Università di Bologna, viale Fanin 44, 40127 Bologna, Italia.
Tel. +39.051.2096643. E-mail lorenzo.barbanti@unibo.it

Key words: colture da biomassa, concimazione azotata, efficienza nutritiva.

Ringraziamenti: si ringrazia il Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (MiPAAF) che ha finanziato il progetto BIOSEA, Ottimizzazione delle filiere Bioenergetiche per una Sostenibilità Economica ed Ambientale.

©Copyright L. Capecchi *et al.*, 2013

Licensee PAGEPress, Italy

Italian Journal of Agronomy 2013; 8(s1):e2

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License (by-nc 3.0) which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

del Nord America, recentemente proposta come specie da energia moltiplicata per seme. Il cardo (C), infine, è una composita nativa dell'areale Mediterraneo.

Con questa premessa, oggetto del presente lavoro è valutare, tramite due livelli di concimazione azotata (N_0 e N_1), la produzione di biomassa secca, l'asportazione di azoto e l'efficienza d'uso del concime azotato in impianti maturi di arundo, panico, miscanto e cardo coltivati in un ambiente di pianura del nord Italia caratterizzato da terreni alluvionali profondi e clima di transizione fra continentale e mediterraneo.

Materiali e metodi

Impianto sperimentale

La prova è stata condotta nel 2011 presso l'azienda sperimentale dell'Università di Bologna a Cadriano (BO; 44° 33' N; 11° 21' E, 32 m slm). Il sito è caratterizzato da terreno di medio impasto - argilloso con pH neutro, sufficiente dotazione di sostanza organica e buona dotazione complessiva di elementi nutritivi (Tabella 1).

L'impianto di arundo, miscanto, panico e cardo è avvenuto nella primavera del 2002 in parcelle sperimentali contigue di adeguate dimensioni (A, 180 m²; P 90 m²; M e C 36 m²) ripetute quattro volte in combinazione con due dosi di azoto (N_0 , testimone non concimato; N_1 con 120 kg N ha⁻¹ in A e P, 100 kg N ha⁻¹ in M e C) secondo un disegno a randomizzazione completa, per un totale di 32 unità sperimentali. P è stato seminato con seminatrice meccanica; C è stato seminato manualmente, mentre A e M sono state trapiantate manualmente disponendo i rizomi in interfile distanti 1,5 m. La densità di impianto è stata di 2 rizomi m⁻² per M, 1 rizoma m⁻² per A e 4 semi m⁻² per C; P (cv. Alamo) è stato seminato a file distanti 0,8 m con 8 kg ha⁻¹ di seme (circa 1000 semi m⁻²). L'azoto è stato distribuito tutti gli anni in un unico intervento con urea circa 20 giorni dopo l'emergenza al primo anno; dopo la ripresa vegetativa negli anni successivi.

Lavorazione del terreno (aratura a 0,4 m e successive erpicature) e concimazione minerale fosfatica (31 kg ha⁻¹ di P) sono state effettuate solo prima dell'impianto tra l'autunno 2001 e la primavera 2002. Parimenti, anche il controllo delle infestanti attraverso lavorazioni interfilari e scerbature manuali si è reso necessario solo nell'anno di impianto. Nessun intervento si è mai reso necessario per il controllo di fitofagi, parassiti o malattie. La prova è sempre stata condotta in assenza di supporto irriguo.

Determinazioni

Le quattro colture risultavano ancora in piena produzione nel 2011, alla decima annata. Alla fine della stagione vegetativa, il 5 ottobre, una superficie di 6 m² è stata raccolta da ciascuna parcella tagliando le piante a pochi centimetri dalla superficie. La biomassa raccolta è stata pesata fresca e campioni rappresentativi sono stati essiccati a 60°C e 105°C rispettivamente per le analisi qualitative e per la determinazione dell'umidità. In base ai dati, è stato possibile calcolare la produzione fresca di biomassa (non discussa nel presente lavoro), quella secca (*dry biomass yield*, DBY; Mg ha⁻¹) e la ripartizione fra diversi organi (non discussa nel presente lavoro).

Sul campione essiccato a 60°C è stato determinato il contenuto di azoto totale (*total Kjeldahl nitrogen*, TKN; mg g⁻¹ s.s.) dopo mineralizzazione della biomassa a caldo in H₂SO₄, seguendo il metodo Kjeldahl (Bradstreet, 1965). Il quantitativo di azoto assorbito dalla biomassa per unità di superficie (N uptake; kg ha⁻¹) è stato calcolato moltiplicando TKN per DBY.

Sulla base di tali elementi sono stati calcolati i seguenti due indici di efficienza nutritiva:

- efficienza apparente di assorbimento dell'azoto distribuito come concime (*apparent recovery fraction*, ARF; %), calcolata per differenza rispetto al non concimato (Huggins e Pan, 1993):

$$ARF = (N \text{ uptake } N_1 - N \text{ uptake } N_0) / \text{Dose } N_1 \quad (1)$$

- efficienza di utilizzazione dell'azoto (*nitrogen utilization efficiency*, NUtE; kg kg⁻¹), che esprime la produttività intertermini di biomassa secca per unità di azoto assorbito (Delogu *et al.*, 1998):

$$NUtE = DBY / N \text{ uptake} \quad (2)$$

Il NUtE viene talora riferito come *nitrogen use efficiency* (Beale e Long, 1997), pur non rappresentando il parametro originale con tale nome, che rapportava la produzione di biomassa al quantitativo totale di azoto reso disponibile da diverse fonti (mineralizzazione sostanza organica, fertilizzanti, ecc.) (Moll *et al.*, 1982).

Analisi statistica

Per ciascun parametro (DBY, TKN, ARF e NUtE) è stata eseguita l'analisi della varianza a due vie per le fonti di variazione specie, concimazione azotata e relativa interazione, utilizzando il pacchetto statistico CoStat 6.3 (Cohort Software, Monterey, CA, USA). Le relazioni semplici fra diversi parametri sono state saggiate in base al coefficiente di correlazione (*r*) di Pearson; le relazioni complesse attraverso la regressione lineare multipla con approccio stepwise, utilizzando il pacchetto statistico SigmaStat 2.03 (Systat Software Inc., Chicago, IL, USA).

Risultati e discussione

Andamento meteorologico

L'andamento meteorologico nel corso del 2011 non si è particolar-

Tabella 1. Principali caratteristiche chimico-fisiche del terreno ospitante la prova.

Parametro	Metodo	Unità di misura	Valore
Sabbia	Bouyoucos	mg g ⁻¹	270
Limo	Bouyoucos	mg g ⁻¹	390
Argilla	Bouyoucos	mg g ⁻¹	340
pH	H ₂ O	cmol ⁺ kg ⁻¹	7,0
C.S.C.	Somma basi	-	26,9
Sostanza organica	Walkley-Black	mg g ⁻¹	18
N totale	Kjeldahl	mg g ⁻¹	1,2
C/N	-	-	8,7
P assimilabile	Olsen	mg g ⁻¹	20
K scambiabile	BaCl ₂ + TEA	mg g ⁻¹	265
Ca scambiabile	BaCl ₂ + TEA	mg g ⁻¹	4592
Mg scambiabile	BaCl ₂ + TEA	mg g ⁻¹	368
Na scambiabile	BaCl ₂ + TEA	mg g ⁻¹	48

C.S.C., capacità di scambio cationico; N, azoto; C, carbonio; P, fosforo; K, potassio; Ca, calcio; Mg, magnesio; Na, sodio; BaCl₂, cloruro di bario; TEA, trietanolanmina.

mente discostato dal clima tipico della località in esame (Figura 1): le temperature medie mensili hanno disegnato il consueto andamento con crescita dai primi mesi dell'anno, stabilizzandosi tra 20 e 30°C nel periodo giugno-settembre, per calare nuovamente nei mesi finali. Le precipitazioni sono risultate più concentrate nei mesi freddi all'inizio e alla fine dell'anno. La stagione vegetativa ha sofferto solo verso la fine condizioni di siccità, come testimoniato dalla rappresentazione secondo Bagnouls e Gaussens (1953): l'area in cui le precipitazioni, in scala doppia, intersecano le temperature si accentua nel mese di agosto, quando le quattro specie avevano già raggiunto taglia e accumulo di biomassa non lontani dai valori finali.

Produzione di biomassa

Il cardo (6,1 Mg ha⁻¹) ha mostrato una produzione in biomassa secca significativamente inferiore rispetto al raggruppamento composto da arundo (19,2 Mg ha⁻¹), panico (17,5 Mg ha⁻¹) e miscanto (17,4 Mg ha⁻¹), tra loro indifferenziati (Figura 2). Il rapporto di produzione di circa uno a tre fra cardo e le altre specie dimostra una scarsa idoneità in Pianura Padana di tale pianta, che si comporta come una specie ad habitus microtermo vegetando soprattutto in autunno e primavera, rispetto ad arundo, miscanto e panico che essendo macroterme sfrutta-

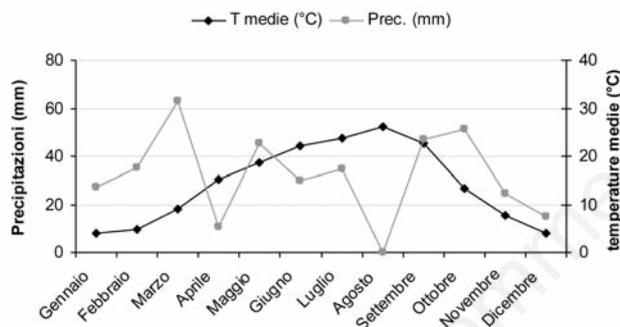


Figura 1. Rappresentazione secondo Bagnouls & Gaussens dell'andamento termo-pluviometrico registrato a Cadriano (BO) nel corso del 2011.

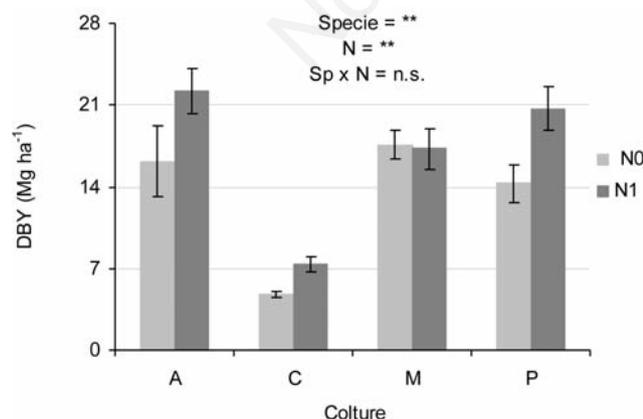


Figura 2. Produzione di biomassa secca per ettaro (DBY) delle quattro colture (A, Arundo; C, Cardo; M, Miscanto; P, Panico) a due livelli di azoto (N₀=non concimato; N₁=120 kg N ha⁻¹ per A e P, 100 kg N ha⁻¹ per M e C). Le barre verticali rappresentano \pm errore standard (n=4); n.s., * e ** indicano rispettivamente non significativo, significativo a P \leq 0,05 e a P \leq 0,01.

no maggiormente la somma termica stagionale, in presenza di una sufficiente disponibilità idrica nell'ambiente in esame. La differenza produttiva fra il cardo e le altre colture è già stata osservata in prove avvenute in ambienti simili (Angelini *et al.*, 2009; Cosentino *et al.*, 2005).

Anche la fertilizzazione azotata è risultata un fattore significativo ai fini produttivi (Figura 2), incrementando la biomassa del 28% nella media delle quattro colture. Arundo, cardo e panico sembrano evidenziare incrementi maggiori fra non concimato e concimato, sebbene l'ANOVA non denoti interazione significativa fra i due fattori (P=0,20 n.s.). L'incremento produttivo medio giustifica ai fini produttivi l'utilizzo di un apporto moderato di azoto come quello saggiato (100-120 kg ha⁻¹), malgrado le preoccupazioni sugli effetti ambientali legati alla dispersione dell'elemento sotto forme nocive (NO₃ nelle falde profonde; NH₃ e N₂O emessi in atmosfera). Appare degno di nota che la fertilità residua del terreno, al decimo anno senza apporti azotati e con asportazione dell'intera biomassa epigea, sia stata ancora in grado di esprimere un potenziale produttivo di circa 15 Mg ha⁻¹ nelle tre colture (A, M e P) idonee all'ambiente di coltivazione. Il ruolo del metabolismo azotato tra biomassa epigea in corso di vegetazione e riserve ipogee durante il riposo vegetativo, descritto in recenti lavori (Strullu *et al.*, 2011; Nasso o Di Nasso *et al.*, 2013), permette di spiegare tale comportamento in un terreno intrinsecamente non ricco dell'elemento nutritivo. A prescindere dalla concimazione azotata, le produzioni di biomassa osservate sono in linea con quelle di altre prove condotte sulle medesime specie (Nasso o Di Nasso *et al.*, 2010; Christian *et al.*, 2008; McLaughlin *et al.*, 2005; Angelini *et al.*, 2009). Come questi studi dimostrano, indipendentemente dalle piovosità dell'annata ciascuna coltura produce nelle fasi di avanzata maturità meno che in quelle centrali, ma più che nell'anno di impianto.

Assorbimento di azoto ed efficienza nutritiva

Al pari della resa in biomassa, anche la concentrazione di azoto nella biomassa delle quattro colture ha risentito della concimazione, con un aumento medio di TKN di circa il 20% senza interazioni con le quattro specie (dati non mostrati). Il quantitativo di azoto assorbito per ettaro riflette l'andamento dei dati osservato relativamente a resa in biomassa e concentrazione di azoto, da cui deriva (dati non mostrati).

L'efficienza di utilizzo dell'azoto (NUtE) denota un quadro inverso a quello dei precedenti parametri (Figura 3): la capacità di produrre bio-

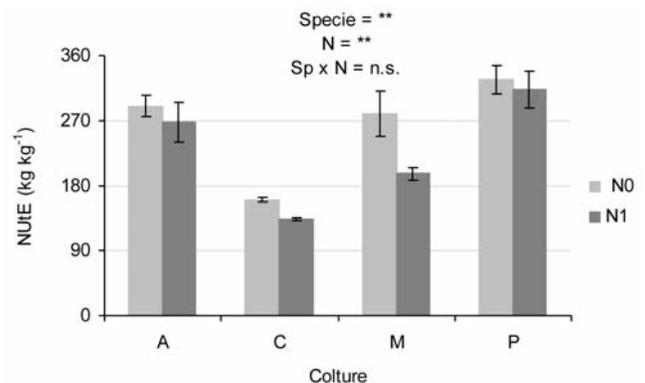


Figura 3. Efficienza di utilizzo dell'azoto (NUtE) nelle quattro colture (A, Arundo; C, Cardo; M, Miscanto; P, Panico) a due livelli di azoto (N₀= non concimato; N₁=120 kg N ha⁻¹ per A e P, 100 kg N ha⁻¹ per M e C). Le barre verticali rappresentano \pm errore standard (n=4); n.s., * e ** indicano rispettivamente non significativo, significativo a P \leq 0,05 e a P \leq 0,01.

massa consumando poco azoto, che costituisce un vantaggio in termo-conversione ma non in altri processi come la digestione anaerobica (Angelidaki *et al.*, 2003), diminuisce del 14% per effetto della concimazione nella media della quattro colture: panico e arundo spiccano come le specie più parsimoniose di azoto (NUE medio, rispettivamente 320 e 279 kg di biomassa kg⁻¹ di N), seguite statisticamente dal miscanto (NUE medio, 238 kg kg⁻¹) e, a maggior distanza, dal cardo (NUE medio, 147 kg kg⁻¹). Anche nel caso di questo parametro, colture e azoto non hanno interagito significativamente tra loro (P=0,20 n.s.). I valori di NUE osservati per arundo e miscanto sono risultati simili a quelli osservati in altre prove su impianti maturi delle due colture (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2010; Christian *et al.*, 2008). Viceversa, per panico e cardo non sono riportati in letteratura studi di lunga durata

che consentano un paragone a pari età dell'impianto culturale.

L'efficienza apparente di assorbimento dell'azoto (ARF) denota valori abbastanza bassi, statisticamente indifferenziati tra le quattro colture (Figura 4): in media, solo il 24% in base al metodo di stima indiretta utilizzato. Il campo di variazione di questo parametro nelle più diverse colture è assai vasto in letteratura; in genere, apporti di azoto caratterizzati da buona efficienza nutritiva hanno ARF≥50% (Harmsen e Garabet, 2003). Ciò lascia supporre che dosi di azoto inferiori a quelle utilizzate in prova (100-120 kg N ha⁻¹) avrebbero potuto soddisfare le esigenze nutritive delle quattro colture, migliorando l'efficienza di concimazione e la sostenibilità energetica e ambientale. In letteratura sono presenti diversi valori di ARF per arundo, miscanto e panico, non sempre riferiti a impianti maturi. Il campo di variazione è il più ampio, oscillando da zero su arundo (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2010) al 78% su panico (Guretzky *et al.*, 2011). Riunendo in unico dataset 28 casi sulle tre specie A, M e P, compresi quelli del presente lavoro, l'ARF è risultato significativamente correlato all'incremento relativo di produzione (Rel. DBY Diff.) determinato dalla concimazione (Figura 5), mentre la concentrazione di azoto nei tessuti non è risultata correlata all'ARF (dati non mostrati). Approfondendo lo studio delle relazioni fra ARF ed altri fattori all'interno dei 28 casi, la regressione multipla stepwise indica come fattori esplicativi dell'ARF il già citato incremento relativo di produzione e la dose di azoto, secondo la seguente equazione:

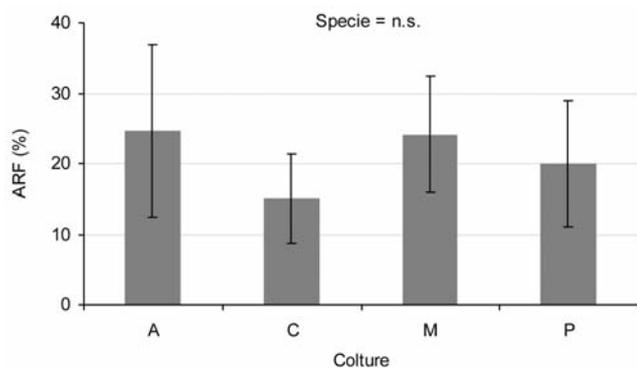


Figura 4. Efficienza apparente di assorbimento dell'azoto (ARF) nelle quattro colture (A, Arundo; C, Cardo; M, Miscanto; P, Panico) con concimazione 120 kg N ha⁻¹ (A e P), 100 kg N ha⁻¹ (M e C) rispetto al non concimato. Le barre verticali rappresentano ± errore standard (n=4); n.s., non significativo.

$$ARF = 29,088 + 0,590 * Rel. DBY Diff. - 0,0635 * Dose N; R^2 = 0,65^{**} \quad (3)$$

In pratica, una buona efficienza di assorbimento dell'azoto richiede condizioni ambientali (clima e terreno) non limitanti l'incremento produttivo unite a un contenimento della dose di azoto.

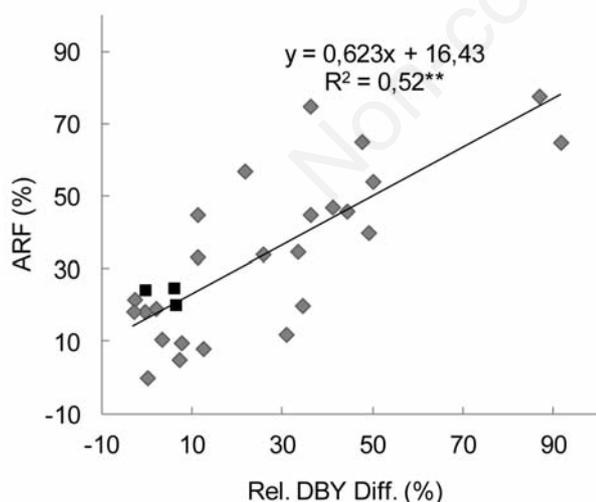


Figura 5. Correlazione fra incremento relativo di resa in biomassa determinato dall'azoto (Rel. DBY Diff.) ed efficienza apparente di assorbimento dell'azoto (ARF) osservata in 28 casi sperimentali sulle tre specie arundo, miscanto e panico. Dati estrapolati da Ercoli *et al.* (1999), Vogel *et al.* (2002), Thomason *et al.* (2004), Christian *et al.* (2008), Lemus *et al.* (2008a, 2008b), Nassi o Di Nasso *et al.* (2010), Guretzky *et al.* (2001) e da questo lavoro (quadrati in neretto).

Conclusioni

In fasi avanzate della propria vita produttiva, le tre specie arundo, miscanto e panico hanno palesato una capacità produttiva ancora buona, mostrandosi quindi adatte ad essere coltivate nell'ambiente oggetto di prova. Il cardo invece ha confermato una scarsa idoneità ad essere coltivato in ambienti a clima non strettamente mediterraneo.

La concimazione azotata ha fornito un importante supporto produttivo, permettendo in tutte le colture di contenere la senescenza dell'impianto rispetto ai primi anni di vegetazione, stabilizzando per quanto possibile le rese nel tempo. Al tempo stesso, esigenze di efficienza produttiva, risparmio energetico e riduzione del carico su diversi comparti ambientali motivano un contenimento delle dosi di azoto e un parallelo aumento della loro efficienza. In questa prova l'efficienza apparente di assorbimento dell'azoto è risultata modesta rispetto alla media di esperienze consimili. Il miglioramento di tale efficienza appare legato a un contenimento delle dosi e alla capacità di risposta culturale all'azoto, in dipendenza delle condizioni ambientali proprie del sito di coltivazione.

Bibliografia

- Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring BK, 2003. Applications of the anaerobic digestion process. In: B.K. Ahring (ed.) Biomethanation II - Advances in biochemical engineering biotechnology. Springer, Berlin, Germany, pp 1-33.
- Angelini LG, Ceccarini L, Bonari E, 2005a. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as

- related to different management practices. *Eur. J. Agron.* 22:375-9.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nasso Di Nasso N, Bonari E, 2005b. Long term evaluation of biomass production of giant reed (*Arundo donax* L.) to different fertilisation input, plant density and harvest time in a Mediterranean environment. pp 141-4 in Proc. 14th Eur. Biomass Conf. and Exhibit., Paris, France.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nasso Di Nasso N, Bonari E, 2009. Long-term evaluation of biomass production and quality of two cardoon (*Cynara cardunculus* L.) cultivars for energy use. *Biomass Bioenerg.* 33:810-6.
- Bagnouls F, Gaussen H, 1953. Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Histor. Natl. Toulouse* 88:193-289.
- Beale CV, Long SP, 1997. Seasonal dynamics of nutrient accumulation and partitioning in the perennial C4-grasses *Miscanthus x giganteus* and *Spartina cynosuroides*. *Biomass Bioenerg.* 12:419-28.
- Berndes G, Hoogwijk M, Broek R, 2003. The contribution of biomass in the future global energy supply: a 303 review of 17 studies. *Biomass Bioenerg.* 25:1-28.
- Bradstreet RB, 1965. The Kjeldahl method for organic nitrogen. Academic Press, New York, USA.
- Chandel AK, Singh OV, 2011. Weedy lignocellulosic feedstock and microbial metabolic engineering: advancing the generation of 'Biofuel'. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 89:1289-303.
- Christian DG, Riche AB, Yates NE, 2008. Growth, yield and mineral content of *Miscanthus x giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Ind. Crop. Prod.* 28:320-7.
- Cosentino S, Foti S, Venturi G, Giovanardi R, Copani V, Mantineo M, D'Agosta G, Bezzi G, Tassan Mazzocco G, 2005. Colture erbacee annuali e poliennali da biomassa per energia di possibile coltivazione in Italia. *Agroindustria* 4:35-48.
- Delogu G, Cattivelli L, Pecchioni N, De Falcis D, Maggiore T, Stanca AM, 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *Eur. J. Agron.* 9:11-20.
- Ercoli L, Mariotti M, Masoni A, Bonari E, 1999. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of *Miscanthus*. *Field Crop Res.* 63:3-11.
- European Commission, 2009. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (Text with EEA relevance). In: *Official Journal L 140, 5/6/2009*, pp 16-62.
- Frischknecht R, Jungbluth N, 2003. Implementation of life cycle impact assessment methods. Final report Ecoinvent 2000. Available from: <http://www.ecoinvent.ch/>
- Guillard K, Griffin GF, Allinson DW, Moosa Rafey M, Yamartino WR, Pietrzyk SW, 1995. Nitrogen utilization of selected cropping systems in the U.S. Northeast: dry matter yield, N uptake, apparent N recovery, and N use efficiency. *Agron. J.* 87:193-9.
- Guretzky JA, Biermacher JT, Cook BJ, Kering MK, Mosali J, 2011. Switchgrass for forage and bioenergy: harvest and nitrogen rate effects on biomass yields and nutrient composition. *Plant Soil* 339:69-81.
- Harmsen K, Garabet S, 2003. A comparison of the isotope-dilution and the difference method for estimating fertilizer nitrogen recovery fractions in crops. III - Experimental. *NJAS-Wagen. J. Life Sci.* 51:237-61.
- Huggins DR, Pan WL, 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. *Agron. J.* 85:898-905.
- IPCC, 2011. Special Report on renewable energy sources and climate change mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lemus R, Brummer EC, Lee Burras C, Moorec KJ, Barker MF, Molstadd NE, 2008a. Effects of nitrogen fertilization on biomass yield and quality in large fields of established switchgrass in southern Iowa, USA. *Biomass Bioenerg.* 32:1187-94.
- Lemus R, Parrish DJ, Abaye O, 2008b. Nitrogen-use dynamics in switchgrass grown for biomass. *Bioenerg. Res.* 1:153-62.
- Lewandoski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M, 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in US and Europe. *Biomass Bioenerg.* 25:335-61.
- Lewandoski I, Schmidt U, 2006. Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agr. Ecosyst. Environ.* 112:335-46.
- McLaughlin SB, Kszos LA, 2005. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass Bioenerg.* 28:515-35.
- Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA, 2007. Climate change 2007: mitigation of climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Moll RH, Kamprath EJ, Jackson WA, 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* 74:562-4.
- Nasso Di Nasso N, Angelini LG, Bonari E, 2010. Influence of fertilisation and harvest time on fuel quality of giant reed (*Arundo donax* L.) in central Italy. *Europ. J. Agron.* 32:219-27.
- Nasso Di Nasso N, Roncucci N, Bonari E, 2013. Seasonal dynamics of aboveground and belowground biomass and nutrient accumulation and remobilization in giant reed (*Arundo donax* L.): a three-year study on marginal land. *Bioenerg. Res.* 6:725-36.
- Orlandini S, Mancini M, Dalla Marta A, 2007. Sistema per la realizzazione di una filiera corta per la 309 produzione di energia da biomasse agricole. pp 151-52 in Proc. XXXVII Conv. Naz. SIA, Catania, Italy.
- Sims RH, Hastings A, Shlamadinger B, Taylor G, Smith P, 2006. Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biol.* 12:2054076.
- Strullu L, Cadoux S, Preudhomme M, Jeuffroy MH, Beaudoin N, 2011. Biomass production and nitrogen accumulation and remobilisation by *Miscanthus x giganteus* as influenced by nitrogen stocks in belowground organs. *Field Crop Res.* 121:381-91.
- Thomason WE, Raun WR, Johnson GV, Taliaferro CM, Freeman KW, Wynn KJ, Mullen RW, 2004. Switchgrass response to harvest frequency and time and rate of applied nitrogen. *J. Plant Nutr.* 27:1199-226.
- Vogel KP, Brejda JJ, Walters DT, Buxton DR, 2002. Switchgrass biomass production in the Midwest USA: Harvest and Nitrogen Management. *Agron. J.* 94:413-20.

Giant reed (*Arundo donax* L.) as energy crop in Central Italy: a review

Nicoletta Nassi o Di Nasso,^{1,2} Neri Roncucci,¹ Enrico Bonari^{1,2}

¹Istituto di Scienze della Vita, Scuola Superiore Sant'Anna; ²CRIBE - Centro di Ricerca Interuniversitario Biomasse da Energia, Pisa, Italia

Abstract

In the European Union energy security have been driving the search for economically viable and environmentally sustainable renewable energy sources since the 90's. Energy crops could represent a good opportunity to combine the energy goals with the conservation of farmer incomes and the global climate change control. Giant reed (*Arundo donax* L.) is a perennial rhizomatous grass particularly attractive for energy production because of a high yield potential, a generally positive environmental impact and a good attitude to energy conversion. Long-term studies carried out in Central Italy confirmed its high production level, in both fertile and marginal lands (aboveground yields from 38 to 20 t ha⁻¹ year⁻¹). In addition, the crop highlighted a high growth rate at the beginning of the growing season, progressively decreasing in summer when high temperature and low water availability occurred. Giant reed nutrient requirements were generally low and part of nutrient stocks were remobilized from the rhizome to the aboveground biomass over the spring, with the opposite flow occurring in autumn. From an environmental point of view giant reed showed a positive energy balance with a high-energy efficiency. Compared to other energy crops, giant reed showed the lowest GHG emissions per unit of energy and the best performance in terms of cost per ton of dry biomass or per unit of energy.

To improve knowledge on giant reed and to favour the diffusion of energy crops in Italian cropping systems, further studies are needed to analyse the long-term effects of giant reed on soil fertility and the optimal soil management after its cultivation. In our researches the envi-

ronmental impacts of giant reed and its production costs were referred to the production phase. Therefore, there is the need to extend the research activity to the whole energy chain and to identify the most sustainable conversion technologies (e.g. biogas, 2nd generation bioethanol, etc.) for the different environments.

Introduction

In the European Union energy security have been driving the search for economically viable and environmentally sustainable renewable energy sources since the 90's. Among different renewable energy sources, agro-forestry biomass could represent a good opportunity to combine the energy goals with the conservation of farmer incomes and the global climate change control (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2012).

In this context, the Institute of Life Sciences of the Scuola Superiore Sant'Anna together with the University of Pisa founded CRIBE – Centro di Ricerca Interuniversitario Biomasse da Energia – with the aim to study the different bioenergy chains, from biomass production to energy conversion through a multidisciplinary approach.

Concerning energy crops, long-term research activities have been conducted in Tuscany on perennial grasses. Specifically, several studies investigated giant reed (*Arundo donax* L.), a perennial rhizomatous crop that appears particularly suitable for energy purposes in the Mediterranean environment. The characteristics that make this crop attractive for energy production are its high yield potential, a generally positive environmental impact and a good attitude to energy conversion (Lewandowski *et al.*, 2003).

The aim of this review is to summarise long-term experiences carried out in Central Italy on giant reed and to give an overview on the agronomic, environmental and economic aspects of giant reed cultivation.

General information on giant reed

Giant reed (*Arundo donax* L.) is a perennial rhizomatous grass belonging to the Poaceae family. It is widespread in the Mediterranean environment where is frequently found in riparian habitats (Angelini *et al.*, 2009). Giant reed grows in dense clumps. Stems develop from rhizome buds during all the vegetative season and are able to branch during the second year of growth. Alternated leaves depart from each stem node. Inflorescences appear between August and November but not all shoots flower in the same year (Lewandowski *et al.*, 2003). Usually giant reed does not set fruit because the pollen results unfruitful; consequently, the propagation method is the vegetative one, through the use of rhizomes (Angelini *et al.*, 2009). Giant reed produces large fleshy rhizomes, lying close to the soil surface; the fibrous roots, originating from the rhizomes, are able to grow into the soil down to 1 meter in depth (Lewandowski *et al.*, 2003; Monti and Zatta, 2009). The species is characterized by a C3 pathway, even though it

Correspondence: Nicoletta Nassi o Di Nasso, Istituto di Scienze della Vita, Scuola Superiore Sant'Anna, Piazza Martiri della Libertà 33, 56127 Pisa, Italia. E-mail: n.nassiodinasso@sssup.it

Key words: perennial rhizomatous grass, biomass accumulation, nutrient requirements, sustainability indicators, economical aspects.

Acknowledgements: the authors would like to fully acknowledge the researchers and the technical staff of the Scuola Superiore Sant'Anna, CRIBE, and University of Pisa that since 90's contributed to these studies.

Funding: this research was supported by the Italian Ministry of Agricultural, Food and Forestry Policies (MiPAAF) within the BIOSEA project, *Optimization of bioenergy chains for an economic and environmental sustainability*.

©Copyright N. Nassi o Di Nasso *et al.*, 2013
Licensee PAGEPress, Italy
Italian Journal of Agronomy 2013; 8(s1):e3

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License (by-nc 3.0) which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

shows high photosynthetic rates comparable to C4 plants (Rossa *et al.*, 1998).

Giant reed is able to grow across a wide range of soil types. Despite, giant reed prefers well-drained soils with abundant soil moisture, it is able to thrive under drought conditions. Tolerance to environmental stresses is important, since it allows energy crops to be cultivated on marginal or sub-marginal land, thereby reducing competition with food crops, which generally require better quality arable land (Lewandowski *et al.*, 2003; Nassi o Di Nasso *et al.*, 2013).

Site description

This review reports several studies established since 1992 at the experimental Centres of the University of Pisa (Enrico Avanzi Interdepartmental Centre for Agro-Environmental Research and Field Experimental Centre of Department of Agriculture, Food and Environment), located in San Piero a Grado (Pisa) (latitude 43°68' N, longitude 10°35' E). The site is characterised by a wide variability of soils, ranging from fertile with good water and nutrient availability to sandy soils with low organic matter and nutrient contents. During the last 15 years (from 1992 to 2012), a considerable unevenness in precipitation was observed from year to year. The mean annual rainfall is approximately 900 mm and its distribution typically shows a peak during autumn, with a dry period, according to Bagnouls and Gausson (1953), occurring in the late spring and summer. As a general trend, the air temperatures increase from March to August. Maximum values over 30°C are common in July and August. Mean minimum and maximum temperature are around 9°C and 20°C respectively.

Agronomic aspects

Giant reed yield and biomass accumulation

Among the perennial species suitable for energy purposes in the Mediterranean area, giant reed shows a great attitude to energy production due to its high yield level and growth rate. In Central Italy, giant reed growing cycle lasts about 220 days, starting in March, when new shoot emerge, and ending at the beginning of November, when the maximum biomass level are usually achieved (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011c). Assuming a basal temperature of 10°C, giant reed needs about 3000°C to complete its cycle. During the same period the water supply received by rainfall is around 400 mm (Angelini *et al.*, 2009; Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011c).

Long- and mid-term studies reported dry yields around 37 and 20 t ha⁻¹ year⁻¹ in productive and marginal soil respectively (Angelini *et al.*, 2009; Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011c, 2013). Moreover, crop yield seems to be affected by crop age: in a 12 year study, performed under good water and nutrient availability, giant reed yield was very poor in the first year and increased rapidly from 1st to 2nd year of growth (+43 %, from 29 to 51 t ha⁻¹ year⁻¹). In the following years, two yielding phases were identified: a maturity phase from the 3rd to the 8th year of growth, with a mean value around 45 t ha⁻¹ year⁻¹, and a decreasing phase from the 9th to the 12th year of growth, with a mean value about 25 t ha⁻¹ year⁻¹ (Figure 1) (Angelini *et al.*, 2009). Fertilisation increased giant reed yields during the maturity phase (4th and 7th year of growth). Nevertheless a decreased effect of fertilization appeared as the crop got old (Figure 2A), and no significant differences were observed between autumn and winter harvests (Figure 2B) (Angelini *et al.*, 2005; Nassi o Di Nasso *et al.*, 2010a).

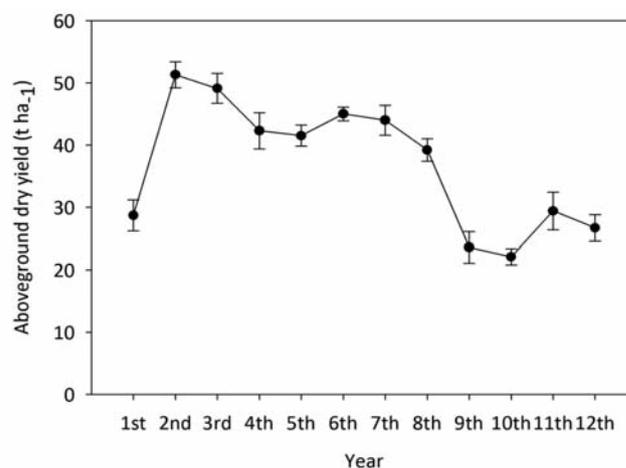


Figure 1. Giant reed aboveground dry yield from the crop establishment to the 12th year of growth. Vertical bars represent the standard deviations. Modified from Angelini *et al.*, 2009.

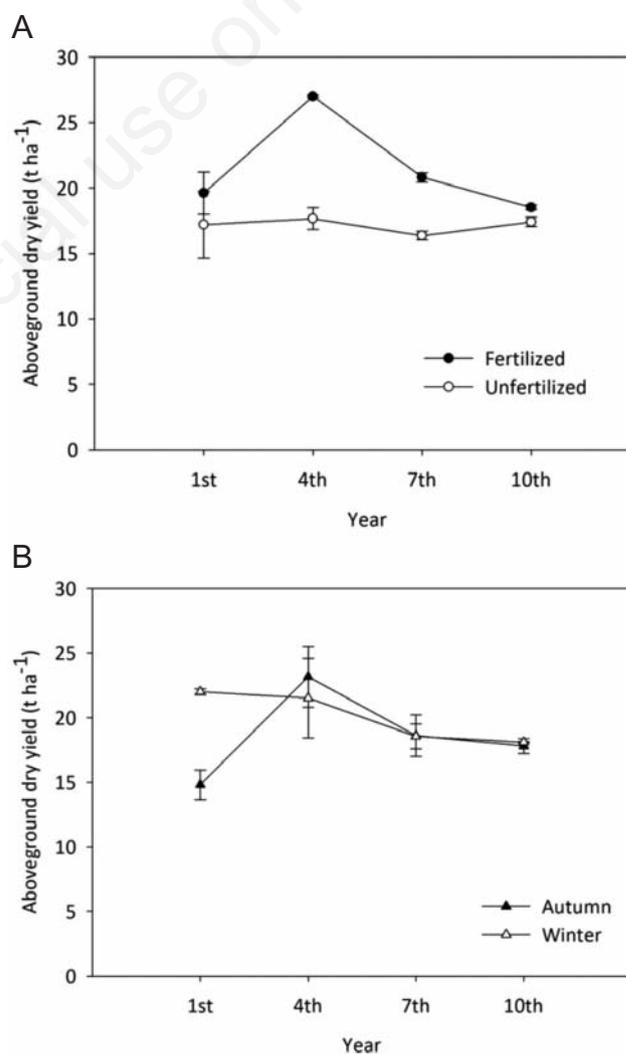


Figure 2. Dry yield (\pm standard error) in year 1, year 4, year 7 and year 10 for giant reed crop in (A) fertilized vs unfertilized comparison and (B) autumn vs winter harvest. Modified from Nassi o Di Nasso *et al.*, 2010a.

In order to investigate the ability of giant reed to acquire growth limiting resources and the efficiency with which those resources are utilised to synthesise its dry matter, a growth analysis was performed by Nassi o Di Nasso *et al.* (2011b) on a giant reed crop at 7th and 8th year of growth (2009 and 2010). The study showed stable yields from November onwards with maximum around 30 and 40 t ha⁻¹ in 2009 and 2010 respectively (Figure 3). In addition, maximum crop growth rate (CGR) occurred in mid-June (33 g m⁻² d⁻¹) while maximum absolute growth rate (AGR) was achieved earlier, in May (420 mg d⁻¹). This behaviour seems to be related to specific environmental conditions of the study site. Indeed, at the beginning of the growing season, when water and light are not limiting factors and mean temperature is nearly optimal, giant reed accumulates biomass very rapidly (more than 60% of the total aboveground biomass). Later in summer, restricted water availability and high temperatures (>30°C) could negatively affect the biomass accumulation, significantly reducing the crop growth (CGR≤25 g m⁻² day⁻¹; AGR≤270 mg day⁻¹) (Figure 4A, B).

Within the same study a focus was made on investigating the dynamic of the leaf dry yield. Giant reed maintained quite stable values after summer with a leaf dry yield around 8 t ha⁻¹ year⁻¹ (20% of the total aboveground biomass) (Figure 3). In addition, results from a young stand trial, in which giant reed growth was investigated from the first to the third year, reported a linear decrease of the leaf weight ratio (*i.e.* ratio between leaf dry yield and total aboveground dry yield) over time: indeed, the percentage of leaf respect to the total aboveground biomass decreased with time, from 40% to less than 10% at the beginning and at the end of the growing season respectively (Figure 5). Furthermore, giant reed achieved its maximum LAI in August (around 6). The canopy closure (LAI≥5) was observed at the end of July, and the crop maintained high values throughout the summer months until the end of October (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011c) (Figure 4C). Therefore, giant reed leaf development generally occurs until the end of summer and subsequent aboveground biomass increase is due to stem growth. On the contrary, other perennial grasses, such as miscanthus, show a marked decrease in leaf biomass from autumn onwards and that loss determines a significant aboveground yield reduction (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011b).

Concerning the rhizomes biomass accumulation, Nassi o Di Nasso *et al.* (2013) reported data on giant reed rhizome growth following a mar-

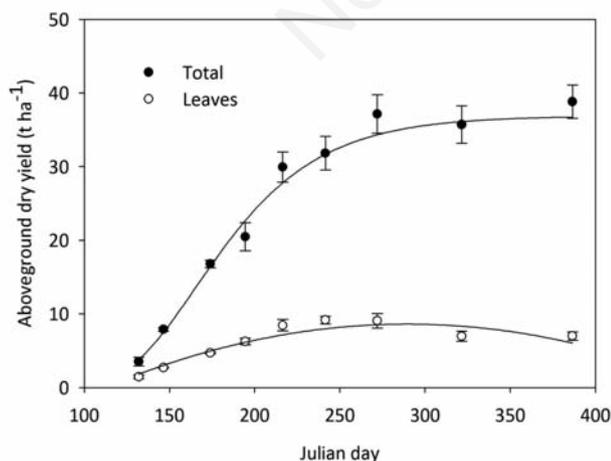


Figure 3. Seasonal variation of giant reed total aboveground and leaf dry yields. Bars represent the standard errors. Modified from Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011b.

ginal soil from year 1 to year 3. Rhizomes increased rapidly in the establishment and in the 2nd year of growth and they accounted slightly less than 50% of the total biomass at the end of the 3rd growing season (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2013). Within the growing season, the development of giant reed rhizome could be characterized by three

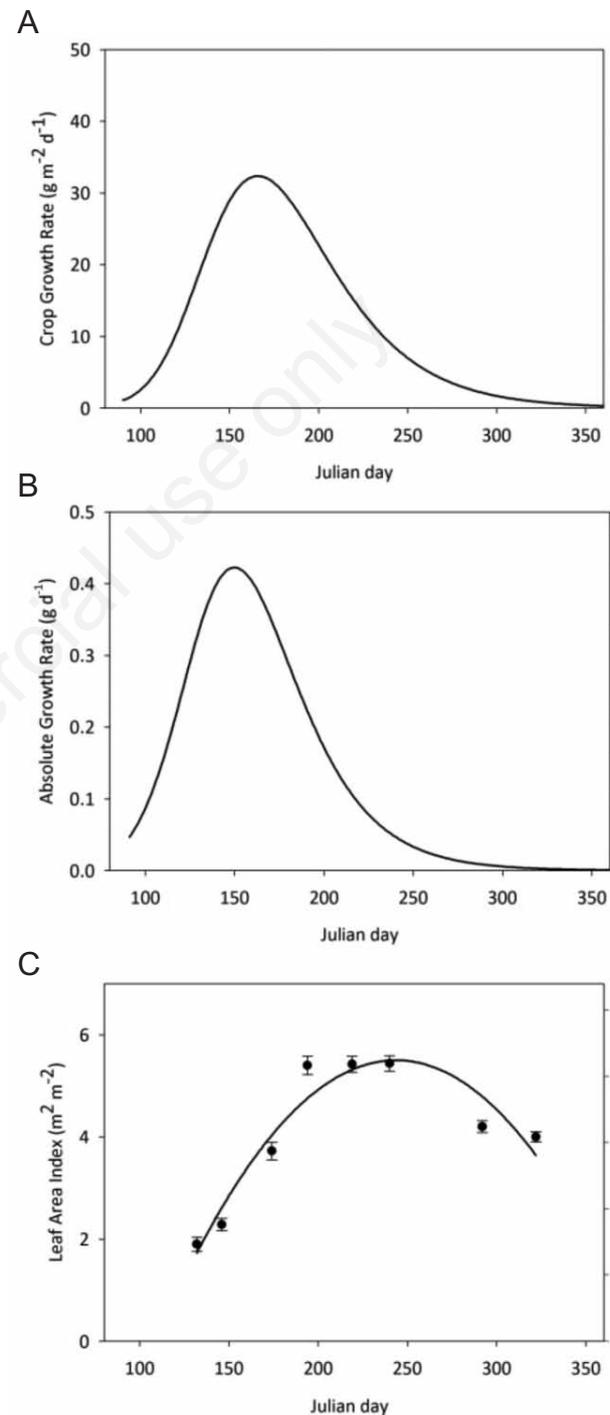


Figure 4. Giant reed mean predicted (A) crop growth rate and (B) absolute growth rate as a function of the Julian day. Predicted function and observed values (\pm standard deviation) of (C) giant reed leaf area index, \bullet indicate observed values (\pm SE). Modified from Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011b, 2011c.

stages: an initial decline between shoot sprouting and early summer, an almost linear increase until early winter, and a period of stability until next year crop regrowth. Nassi o Di Nasso *et al.* (2013) reported that each phase resulted in different rhizome to shoot ratios (R:S) (calculated as the ratio of rhizome dry biomass yield to aboveground dry biomass yield), ranging from 0.25 and 0.80 (Figure 6). In addition, a 30 g increase in rhizome dry biomass corresponded approximately to a new bud development.

Finally, the dry matter percentage of giant reed increased linearly from 20% to 60% during the growing season (Figure 7). As a consequence giant reed biomass appears to be suitable for different conversion technologies such as thermochemical (*e.g.* combustion, pyrolysis, etc) or biological (*e.g.* biogas and bioethanol production). On the other hand, rhizome dry matter concentration maintained quite stable values over the growing season, around 30% (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2013).

Giant reed nutrient contents

The aboveground nutrient concentrations of giant reed generally present similar declines over time, with the highest concentrations at the beginning of the growing season (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011d). Nassi o Di Nasso *et al.* (2011d) reported that nutrient concentration decline is most pronounced during the active growth period (June-August), while from late summer to winter the change becomes negligible.

Concerning nutrient contents, defined as the product of dry biomass yield and nutrient concentration, giant reed is generally characterized by low values. In a three year study the dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium showed peak nutrient levels reached over the summer period, followed by a decline in aboveground nutrient content and a simultaneous increase in belowground levels. The absolute maximum values were achieved in late July to early August and then decreased until winter (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2013).

For giant reed mature crop with an aboveground yield around 30 t ha⁻¹, Nassi o Di Nasso *et al.*, (2011d) reported, nutrient contents of 130 kgN ha⁻¹, 35 kgP ha⁻¹ and 430 kgK ha⁻¹ in July and 80 kgN ha⁻¹, 25 kgP ha⁻¹ and 240 kgK ha⁻¹ in January. On the contrary, for a young giant reed crop cultivated in a marginal soil (aboveground yield around 20 t ha⁻¹) similar values were observed for nitrogen content, while lower contents were recorded for phosphorus (15 and 12 kgP ha⁻¹ in July and January respectively) and potassium (260 and 140 kgP ha⁻¹ in July and January respectively). These differences could be probably due to specific soil conditions: in fertile soils the elevated phosphorus and potassium availability determined luxury consumptions, while, in marginal soils, crop nutrient content could be limited by both low soil nutrient content and water availability (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011d, 2013).

Investigation on belowground biomass of a giant reed young stand reported rhizome nutrient content around 160 kgN ha⁻¹, 25 kgP ha⁻¹ and 250 kgK ha⁻¹ at the end of the third growing season. The study highlighted that part of the nutrient stocks were remobilized from the rhizome to the aboveground biomass in spring, while the opposite flow occurred in autumn. Almost stable percentages of remobilized nutrients were observed: nitrogen flows stood at around 30% in spring and 35-40% in autumn; remobilization of phosphorus and potassium in spring was negligible, while they increased to 16% and 40% in autumn for P and K respectively.

This behaviour represents a survival strategy for perennial rhizomatous grasses and an environmental friendly strategy that allows reducing fertiliser needs. Nevertheless, though giant reed showed evident nutrient cycling, other perennial grasses such as miscanthus appear to better recycle nutrients, probably owing to their C4 pathway (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011d).

Finally, nutrient use efficiencies (NUEs) were taken into account in

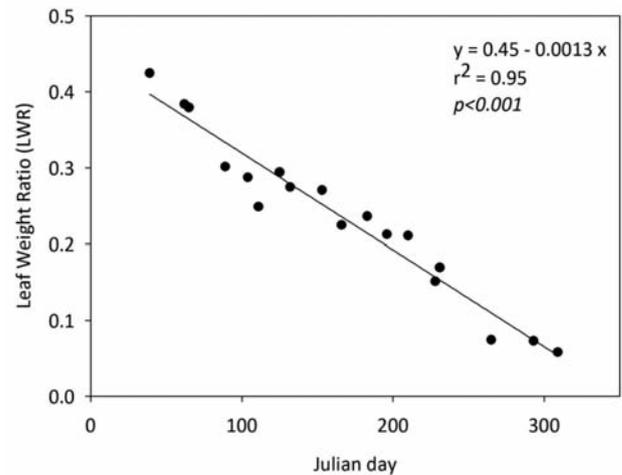


Figure 5. Change in time of giant reed leaf weight ratio (LWR). LWR is calculated as the ratio between leaf dry biomass yield and aboveground dry biomass yield. • indicate measured values. Modified from Nassi o Di Nasso *et al.*, 2013.

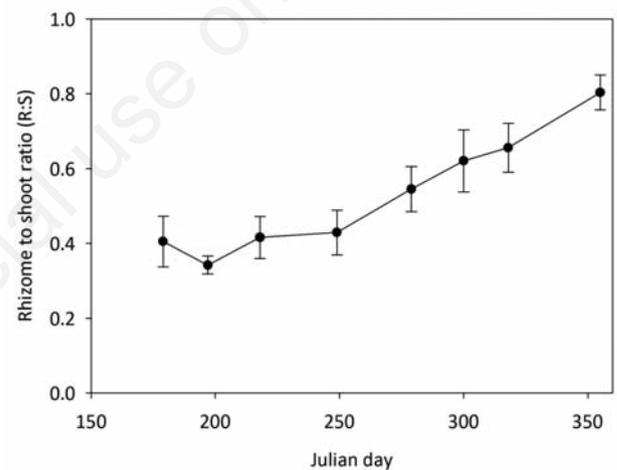


Figure 6. Rhizome to shoot ratio (R:S) of giant reed calculated as ratio between rhizome dry biomass yield and aboveground dry biomass yield for each sampling date. • indicate observed values (\pm SE). Modified from Nassi o Di Nasso *et al.*, 2013.

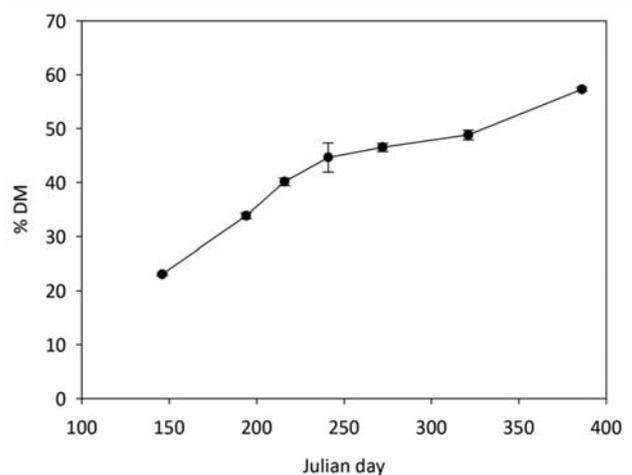


Figure 7. Seasonal variation in dry matter (DM) percentage of giant reed in Pisa, Italy. • indicate observed values (\pm SE). Modified from Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011d

order to evaluate suitable harvest times that may combine high yields and low nutrient contents (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2011d). In a mature giant reed crop cultivated in a fertile soil, NUEs increased progressively from October to January for all three macronutrients. Nitrogen NUE achieved minimum values about 300 g g^{-1} in October and maximum values of about 500 g g^{-1} in late January. Mean phosphorus NUE (October-January) showed a mean value of about 1000 g g^{-1} . Concerning potassium NUE, our results reported low values ranging from 100 to 130 g g^{-1} that could be related, as previously described, to potassium luxury uptakes.

Environmental aspects

The sustainability of a cropping system is commonly evaluated through indicators, which are synthetic variables describing complex systems. Since each indicator deals with one aspect of sustainability (*e.g.* nutrients, energy etc) it is necessary to include several indicators in order to obtain a complete assessment (Castoldi and Bechini, 2010). Indicators help to understand and to interpret a complex system by: i) synthesizing data; ii) showing the current state; iii) demonstrating the achievement or not of objectives; iv) communicating the current status to users for management decisions (Bockstaller *et al.*, 1997).

In order to improve knowledge on giant reed environmental impacts we compared crop performances in terms of energy balance and CO_2

emissions to those of other selected energy crops and of a traditional cropping system.

The analysed field trials were located in Central Italy and included:

- G: giant reed (*Arundo donax* L.). The crop was transplanted in spring 1992 and harvested yearly in autumn (Angelini *et al.*, 2009). The mean aboveground biomass was of $37 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$;
- SRC: short rotation coppice of poplar (*Populus deltoides* Bartr., clone Lux). The SRC was transplanted in spring 1996 and harvested every three years at the end of winter. Total aboveground biomass yield showed an annual mean value around $16 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2010b);
- M: miscanthus (*Miscanthus × giganteus* Greef et Deu.). The crop was managed as previously described for giant reed. The aboveground biomass recorded in our environment was about $28 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Angelini *et al.*, 2009);
- CR: crop rotation system with sugar beet (*Beta vulgaris* L. var. *saccharifera*), durum wheat (*Triticum durum* (Desf.) Husn.), grain sorghum (*Sorghum vulgare*, Pers.), sunflower (*Helianthus annuus* L.) and durum wheat. In the sixth year, the soil was fallowed (set-aside) and only mechanical weed control was performed. The CR system was constituted by annual herbaceous crops traditionally devoted to food production, although potentially suitable for energy purposes. In sugar beet roots dry yield stood around $13 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Grain sorghum and sunflower showed stable yields (grain) in the long term, with 7 and $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ respectively. Durum wheat was significantly affected by the previous crop: a slightly increment (on aver-

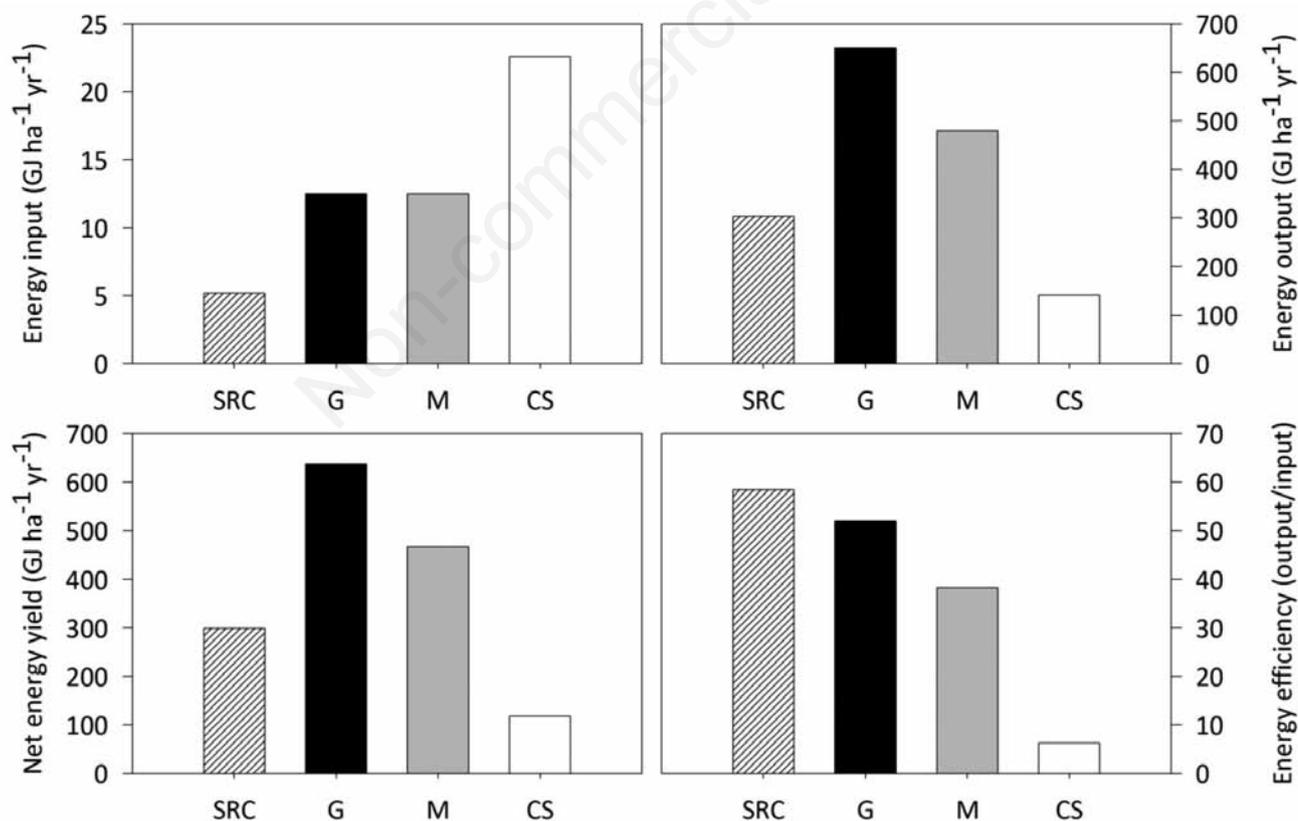


Figure 8. Energy balance indicators: Energy input (top left), Energy output (top right), Net energy yield (bottom left), Energy efficiency (bottom right) of giant reed (G), miscanthus (M), poplar short rotation coppice (SRC) and 6-year cropping system (CS). Modified from Nassi o Di Nasso *et al.*, 2012.

age 7%) for wheat after sugar beet compared to wheat after sunflower was recorded.

Energy balance

Giant reed was compared to the other crops in terms of energy balance using a common methodology. Energy balance was calculated as the energy costs for the production of fertilizers and herbicides, production and repair of machineries, fuel and lubricant consumptions. Inputs and outputs were converted into energy units using coefficients available in literature. For each type of biomass, the calorific value was evaluated through an international standard methodology. Subsequently, the energy output was obtained by multiplying the dry matter yield by the calorific value of the plant materials. In addition, we determined the energy efficiency, calculated as the ratio between the energy output and the energy input, and the net energy yield as the difference between the energy output and the energy input. More details are given in Angelini *et al.* (2009), Nassi o Di Nasso *et al.* (2010b, 2011a).

Our results (Figure 8) showed that annual crops (CR system) required higher energy inputs (>20 GJ ha⁻¹ yr⁻¹) compared to giant reed. Miscanthus and giant reed showed the same total energy input because an identical management was used. Perennial grasses allowed to save 45% of the energy required for the cultivation of the CR, while poplar SRC the 77%. The net energy yield (output – input) increased substantially switching from the CR system to perennial crops, with the highest value in giant reed (over 600 GJ ha⁻¹ yr⁻¹). Finally, another important parameter was the energy efficiency (output/input); it increased nearly 6, 8 and 9 times from CR system (6 GJ GJ⁻¹) to miscanthus, giant reed and poplar SRC, respectively (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2012).

In giant reed the energy efficiency was higher than miscanthus (53 vs 39 GJ GJ⁻¹ as mean value of 12 years of growth). The differences about net energy production and energy efficiency between giant reed and miscanthus mainly depended on the dry biomass yield, having the crops similar calorific value and employing the same energy input (Angelini *et al.*, 2009). Strictly from an energetic point of view, the poplar SRC seemed to represent the better choice between the analyzed cropping systems, being able to produce about 57 GJ of net energy per each GJ used in biomass production phase. The particularly high-energy efficiency of poplar SRC was mainly due to low nitrogen fertilization rates. In fact, while giant reed and miscanthus received fertilisation yearly (after harvest), poplar SRC was fertilized every three years (after harvest) only (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2012). Our results confirmed data reported by Boehemel *et al.* (2008) in a comparison between perennial grasses and willow SRC (3-years cutting cycle).

CO₂ emissions

The emissions of greenhouse gases [GHG - carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O)] was estimated following the 2006 IPCC Guidelines methodologies (IPCC, 2006). Emissions from fossil fuel consumption and direct and indirect N₂O emissions from fertilizers and crop residue application to soil were included. Observing our results it is possible to highlight the same trend previously described for the energy input (Figure 9A). The total amount of GHG emissions ranged from 1400 to 460 kg CO₂ eq ha⁻¹ yr⁻¹. The CR system showed higher values than perennials, equal to about 800 and 460 kg CO₂ eq ha⁻¹ yr⁻¹ in herbaceous species (giant reed and miscanthus) and poplar SRC respectively. Furthermore, as previously described for the energy input, the difference between SRC and giant reed was due to the different crop management: harvesting SRC once every three years leads to a reduction of mechanical operations, such as harvest and fertilization, in turn lowering GHG emissions.

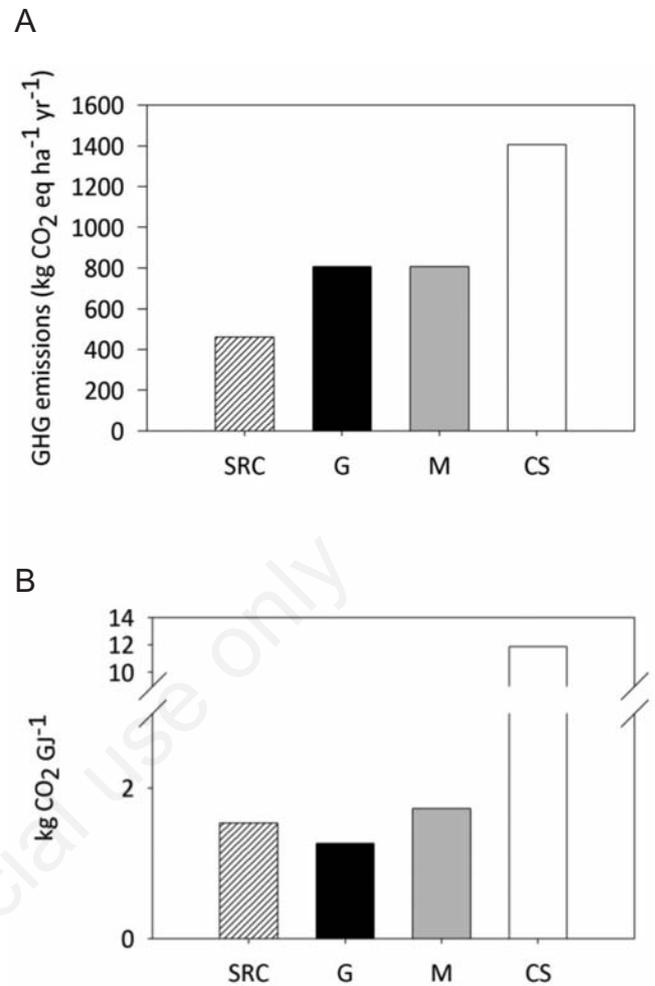


Figure 9. GHG emissions per hectare (A) and per GJ (B) of giant reed (G), miscanthus (M), poplar short rotation coppice (SRC) and 6-year cropping system (CS). Modified from Nassi o Di Nasso *et al.*, 2012.

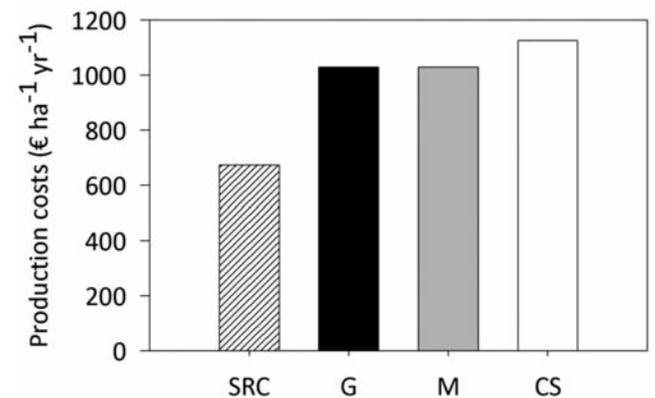


Figure 10. Production costs of giant reed (G), miscanthus (M), poplar short rotation coppice (SRC) and 6-year cropping system (CS). Modified from Nassi o Di Nasso *et al.*, 2012.

Economic aspects

To evaluate the sustainability of giant reed cultivation from an economical point of view, production costs were determined taking into account the fixed costs for all field operations, according to the regional price list of the Association Enterprises for Agricultural Mechanization (APIMA) at the 2012 cost levels (held constant). The price of the production means was established according to the Italian market price in 2011. Finally, in order to better investigate the suitability of giant reed to energy production, further economic indicators were determined, such as the cost per tons of biomass and the cost per GJ of energy produced.

Large variability was observed for the economic indicators (Figure 10). The production costs were unevenly distributed, ranging from 673 to 1125 € ha⁻¹ in poplar SRC and CR system respectively. Giant reed showed relatively high production costs (about 1000 € ha⁻¹); the most expensive operations were represented by the transplanting phase (including also the cost of the propagation material) and the harvest. In particular, the lower value recorded for poplar SRC can be related to the lower cost of the propagation material (owing to the existence, in our region, of a well established market) and to less frequent harvest and fertilization operations occurring every three years. However, taking into account the cost per tons of biomass giant reed performed better than poplar SRC (32 vs 43 € t⁻¹) (Figure 11) owing to its higher yield per hectare. The cost per GJ of energy confirmed the suitability of giant reed to energy production: the cost of producing one GJ of energy from giant reed biomass was less than 2 € GJ⁻¹, the lowest among the compared systems.

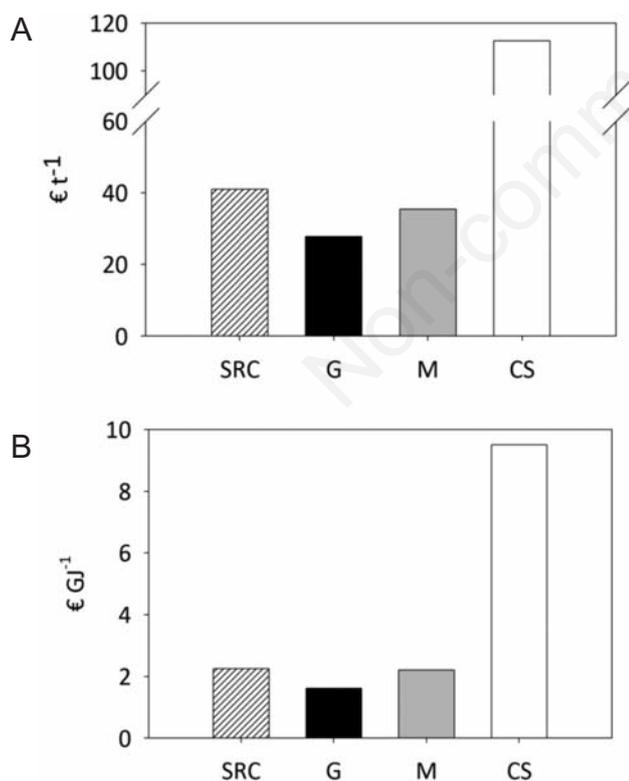


Figure 11. Cost per ton of dry biomass (A) and per GJ of energy produced (B) of giant reed (G), miscanthus (M), poplar short rotation coppice (SRC) and 6-year cropping system (CS). Modified from Nassi o Di Nasso et al., 2012.

Conclusions

Long and mid-term studies carried out in Central Italy confirmed the attitude of giant reed for energy purposes. The crop showed high yields also in marginal land (yield from 38 to 20 t ha⁻¹ year⁻¹) and it was slightly affected by crop management when cultivated in fertile soils (between 25 and 18 t ha⁻¹ year⁻¹ excluding the establishment year). The biomass accumulation occurred from March to November (220 days) and about 3000°C were accumulated. The crop was characterised by a high growth rate at the beginning of the growing season that decreased in summer when high temperature and low water availability occurred. Concerning biomass partitioning, belowground biomass represented 40-50% of the total biomass in mature crops.

In addition, giant reed nutrient requirements were generally low and part of nutrient stocks were remobilized from the rhizome to the aboveground biomass over the spring, with the opposite flow occurring in autumn: nitrogen remobilization was around 30% in spring and 35-40% in autumn. Phosphorus and potassium remobilization were negligible in spring, while around 16% and 40% respectively over the autumn period.

From an environmental point of view giant reed showed a positive energy balance with a high-energy efficiency. GHG emissions per unit of energy showed the lowest value for giant reed owing to its high yield respect to other crops (16 and 28 t ha⁻¹ year⁻¹ in poplar SRC and miscanthus respectively). Finally, production costs were the lowest in poplar SRC when reported on area basis, while giant reed gave the best performance when the cost per ton of dry biomass or per unit of energy was investigated.

To improve knowledge on giant reed cultivation and to favour the diffusion of energy crops in Italian cropping systems, further studies are needed to analyse the long-term effects of giant reed on soil fertility and the optimal soil management after its cultivation. In our research the environmental impact of giant reed and its production costs were addressed to the production phase. Therefore, there is the need to extend the research activity to the whole energy chain and to identify the most sustainable conversion technologies (e.g. biogas, 2nd generation bioethanol, etc.) for different environments.

References

- Angelini LG, Ceccarini L, Bonari E, 2005. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. *Eur. J. Agron.* 22:375-89.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nassi o Di Nasso N, Bonari E, 2009. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass Bioener.* 33:635-43.
- Bagnouls F, Gausson H, 1953. Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse* 88:193-289.
- Bockstaller C, Girardin P, van der Werf HMG, 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *Eur. J. Agron.* 7:261-70.
- Boehmel C, Lewandowski I, Claupein W, 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agric. Syst.* 96:224-36.
- Castoldi N, Bechini L, 2010. Integrated sustainability assessment of cropping systems with agro-ecological and economic indicators in northern Italy. *Eur. J. Agron.* 32:59-72.

- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Available from: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0_Overview/V0_0_Cover.pdf
- Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M, 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass Bioener.* 25:335-61.
- Monti A, Zatta A, 2009. Root distribution and soil moisture retrieval in perennial and annual energy crops in Northern Italy. *Agr. Ecosyst. Environ.* 132:252-9.
- Nassi o Di Nasso N, Angelini LG, Bonari E, 2010a. Influence of fertilisation and harvest time on fuel quality of giant reed (*Arundo donax* L.) in central Italy. *Eur. J. Agron.* 32:219-27.
- Nassi o Di Nasso N, Bosco S, Di Bene C, Coli A, Mazzoncini M, Bonari E, 2011a. Energy efficiency in long-term Mediterranean cropping systems with different management intensities. *Energy* 36:1924-30.
- Nassi o Di Nasso N, Guidi W, Ragaglini G, Tozzini C, Bonari E, 2010b. Biomass production and Energy balance of a 12-year-old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles. *Global Change Biol. Bioener.* 2:89-97.
- Nassi o Di Nasso N, Roncucci N, Bonari E, 2013. Seasonal dynamics of aboveground and belowground biomass and nutrient accumulation and remobilization in Giant reed (*Arundo donax* L.): a three-year study on marginal land. *Bioener. Res.* 6:725-36.
- Nassi o Di Nasso N, Roncucci N, Bosco S, Ragaglini G, Tozzini C, Bonari E. 2012. In search of sustainable energy cropping systems for a Mediterranean environment: comparison of several long-term studies. pp 212-6 in Proc. 20th European Biomass Conference and Exhibition. ETA-Florence Renewable Energies, Florence, Italy.
- Nassi o Di Nasso N, Roncucci N, Triana F, Taccini F, Ragaglini G, Bonari E, 2011b. Giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter) as energy crops in Mediterranean environment: growth analysis and nutrient content. Conf. Biomass & Energy Crops IV, University of Illinois Champaign, IL, USA.
- Nassi o Di Nasso N, Roncucci N, Triana F, Tozzini C, Ragaglini G, Bonari E, 2011c. Productivity of giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter) as energy crops: growth analysis. *Ital. J. Agron.* 6:e22.
- Nassi o Di Nasso N, Roncucci N, Triana F, Tozzini C, Ragaglini G, Bonari E, 2011d. Seasonal nutrient dynamics and biomass quality of giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter) as energy crops. *Ital. J. Agron.* 6:e24.
- Rossa B, Tuffers AV, Naidoo G, von Willert DJ, 1998. *Arundo donax* L. (Poaceae) - a C3 species with unusually high photosynthetic capacity. *Botanica Acta* 111:216-21.

Agamic propagation of giant reed (*Arundo donax* L.) in semi-arid Mediterranean environment

Venera Copani, Salvatore Luciano Cosentino, Giorgio Testa, Danilo Scordia

Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agrarie e Alimentari – DISPA, Catania, Italia

Abstract

This review describes giant reed propagation methods taking into account propagation organs and transplanting times. Field results of researches carried out in semi-arid Mediterranean environment are presented and discussed with the aim to help producers to make decisions on the most suitable establishment method and season of transplant. Temperature and soil water availability are limiting factors constraining optimal establishment of giant reed in Mediterranean semi-arid environment. Days with maximum temperatures of 17°C (T max) and minimum temperatures over 7.5°C (T min) coupled with good soil water availability were found as suitable for stems sprouting. Rhizomes optimal transplanting time resulted in spring, while horizontal stem cuttings in autumn. Vertical stem cutting showed worst results in stem density and biomass yield in every transplanting time. Rhizomes of big size showed greater biomass dry matter yield both at the first year and in the subsequent years after establishment. Stem cuttings biomass yield level off in the subsequent years after establishment. The irrigation supplied during the establishment showed a beneficial effect in all transplanting times and propagation methods.

Introduction

The use of dedicated bioenergy crops for biomass production is augmenting in favor of perennial grasses. Indeed, perennial grasses show several advantages as compared to annual crops, namely reduction of

greenhouse gas emission (Cosentino *et al.*, 2005a; Rettenmaier *et al.*, 2010) and positive energy balance (Mantineo *et al.*, 2009; Fernando *et al.*, 2010). Moreover, perennial crops have the potentialities to be cultivated in marginal lands as compared to traditional crops (Tilman *et al.*, 2006).

In warm temperate environment giant reed (*Arundo donax* L.) seems to be a promising dedicated biomass crop, since it is widespread and well adapted in these environments and show appreciable biomass yield as compared to other perennial biomass crops (Lewandowski *et al.*, 2003; Cosentino *et al.*, 2005b; Angelini *et al.*, 2009). It has been reported to be very interesting for second-generation biofuel, thanks to its high biomass yield and structural polysaccharide compositions (Cosentino *et al.*, 2006; Scordia *et al.*, 2011, 2012, 2013).

However, the use of this species as a new crop for bioenergy production requires specific agronomic and crop management issues before its introduction at farm scale. One of the most important is related to its propagation. As known giant reed does not produce viable seeds, at least in environments where it is naturalized, therefore the agamic propagation of this species is the only way to establish giant reed (Lewandowski *et al.*, 2003). Amongst agamic propagation strategies, rhizomes, stems cuttings and in vitro culture have been studied (Copani *et al.*, 2003; Cosentino *et al.*, 2009; Takahashi *et al.*, 2010).

The rhizome is a creeping stem that grows just below the ground surface; it is branched and composed by nodes and internodes. Several buds provide the shoot extension and its emergence above the soil (Onofry, 1940).

The aboveground stems can reach up to 500 cm in height when fully developed; an average basal stem diameter of 1-4 cm, up to 30-40 nodes and 16-20 cm long internodes have been usually reported; the internodes gradually reduce its length from the bottom upwards (Cosentino *et al.*, 2006).

One-year-old stems (young stems) do not branch, while the older one (stems of previous year) due to apical dominance phenomena start to develop branches from the upper nodes (Cosentino *et al.*, 2009). Nodes enclose dormant buds from which, at maturity and with appropriate conditions, develop roots and shoots.

Semi-arid Mediterranean environment is characterized by mild, rainy winters with hot and dry summers, leading several constraints to the techniques of vegetative propagation of giant reed that in turn must be carefully evaluated in order to identify the most cost effective and efficient solution.

In view of the thermal requirements of the species, the useful window to allow a successful rooting and shoot extension can be identified in early spring, when usually widespread giant reed buds start to shoot from rhizomes after winter dormancy.

Indeed, in this period, rising temperatures and adequate soil water availability conditions make favorable stems sprouting by rhizomes. Other factors to be taken into account are related to the size of the rhizomes and the interaction with water availability and the transplanting time.

A piece of rhizome suitable for transplantation can have a weight

Correspondence: Danilo Scordia, Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agrarie e Alimentari – DISPA, via Valdisavoia 5, 95123 Catania, Italia.
Tel: +39.095.234496 - Fax: +39.095.234449.
E-mail: dscordia@unicit.it

Key words: *Arundo donax*, giant reed, agamic propagation, rhizomes, stem cuttings, Mediterranean environment.

Funding: this research was supported by the Italian Ministry of Agricultural, Food and Forestry Policies (MiPAAF) within the BIOSEA project, Optimization of bioenergy chains for an economic and environmental sustainability.

©Copyright V. Copani *et al.*, 2013
Licensee PAGEPress, Italy
Italian Journal of Agronomy 2013; 8(s1):e4

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License (by-nc 3.0) which permits any non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

ranging from a few hundred up to thousand grams, containing from few to several numbers of already differentiated buds, representing the potential stems. For planting a hectare of giant reed at least ten thousand pieces of rhizomes are needed (Lewandowski *et al.*, 2003). However, since the cost of establishment is generally high, the size of propagation material should be kept as small as possible in order to reduce the establishment cost (Lewandowski *et al.*, 2003).

The use of stem cuttings, instead of rhizome pieces, show several advantages related mostly to the availability and abundance of propagation material and to the transplanting cost. In this case, using stem cuttings with lateral branches can greatly improve uniformity and vigor of the juvenile giant reed stand (Ceotto and Di Candilo, 2010). Stem cuttings are generally buried at about 10-15 cm depth in rows 80-100 cm spaced (Boose and Holt, 1999; Copani *et al.*, 2010; Ceotto and Di Candilo, 2010).

According to the transplanting time, early spring is the best season since rhizomes retain the highest nutrient reserves and due to the favorable temperatures, as also reported for other perennial grasses as *Miscanthus* (Atkinson, 2009).

However, in the semi-arid Mediterranean environment the water deficit usually occurs from the month of April in the hill areas, while it starts about a month earlier in lowland areas. Therefore, transplanting time in spring basically requires certain soil water availability to achieve good establishment. In order to reduce input, as irrigation water, transplanting time in autumn looks a promising option. However, while water availability in spring might constrain the success of the establishment, temperatures play a key role in this season.

This review describes giant reed propagation methods taking into account propagation organs and transplanting times. Field results of researches carried out in semi-arid Mediterranean environment are presented and discussed with the aim to help producers to make decisions on the most suitable establishment method and season of transplant.

Propagation organ

Rhizome size

In order to assess the impact of the size of the rhizome on survival rate and subsequently on biomass production, Cosentino and Copani (2010) compared, in a typical semi-arid Mediterranean environment (south of Italy), four different size and weight of rhizomes of a local giant reed clone. Size and weight ranged between 135 g and 699 g, enclosing three main buds (R3), one main bud (R1), ten cm length with no visible buds (T10) and five cm length with no visible buds (T5).

During the establishment year, under conditions of good soil water availability (seasonal irrigation volume of 240 mm), the rhizome of smallest size (T5) showed a lower survival rate (75%) and a lower number of differentiated stems (3.9 stems m^{-2}). The highest survival rate was recorded in R3 (100%), while no statistical difference concerning stem density was observed between R3, R1 and T10 (6.2 stems m^{-2} in the average).

R3 was the fastest in shoot emissions (14 days after transplant), while T5 the slowest (20.5 days after transplant). No differences were observed between R1 and T10.

However, compensation between number, weight and height of stems resulted in a final biomass yield not statistically different among the rhizome size and weight in the first year harvest (between 2.0 and 2.9 t DM ha^{-1}) (Table 1).

Stem cuttings

The same authors, in the same environment, year and season of trial, compared three different stem cuttings of 100 cm length, namely basal (CB), median (CM), apical (CA) cuttings and the whole plant (CI). Cuttings were buried at 15-20 cm depth, overlapping 2 stems per row with a distance between rows of 100 cm. The seasonal irrigation volume was 240 mm.

Internodes length of the different treatments lead to a different number of buried nodes, with CA and CI showing the highest (32 and 38 node m^{-2} , respectively), while CB and CM the lowest (about 10 node m^{-2}).

Despite CB and CM showed the lowest number of buried node m^{-2} , the percentage of stem sprouted was the highest (13 and 10%, respectively) than CI (3.3%) and CA (2.8%). However, no statistical difference was observed in the stem density at the end of vegetative growth (4.3 stem m^{-2} , in the average).

Even though CB showed the largest stem height (128.4 cm), than CM (118.2 cm), CA and CI (105.1 and 104.7 cm, respectively), the biomass yield was not different among the stem cutting and whole plant treatments (between 0.24 and 0.57 t DM ha^{-1}) in the year of transplant, as shown in Table 2.

Productivity of rhizomes and stem cuttings

The subsequent years, both stem cuttings (CA, CB, CM and CI) and rhizome size (R3, R1, T10 and T5) derived establishment showed a greater biomass DM yield than the first year, as generally observed for perennial grasses (Lewandowski *et al.*, 2003). Aboveground biomass yield increased from 2.6 to 31.3 t DM ha^{-1} in the average of rhizomes size and from 0.4 to 28.1 t DM ha^{-1} in the average of stem cutting treatments, both at the third

Table 1. Rhizome weight, percentage of rhizomes survival at the end of growing period, days from planting to emergence, stem density, stem height, aboveground biomass yield recorded in Catania during the first growing cycle (2007) in relation to the different type of rhizomes (Modified from Cosentino and Copani, 2010).

Treatments	Rhizome weight (g)	Survival rate (%)	Emergence (DAT)	Stem density ($n m^{-2}$)	Stem height (cm)	D.M. yield (t ha^{-1})
R3	699.3 ^a	100.0 ^a	14.0 ^b	6.6 ^a	176.5 ^a	2.7 ^a
R1	250.9 ^b	81.3 ^c	17.0 ^{ab}	5.6 ^a	145.6 ^a	2.0 ^a
T10	233.1 ^b	93.8 ^b	17.0 ^{ab}	6.3 ^a	163.0 ^a	2.6 ^a
T5	135.1 ^c	75.0 ^d	20.5 ^a	3.9 ^b	168.8 ^a	2.9 ^a
Average	329.6	88.8	17.8	5.6	163.5	2.6

DAT, days after transplant; D.M., dry matter; R3, rhizome with three main buds; R1, rhizome with one main bud; T10, rhizome segment 10 cm long with no visible buds; T5, rhizome segment 5 cm long with no visible buds. ^{abc}Values with the same letter do not significantly differ at $P \leq 0.05$ (Student-Newman-Keuls test).

year after establishment. Regardless the size of rhizomes, the biomass yield was always higher than stem cuttings at first and second year harvest (85% and 55% respectively), however the gap reduced at the third year harvest to 11% (Cosentino and Copani, 2010). As far as the rhizome size is concerned, R3 showed the highest biomass yield than the other rhizomes size tested, with 21.5 t DM ha⁻¹ in the average of three-year harvests and a maximum of 43.7 DM t ha⁻¹ at the third year. Stem cuttings, on the other hand, did not show any difference among the part of stems used (CB, CM, CA and CI) following the year after establishment and an average of 11.5 t DM ha⁻¹ was observed. Stem cuttings and rhizomes sizes, except R3, showed a comparable biomass DM yield at the third harvest after establishment (Table 3). It is worth to note that extremely high yields were achieved in this experimental site due to a high phreatic water table in winter time.

Transplanting time

Spring time

Copani *et al.* (2009) carried out a field experiment in an inland hills of Sicily (south of Italy), between the end of winter and spring, using

rhizomes and stem cuttings transplanted in six different dates (between 25 February and 23 April). In this trial, 124 mm irrigation water from transplant to settlement of cuttings (May to June) were supplied. The beginning of the emergence of new shoots was recorded from April 5 (rhizomes) and 15 April (stem cuttings), while the end of the emergence on May 14 (rhizomes) and May 30 (stem cuttings). Significant differences were recorded in relation to the propagation system: emergence occurred averagely 31 days after transplant with rhizomes, while the same interval was 15 days longer (46.5 days after transplanting) with stem cuttings (Table 4). Planting-emergence interval progressively decreased from the first planting date in February to the last one in April, ranging from 40 to 21 days (rhizome cuttings) and from 50 to 37 days (stem cuttings).

The thermal time required from transplanting to emergence emergence was 385°C and 631°C respectively for rhizomes and stem cuttings (Table 4). Authors calculated the thermal threshold, defining as the minimum temperatures necessary for the emergence of new stems; days with maximum temperatures of 17°C (T max) and minimum temperatures over 7.5°C (T min) were found as suitable for sprouting (Figure 1). The same minimum threshold was proposed by Spencer and Ksander (2006) in estimating giant reed stem emergence in relation to temperatures and

Table 2. Number of buried nodes, days from planting to emergence, stem density, nodes sprouted, stem height, aboveground biomass yield recorded in Catania during the first growing cycle (2007) in relation to the different type of stems (Modified from Cosentino and Copani, 2010).

Treatments	Buried nodes (n m ⁻²)	Emergences (DAT)	Stem density (n m ⁻²)	Stem sprouted (% of nodes buried)	Stem sprouted (n m ⁻²)	Stem height (cm)	D.M. yield (t ha ⁻¹)
CI	38.1 ^a	35 ^a	3.9 ^a	3.3 ^b	1.3 ^a	104.7 ^b	0.57 ^a
CB	10.1 ^b	38 ^a	3.9 ^a	13.0 ^a	1.3 ^a	128.4 ^a	0.42 ^a
CM	12.9 ^b	37 ^a	5.2 ^a	10.1 ^a	1.3 ^a	118.2 ^{ab}	0.34 ^a
CA	32.2 ^a	37 ^a	4.3 ^a	2.8 ^b	0.9 ^a	105.1 ^b	0.24 ^a
Average	23.3	36.8	4.3	7.3	1.2	114.1	0.39

DAT, days after transplant; D.M., dry matter; CI, whole stems; CB, basal stem cuttings; CM, median stem cuttings; CA, apical stem cuttings. ^{a,b,c,d}Values with the same letter do not significantly differ at P≤0.05 (Student-Newman-Keuls test).

Table 3. Aboveground dry biomass yield recorded in Catania during the three years period (2007-2010) in relation to the different studied treatments (Modified from Cosentino and Copani, 2010).

Years	Rhizome					Stem				
	R3	R1	T10	T5	Average	CI	CB	CM	CA	Average
2007-2008	2.7	2.0	2.6	2.9	2.6 ^c	0.6	0.4	0.3	0.2	0.4 ^c
2008-2009	18.9	9.5	15.4	12.0	13.9 ^b	6.0	6.4	5.8	7.1	6.3 ^b
2009-2010	43.7	20.3	28.9	32.3	31.3 ^a	33.5	25.9	25.1	26.8	27.8 ^a
Average	21.8 ^a	10.6 ^c	15.6 ^b	15.7 ^b	15.9	13.4 ^a	10.9 ^a	10.4 ^a	11.4 ^a	11.5

R3, rhizome with three main buds; R1, rhizome with one main bud; T10, rhizome segment 10 cm long with no visible buds; T5, rhizome segment 5 cm long with no visible buds; CI, whole stems; CB, basal stem cuttings; CM, median stem cuttings; CA, apical stem cuttings. ^{a,b,c}For each propagation materials values with the same letter do not significantly differ at P≤0.05 (Student-Newman-Keuls test).

Table 4. Date of transplant, days from planting to emergence, thermal sum, stem density and aboveground dry biomass yield during the first growing cycle in relation to the different studied factors (Modified from Copani *et al.*, 2009).

Transplanting date	Emergences (date)		Transplant-emergence (days)		Thermal sum (°C)		Stem density (n m ⁻²)		D.M. yield (t ha ⁻¹)	
	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C
25/02/08	05/04/08	15/04/08	40	50	405	589	5.8	6.6	2.9	1.5
05/03/08	10/04/08	30/04/08	36	56	379	662	6.7	8.3	4.4	4.9
17/03/08	15/04/08	05/05/08	29	49	330	631	6.7	7.2	5.3	4.2
31/03/08	30/04/08	14/05/08	30	44	405	622	6.3	6.4	3.8	3.6
12/04/08	10/05/08	25/05/08	28	43	408	662	5.3	3.6	3.5	2.1
23/04/08	14/05/08	30/05/08	21	37	383	618	5.3	5.7	4.0	2.4
Average			30.7 ^b	46.5 ^a	385 ^b	631 ^a	6.0 ^a	6.3 ^a	4.0 ^a	3.1 ^a

D.M., dry matter; R, rhizome; C, stem cutting. ^{a,b}Values with the same letter do not significantly differ at P≤0.05 (Student-Newman-Keuls test).

nitrate in the soil solution.

According to the stem density, no differences were observed with respect to propagation organs in the average of transplanting date (in the average 6.0 with rhizomes and 6.3 stem m^{-2} with stem cuttings), as well as for aboveground biomass yield (in the average 4.0 t DM ha^{-1} with rhizomes and 3.1 t DM ha^{-1} with stem cuttings).

Even though no statistical differences were observed between propagation organs in term of biomass yield, transplanting from early (stem cuttings) to mid-March (rhizomes) resulted in significantly higher values than the other transplanting dates.

Autumn time

In order to compare autumn with spring transplanting time (following the trial of inland hills of Sicily discussed above), Copani *et al.* (2010) carried out a field experiment in lowland site (average temperature higher than 2°C than inland hill). Three different transplanting times (05 November, 17 March and 30 April) and propagation organs (rhizomes, horizontal stem cuttings and vertical stem cuttings) were used. In this experiment, two irrigation levels have been also tested, namely rainfed (irrigation of 23 mm of water only in spring transplant) and irrigated (250 mm of water in both seasons).

Stem emergence occurred, in the average of propagation methods, after 173 days from transplanting in November, after 50 days from transplanting in March and after 40 days from transplanting in April (Figure 2).

Autumn transplant heavily penalized the shoot sprouted by rhizomes in the average of the irrigation treatment (rainfed and irrigated), showed 3.8 stems m^{-2} against 8.2 and 7.5 stems m^{-2} detected in the transplant of March and April, respectively. On the other hand, the horizontal stem cuttings showed the best result at the autumn transplant (10.6 stems m^{-2}) against 5.0 and 1.7 stems m^{-2} in the two spring transplanting dates, in average of the irrigation treatment. Vertical stem cuttings resulted in lowest stem densities in all transplanting times.

The irrigation effect

As part of the experiment described above (lowland site), an important role was played by the irrigation (Cosentino and Copani, 2011). The increased availability of water resulted, in the average, in improved number of new stems sprouted (63%), but with substantial differences in relation to the propagation organ and to the transplanting time.

Regarding stem cuttings transplanted in autumn its gap was 39% (8.0 against 13.3 stems m^{-2} for rainfed and irrigated, respectively), while the gap increased to 69% in the transplant of March (4.4 against 14.3 stems m^{-2} for rainfed and irrigated, respectively) and 82% in the transplant of April (1.3 against 7.5 stems m^{-2} for rainfed and irrigated, respectively). It is worth to note how the water availability influences stem sprouting from stem cutting method; the higher the water deficit the lower the stem emissions.

Rhizomes behaved differently respect to stem cuttings method being affected by only 30% gap between rainfed and irrigated treatments in the spring transplanting.

In autumn transplanting time, by contrast, a marked difference between rainfed and irrigated (1.2 compared to 6.4 stems m^{-2} , representing a reduction of 80%) was shown, which might be attributed to the weakening of the rhizome during the long winter stasis (more than 160 days between transplant and the emergence).

Vertical stem cuttings showed the lowest stem density in all transplanting times. Within this method best results were observed in the

transplanting time of March (~ 2.0 stem m^{-2} , in the average of irrigated and rainfed treatment). Biomass yield, in the establishment year, has reflected faithfully enough the stem density achieved by the different propagation methods. As far as the transplanting time is concerned, March was the best in terms of biomass yield, irrespective of propagation method (5.8 t DM ha^{-1} in the average of propagation methods) followed by the transplant time of April and November (4.2 and 2.9 t DM ha^{-1} , respectively). Rhizomes showed the significantly highest yield in the spring transplanting times (8.7 and 8.5 t DM ha^{-1} in March and April). Horizontal stem cuttings produced the significantly highest biomass yield than rhizomes and vertical stem cuttings in the autumn transplanting time (5.7, 2.2 and 0.8 t DM ha^{-1} , respectively), however the gap between rainfed and irrigated was always higher in horizontal stem cuttings than rhizomes propagation method in all transplanting times.

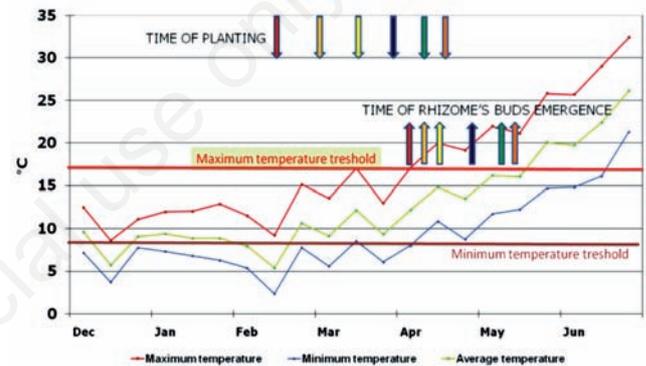


Figure 1. Minimum and maximum temperature threshold for stem emission in giant reed (*Arundo donax* L.), according to Copani *et al.*, 2009.

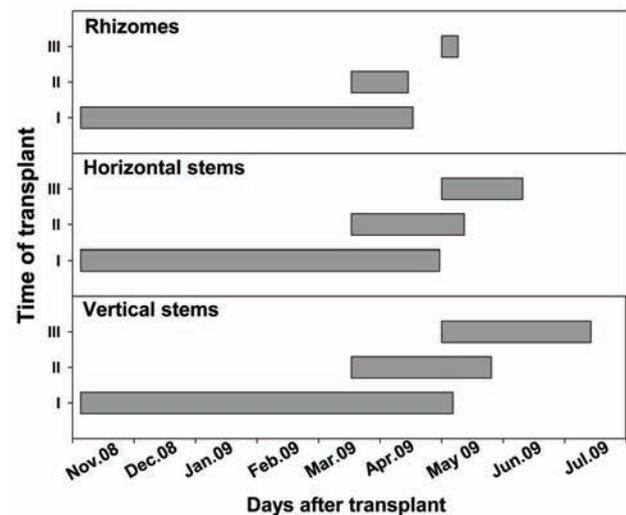


Figure 2. Days from planting to emergence of different propagation methods and transplanting time of giant reed (*Arundo donax* L.), according to Copani *et al.*, 2010.

In the subsequent growing cycle the irrigation was no longer used, however the conditions established previously were significantly kept. Horizontal stem cuttings transplanted in autumn overyielded rhizomes transplanted at the same time (13.4 and 9.0 t DM ha⁻¹). Rhizomes yielded more with the spring than autumn transplanting time (11.8 and 13.1 t DM ha⁻¹ in March and April; 9.0 t DM ha⁻¹ in November) compared to horizontal and vertical stem cuttings, with this latter showing the lowest values in all transplanting dates (Table 5).

Basically, the transplant in autumn was more favorable for horizontal stem cuttings propagation method, while spring transplant for rhizome method; the irrigation shown beneficial effect in all cases.

Other stem cuttings pretreatment effect

In order to attempt faster root/shoot extension, field trials comparing two different transplanting times, 02 and 24 March and stem cutting pretreatment was carried out. Stem cuttings were pretreated either with naphthaleneacetic acid (NAA) or hydration.

Hydration time ranged between 0 and 4 weeks, while NAA treatment was applied 24 h before hydration or not applied. Stems were buried in row 80 cm distant at a depth of 15 cm.

Stem density was measured about two months after transplant, before summer. Significant differences were recorded between the transplanting time and hydration pretreatment, while NAA did not show any statistical difference. Three weeks hydration showed best values (1.76 stems m⁻² in the average of NAA and transplanting dates), while in the second transplanting time a faster shoot emission and higher stem density was observed (1.10 and 1.83 stem m⁻² for first and second transplanting time, respectively) (Table 6). Higher temperatures encountered during the second transplanting time coupled with good soil water availability might have positively affected the stem emission. However, these stem density values are comparably lower than what reported by Cosentino and Copani (2010) or Copani *et al.* (2009). It is worth to note that in the present experiment only one stem

cutting was buried and not overlapping two stems in the same row as shown to be beneficial in order to increase buried nodes and therefore stem density.

Discussion and conclusions

Seed production of giant reed populations widespread in Mediterranean areas is apparently absent. Johnson *et al.* (2006) examined more than 36,000 florets in Californian giant reed populations and found only five ovules that may have been viable.

There is molecular evidence that naturalized populations of giant reed in the USA and Europe are a single genetic clone (Perdue, 1958).

This confirms that dispersal is vegetative and suggests that a single genetic clone has been cultivated in multiple regions of the world (Ahmad *et al.*, 2008). Fragmentation and dispersal of vegetative propagules usually occurs during winter floods (Bell, 1997) leading to rooting and establishment of new populations and field invasions (Dudley, 2000).

Invasion of giant reed can be seen by fragmentation, as means by which giant reed propagules invade a new site in the flood zone, rhizomes expansion with the aim to maintain clumps, and stem layering is the means by which giant reed spreads quickly and episodically within the flood zone (Boland, 2006). Outside the flood zone invasion is very slow either by rhizomes and stems layering. Studies have shown that virtually any segment of stem or rhizome, even if split sideways, can sprout and grow into a new plant if it possesses an axillary bud (Boose and Holt, 1999; Wijte *et al.*, 2005).

However, environmental effects play a key role in new propagules development, either by rhizomes or by stem cuttings.

Boose and Holt (1999) conducted a study on stem and rhizomes storage, size, soil moisture and depth of transplant on sprouting. Stem sprouting was affected by storage duration, temperature and moisture, whereas only storage duration and moisture affected rhizome sprouting. Over 90% of stem and rhizome pieces with at least one node sprouted. Stem pieces, irrespective of stem length, without any node

Table 5. Aboveground dry biomass yield in the first and second growing cycle in relation to the studied treatments (propagation materials and irrigation) (Modified from Cosentino and Copani, 2011).

	I year			II year		
	Rainfed	Irrigated	Average	Rainfed	Irrigated	Average
I transplanting date (05/11/2008)						
Horizontal stem	2.6	8.8	5.7 ^a	7.5	19.4	13.4 ^a
Vertical stem	0.4	1.3	0.8 ^c	3.4	2.5	2.9 ^c
Rhizome	1.2	3.3	2.2 ^b	9.6	8.4	9.0 ^b
Average	1.4 ^b	4.5 ^a	2.9	6.8 ^b	10.1 ^a	8.4
II transplanting date (17/03/2009)						
Horizontal stem	2.4	11.0	6.7 ^a	5.1	14.0	9.6 ^b
Vertical stem	1.5	2.5	2.0 ^c	2.9	4.4	3.7 ^c
Rhizome	6.6	10.8	8.7 ^a	8.0	15.5	11.8 ^a
Average	3.5 ^b	8.1 ^a	5.8	5.4 ^b	11.3 ^a	8.3
III transplanting date (30/04/2009)						
Horizontal stem	0.6	5.8	3.2 ^b	3.0	15.7	9.3 ^b
Vertical stem	0.2	1.4	0.8 ^c	0.1	4.0	2.1 ^c
Rhizome	4.2	12.8	8.5 ^a	8.6	17.7	13.1 ^a
Average	1.7 ^b	6.7 ^a	4.2	3.9 ^b	12.4 ^a	8.2

^{a,b,c} Within each transplanting date, values with the same letter do not significantly differ at P≤0.05 (Student-Newman-Keuls test).

did not sprout. A positive correlation was found between length of stem and time taken to sprout. For rhizomes no correlation was found between length, size and volume on time of sprouting. Rhizomes with visible buds sprouted 100% while only 8% with no visible buds.

Copani *et al.* (2009) found similar survival rates when used rhizomes with visible buds; however satisfactorily results were also shown with rhizomes of 5 cm length with no visible buds (75% survival rates) compared to what reported by Boose and Holt (1999).

It has been reported that rhizomes display high regeneration potential year round (Decruyenaere and Holt, 2001), while stems show a seasonal depression in sprouting potential when temperatures fall below approximately 17°C (Boose and Holt, 1999; Wijte *et al.*, 2005).

In a temperature controlled experiment (16 h at 28°C and 8 h at 16°C) Wijte *et al.* (2005) found successful regeneration (30-80%) from stem fragments with lengths ranging from 1 to 10 cm, even if split lengthwise, but only when the axillary bud was present and intact. In an unheated greenhouse the same authors reported 0-20% regeneration in the winter and 90-100% in the summer time.

Controlled experiments indicate that temperature, type of propagation organ, soil moisture, storage method of propagation materials, among others, impact on the success of giant reed establishment by means of vegetative organs.

However, field experiments would better describe the behavior of the vegetative organs and their interaction with climatic conditions on shoot emission and most importantly on aboveground biomass yield over years.

In field experiments temperature and soil water availability are limiting factors constraining optimal establishment of giant reed in Mediterranean semi-arid environment (Copani *et al.*, 2009; Cosentino and Copani, 2011). According to the temperature threshold, optimal transplanting time should be carried out in early spring time, however, in Mediterranean semi-arid environment, water shortage could affect

stem emission and therefore the establishment of giant reed. In order to overcome water shortage, giant reed could be established in autumn, taking advantage of rainfall. However, in this case minimum temperature threshold could affect or postpone stem emission.

Spencer and Ksander (2006) carried out outdoor experiments in northern California showing that during the year of establishment stems emerged when average soil temperature of the proceedings week was 11.8°C (26 March) and continued to sprout until autumn when the temperature was still at 15.6°C (4 November). In the second year, stem sprouting was observed earlier in the season, when the temperature was 10.8°C (15 February) and continued through early December when temperature was 5.2°C.

The subsequent year, stem started to sprout when soil temperature was 6.9°C (mid-February). Similarly, Decruyenaere and Holt (2001) reported stem emergence in southern California mostly in May, June and July.

In a field experiment in two different location in northern Italy (sandy and loam-silty-soil, respectively), Ceotto and Di Candilo (2010) transplanted stem cuttings with lateral branches in July, using weekly irrigation volume of 35 mm and 20 mm (sandy and loam-silty-soil, respectively) through August, and found and excellent and uniform crop establishment both in terms of stem density and plant height.

Giant reed propagation field experiments carried out in Mediterranean semi-arid environment (southern Italy) and discussed in this work allow drawing some key remarks.

In autumn or spring transplanting time, the propagation method showed a different behavior. Rhizomes resulted most suitable in spring time, while horizontal stem cuttings in autumn transplant. Vertical stem cuttings showed worst results in stem density and biomass yield in every transplanting time.

When using rhizomes as propagation material, its size plays a key role. Indeed, a survival rate of 100% and highest biomass yield in the subsequent years after establishment were reported with rhizomes of weight of about 700 g. Stem cuttings from different part of the stem (whole plant, basal, median and apical cutting) did not show any difference in terms of biomass yield, both at first and subsequent years after establishment.

The irrigation supplied during the establishment showed a beneficial effect in all transplanting times and propagation methods. Results indicate that the autumn transplant favors the stem cuttings even under rainfed condition, while the spring transplant benefits the rhizome; stem cuttings transplanted in spring requires water supply.

Table 6. Stem density in relation to stem cutting pretreatment.

Hydration (week)	NAA	Transplanting date	Stem m ⁻²
4	Yes	I	1.20
4	No	I	1.41
3	Yes	I	1.72
3	No	I	1.15
0	Yes	I	0.57
0	No	I	0.57
4	Yes	II	1.20
4	No	II	2.29
3	Yes	II	2.14
3	No	II	2.03
0	Yes	II	2.14
0	No	II	1.20
	Transplanting date	I	1.10 ^b
	Transplanting date	II	1.83 ^a
	Hydration	4	1.52 ^b
	Hydration	3	1.76 ^a
	Hydration	0	1.12 ^c
	NAA	Yes	1.49 ^a
	NAA	No	1.44 ^a

^{a,b,c} Within each studied factor values with the same letter do not significantly differ at P≤0.05 (Student-Newman-Keuls test). NAA, naphthaleneacetic acid

References

- Ahmad R, Pui-Sze L, Spencer DF, Iasieniuk M, 2008. Molecular evidence for a single genetic clone of invasive *Arundo donax* in the United States. *Aquatic Botany* 88:113-20.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nasso Di Nasso N, Bonari E, 2009. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass Bioener.* 33:635-43.
- Atkinson CJ, 2009. Establishing perennial grass energy crops in the UK: A review of current propagation options for *Miscanthus*. *Biomass Bioener.* 3:752-9.
- Bell G, 1997. Ecology and management of *Arundo donax*, and approaches to riparian habitat restoration in Southern California. In: J.H. Brock, M. Wade, P. Pysek and D. Green (eds) *Plant invasions: studies from North America and Europe*. Blackhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp 103-113.
- Boland JM, 2006. The importance of layering in the rapid spread of

- Arundo donax (Giant reed). *Madroño* 53:303-12.
- Boose AB, Holt JS, 1999. Environmental effects on asexual reproduction in *Arundo donax*. *Weeds Res.* 39:117-27.
- Ceotto E, Di Candilo M, 2010. Shoot cuttings propagation of giant reed (*Arundo donax* L.) in water and moist soil: The path forward?. *Biomass Bioener.* 34:1614-23.
- Copani V, Cosentino SL, Testa G, Guarnaccia P, Litrico A, 2009. Propagation of *Arundo donax* by means of rhizomes and stem cuttings in semi-arid Mediterranean environment. pp 595-598 in Proc. 17th European Biomass Conference and Exhibition, Hamburg, Germany.
- Copani V, Cosentino SL, Testa G, Scordia D, Cosentino AD, 2010. Current propagation options to establish *Arundo donax* L. in Mediterranean environment. pp 522-525 in Proc. 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon, France.
- Copani V, Cosentino SL, D'Agosta GM, Mantineo M, 2003. Validità di differenti metodi di propagazione per l'impianto di una coltura di canna comune (*Arundo donax* L.). pp 163-164 in Atti XXXV Conv. SIA, Portici (NA), Italy
- Cosentino SL, Copani V, 2010. La produttività del canneto (*Arundo donax* L.) in relazione alla tecnica d'impianto. pp 87-88 in Atti XXXIX Conv. SIA, Rome, Italy.
- Cosentino SL, Copani V, 2011. La propagazione agamica della canna comune (*Arundo donax* L.). In: L. Pari (ed.) Lo sviluppo delle colture energetiche in Italia. Il contributo dei progetti di ricerca SUS-CACE e FAESI. CRA – Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Roma, Italia, pp 659-681.
- Cosentino SL, Copani V, D'Agosta GM, Sanzone E, Mantineo M, 2006. First results on evaluation of *Arundo donax* L. clones collected in Southern Italy. *Industr. Crops Prod.* 23:212-22.
- Cosentino SL, Foti S, D'Agosta GM, Mantineo M, Copani V, 2005a. Confronto tra gli impatti ambientali di biocombustibili e di combustibili fossili per mezzo della "Life Cycle Assessment" (LCA). *Agroindustria* 4:109-28.
- Cosentino SL, Foti S, Venturi G, Giovanardi R, Copani V, Mantineo M, D'Agosta G, Bezzi G, Tassan Mazzocco G, 2005b. Colture erbacee annuali e poliennali da biomassa per energia di possibile coltivazione in Italia. *Agroindustria* 4:35-48.
- Cosentino SL, Copani V, Mantineo M, D'Agosta GM, Sortino O, 2009. Giant reed (*Arundo donax* L.) propagation by means of stem cuttings. *Ital. J. Agron.* 4:875-9.
- Decruyenaere JG, Holt JS, 2001. Seasonality of clonal propagation in giant reed. *Weed Sci.* 49:760-7.
- Dudley TL, 2000. *Arundo donax* L. In: C.C. Bossard and J.M. Randall (eds.) *Invasive plants of California's Wildlands*. University of California Press, Berkeley, CA, pp 53-58.
- Fernando AL, Duarte MP, Almeida J, Boléo S, Mendes B, 2010. Environmental impact assessment of energy crops cultivation in Europe. *Biofuels Bioprod. Bioref.* 4:594-604.
- Johnson M, Dudley T, Burns C, 2006. Seed production in *Arundo donax*?. *Cal-IPC News Fall 2006*, 12-13.
- Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M, 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass Bioener.* 25:335-61.
- Mantineo M, D'Agosta GM, Copani V, Patanè C, Cosentino SL, 2009. Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 114:204-13.
- Onofry A, 1940. *La canna comune (Arundo donax L.)*. Cremonese libraio ed., Roma, Italia.
- Perdue RE, 1958. *Arundo donax* – Source of musical reeds and industrial cellulose. *Econ. Bot.* 12:368-404.
- Rettenmaier N, Köppen S, Gärtner SO, Reinhardt GA, 2010. Life cycle assessment of selected future energy crops for Europe. *Biofuel Bioprod. Bioref.* 4:620-36.
- Scordia D, Cosentino SL, Lee JW, Jeffries TW, 2011. Dilute oxalic acid pretreatment for biorefining giant reed (*Arundo donax* L.). *Biomass Bioener.* 35:3018-24.
- Scordia D, Cosentino SL, Lee JW, Jeffries TW, 2012. Bioconversion of giant reed (*Arundo donax* L.) hemicellulose hydrolysate to ethanol by *Scheffersomyces stipitis* CBS6054. *Biomass Bioener.* 39:296-305.
- Scordia D, Cosentino SL, Jeffries TW, 2013. Enzymatic hydrolysis, simultaneous saccharification and ethanol fermentation of oxalic acid pretreated giant reed (*Arundo donax* L.). *Industr. Crops Prod.* 49:392-9.
- Spencer DF, Ksander GG, 2006. Estimating *Arundo donax* ramet recruitment using degree-day based equations. *Aquatic Botany* 85:282-8.
- Takahashi W, Takamizo T, Kobayashi M, Ebina M, 2010. Plant regeneration from calli in Giant Reed (*Arundo donax* L.). *Grassland Sci.* 4:56224-9.
- Tilman D, Hill J, Lehman C, 2006. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science* 314:1598-600.
- Wijte AHBM, Mizutani T, Motamed ER, Merryfield ML, Miller DE, Alexander DE, 2005. Temperature and endogenous factors cause seasonal patterns in rooting by stem fragments of the invasive giant reed, *Arundo donax* (Poaceae). *Int. J. Plant Sci.* 166:507-17.

Produzione di bioetanolo di seconda generazione dalla canna comune (*Arundo donax* L.)

Danilo Scordia,¹ Salvatore L. Cosentino,¹ Venera Copani,¹ Giorgio Testa,¹ Thomas W. Jeffries²

¹Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agrarie e Alimentari (DISPA), Università di Catania, Catania, Italia; ²Department of Bacteriology, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA

Abstract

Lo scopo del presente lavoro è stato studiare l'effetto di temperatura, tempo di reazione e concentrazione di acido ossalico durante il pretrattamento della canna comune (*Arundo donax* L.), su i) rilascio di zuccheri e composti inibitori dall'emicellulosa, ii) idrolisi enzimatica della cellulosa e iii) simultanea saccarificazione e fermentazione (SSF) della cellulosa utilizzando un complesso cellulase/ β -glucosidase ed il ceppo di lievito *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054. La fase di pretrattamento è stata ottimizzata utilizzando un disegno fattoriale completo (central composite design) con due parametri come input – Severity Factor (SF) e concentrazione di acido ossalico (OA). La temperatura di reazione è variata da 150 a 190°C, il tempo di reazione da 10 a 40 minuti e la concentrazione di acido dal 2 all'8% (peso/peso). La concentrazione di xilosio (g L^{-1}) nell'idrolizzato emicellulosico è cresciuta fino a valori medi di SF e OA; a più alte severità di trattamento, l'acido acetico ed i composti di degradazione degli zuccheri sono aumentati linearmente all'aumentare del SF o della OA. L'idrolizzato emicellulosico pretrattato a SF 2,87 e 5,0% OA è stato utilizzato come substrato per la fermentazione ad opera di *S. stipitis* CBS6054. A pH 6,0, circa il 100% degli zuccheri presenti sono stati fermentati ad etanolo, ottenendo una concentrazione di $8,20 \text{ g L}^{-1}$ dopo 48 ore di incubazione. Il tasso di conversione dei glucani a glucosio seguendo l'idrolisi enzimatica della cellulosa ha raggiunto il valore massimo di 95% a 4,05 SF e 5,0% OA. Analogamente la SSF alle più alte severità di pretrattamento ha fatto registrare sia la resa che la concentrazione più elevata in etanolo, rispettivamente 75,3% e $18,0 \text{ g L}^{-1}$.

Corrispondente: Danilo Scordia, Dipartimento di Scienze delle Produzioni, Agrarie e Alimentari – DISPA, via Valdisavioia 5, 95123 Catania, Italia. Tel. +39.095.234496 - Fax: +39.095.234449. E-mail: dscordia@unict.it

Key words: *Arundo donax*, canna comune, bioetanolo, pretrattamento, idrolisi enzimatica, simultanea saccarificazione e fermentazione.

Ringraziamenti: si ringrazia il Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (MiPAAF) che ha finanziato il progetto BIOSEA, Ottimizzazione delle filiere Bioenergetiche per una Sostenibilità Economica ed Ambientale.

©Copyright D. Scordia et al., 2013

Licensee PAGEPress, Italy

Italian Journal of Agronomy 2013; 8(s1):e5

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License (by-nc 3.0) which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

Introduzione

La biomassa lignocellulosica include residui agricoli, residui di specie arboree e forestali, rifiuti solidi urbani, residui dell'industria cartaria e del legno, e colture dedicate *no-food*. In quasi tutti i casi, la loro componente principale è la cellulosa, seguita dall'emicellulosa e dalla lignina. Proteine, pectine, lipidi e ceneri chiudono il bilancio (Wyman, 1994).

La cellulosa e l'emicellulosa sono i substrati principali per la produzione di bioetanolo di seconda generazione. Essi sono i carboidrati più abbondanti in natura e la loro bioconversione ad etanolo potrebbe avere diversi vantaggi, tra cui la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra e la riduzione della dipendenza dai carburanti fossili (Tilman *et al.*, 2006). Tuttavia, la naturale resistenza dei materiali lignocellulosici, spesso chiamata *recalcitranza*, è tra i maggiori ostacoli allo sviluppo economico di carburanti di seconda generazione. A causa della recalcitranza, è necessaria una fase di pretrattamento per idrolizzare le emicellulose e nel contempo rendere più accessibile la frazione della cellulosa all'attacco enzimatico. La lignina svolge un ruolo chiave nella bioconversione del materiale lignocellulosico in quanto riduce l'idrolisi della cellulosa formando una barriera fisica tra gli enzimi cellulasi e β -glucosidasi ed il substrato (Pan *et al.*, 2005).

Negli studi effettuati sul pretrattamento della biomassa lignocellulosica sono state utilizzate temperature superiori a 150°C in acqua, ammoniaca, acidi e basi con diversi livelli di diluizione, solo in pochi casi si è fatto ricorso ad acidi dicarbossilici quali vettori di catalisi per l'idrolisi della biomassa lignocellulosica (Lee *et al.*, 2009; Lee e Jeffries, 2011; Scordia *et al.*, 2010, 2011, 2012; Kim *et al.*, 2011). Precedenti ricerche hanno dimostrato, infatti, che gli acidi dicarbossilici hanno una maggiore selettività nell'idrolisi dei legami β -(1,4) rispetto all'acido solforico (Lee and Jeffries, 2011), quest'ultimo da tempo considerato come lo stato dell'arte della tecnologia di pretrattamento.

La canna comune ha dimostrato di essere un materiale d'elezione per la bioconversione a bioetanolo di seconda generazione, grazie alla sua alta resa in biomassa secca e al relativamente alto contenuto in polisaccaridi strutturali (Cosentino *et al.*, 2006; Scordia *et al.*, 2011, 2012, 2013a). Inoltre, è una coltura *no-food* con la capacità di crescere in terreni marginali, rispondendo alle attuali questioni etiche sul *food vs fuel*.

Nel presente lavoro si riferisce dei risultati ottenuti pretrattando la canna comune (*Arundo donax* L.) con acido ossalico diluito (Scordia *et al.*, 2012, 2013a). In particolare, il lavoro svolto in collaborazione con l'*USDA Forest Products Laboratory* di Madison, WI, USA, è stato quello di studiare l'effetto della temperatura, tempo di reazione e concentrazione di acido ossalico durante il pretrattamento della canna comune, e la risposta di queste variabili indipendenti su i) rilascio di zuccheri e composti inibitori dall'emicellulosa, ii) idrolisi enzimatica della cellulosa e iii) simultanea saccarificazione e fermentazione della cellulosa utilizzando un complesso cellulase/ β -glucosidase ed il ceppo di lie-

vito *Scheffersomyces (Pichia) stipitis* CBS 6054 che ha la peculiarità di metabolizzare sia zuccheri C5 che C6. Viene anche illustrata la fermentazione dell'idrolizzato emicellulosico a determinate condizioni di pretrattamento.

Materiali e metodi

Materia prima

La biomassa di *Arundo donax* (foglie e culmi), clone Capo d'Orlando (Cosentino *et al.*, 2006), è stata raccolta nel febbraio 2008 presso l'azienda didattico-sperimentale dell'Università degli Studi di Catania (10 m slm, 37°25' N lat., 15° 30' E long.). L'umidità della biomassa è stata stabilizzata al 4.0±0.72%, ponendo i campioni in stufa a 65±1°C fino a peso costante. Successivamente, la biomassa secca è stata macinata riducendola in porzioni non più lunghe di 2 cm (Wiley Mill model No 2, Philadelphia, PA, USA), omogeneizzata e conservata a temperatura ambiente.

Pretrattamento

Le varie combinazioni tra la biomassa della canna comune e le soluzioni di pretrattamento sono state poste in recipienti di acciaio inossidabile (approssimativamente 1 litro in volume) e montate all'interno di un digestore pilota riscaldato esternamente con vapore e capace di ruotare alla velocità di 2 giri al minuto. La soluzione comprendeva acido ossalico (OA), acqua e biomassa secca nel rapporto liquido:solido di 4:1 (peso/peso). La temperatura di pretrattamento ed il tempo di reazione sono stati combinati in un unico parametro, *Severity Factor* (SF), secondo la formula di Overend e Chornet (1987):

$$SF = \text{Log} (R_0) = \text{Log} \left[t \cdot \exp \left(\frac{T_p - T_{ref}}{14.75} \right) \right] \quad (1)$$

dove *t* è il tempo di reazione (min), *T_p* è la temperatura di pretrattamento (°C), *T_{ref}* è la temperatura di riferimento posta a 100°C e 14,75 si riferisce all'energia di attivazione della reazione (113 KJ mol⁻¹).

I valori di temperatura utilizzati andavano da 150 a 190°C, il tempo di reazione da 10 a 40 min e la concentrazione di OA diluito da 2 a 8% (peso/peso).

Successivamente al pretrattamento, la frazione liquida, composta principalmente da zuccheri C5, è stata separata da quella solida (C6 + lignina) mediante filtrazione a vuoto e le diverse frazioni sono state conservate a 4°C.

Idrolisi enzimatica

La frazione solida dopo pretrattamento è stata idrolizzata in beute da 125 mL contenenti il 10% (p/v) di biomassa secca e 50 mL di sodio citrato a pH 5,0 come soluzione tampone. È stata utilizzata una preparazione commerciale di enzimi cellulasi/β-glucosidasi (Accelerase 1000, Genencor Inc., A Danisco division) alla concentrazione di 0,50 mL/g cellulosa ed un'attività di 1000 CMC/g cellulosa (carboxymethylcellulose/g cellulosa) e 160 PNG/g cellulosa (para-nitrofenil-β-D-glucopiranoside/g cellulosa).

Una unità CMC libera 1 μmol min⁻¹ di zuccheri riduttori (essersi come glucosio equivalente) in condizioni specifiche di temperatura e pH (50°C e 4,8 rispettivamente). Una unità pNPG libera 1 μmol di nitrofenolo dal para-nitrofenile-β-D-glucopiranoside in 10 min a 50°C e pH 4,8 (Genencor Inc., informazioni sul prodotto).

Tabella 1. Condizioni sperimentali e relativo Severity Factor [Log (R₀)] del pretrattamento di canna comune con acido ossalico diluito (*Arundo donax* L.), secondo il central composite design (Tradotto da Scordia *et al.*, 2012, 2013a).

Esperimento Run	Codici			Temperatura (°C)	Fattori OA (% w/w)	Tempo (min)	Severity Factor Log (R ₀)
	X ₁	X ₂	X ₃				
1	-1	-1	-1	158,1	3,21	16,07	2,93
2	1	-1	-1	181,9	3,21	16,07	3,59
3	-1	1	-1	158,1	6,79	16,07	2,93
4	1	1	-1	181,9	6,79	16,07	3,59
5	-1	-1	1	158,1	3,21	34,33	3,24
6	1	-1	1	181,9	3,21	34,33	3,93
7	-1	1	1	158,1	6,79	34,33	3,24
8	1	1	1	181,9	6,79	34,33	3,93
9	-1,68	0	0	150,0	5,00	25,00	2,87
10	1,68	0	0	190,0	5,00	25,00	4,05
11	0	-1,68	0	170,0	2,00	25,00	3,46
12	0	1,68	0	170,0	8,00	25,00	3,46
13	0	0	-1,68	170,0	5,00	10,00	3,06
14	0	0	1,68	170,0	5,00	40,00	3,66
15	0	0	0	170,0	5,00	25,00	3,46
16	0	0	0	170,0	5,00	25,00	3,46
17	0	0	0	170,0	5,00	25,00	3,46

X₁, X₂ e X₃ rappresentano i codici dei valori di temperatura (°C), concentrazione di acido ossalico (%p/p) e tempo di reazione (min), rispettivamente. OA, acido ossalico.

Microorganismi e condizioni di crescita

Per fermentare la frazione liquida comprendente zuccheri provenienti dall'idrolisi dell'emicellulosa e per la simultanea saccarificazione e fermentazione (SSF) della frazione solida, comprendente cellulosa e lignina, è stato utilizzato il ceppo di lievito *Schefferomyces (Pichia) stipitis* CBS6054. Le condizioni di crescita del primo esperimento sono riportate in Scordia *et al.*, 2012, mentre quelle del secondo esperimento in Scordia *et al.*, 2011 e 2013a.

Preparazione della frazione emicellulosica ed inoculo

Il pH iniziale della frazione emicellulosica dopo pretrattamento è stato aumentato con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 5,0, successivamente aggiustato a 5,5, 6,0 e 6,5 con NaOH, centrifugato, sterilizzato, e trasferito in beute da 125 mL contenete l'idrolizzato ed i nutrienti per i lieviti (Scordia *et al.*, 2012).

Le beute sono state chiuse con tappi in cotone per consentire una microaerazione ed incubati a 30°C, 150 giri al minuto per 96 ore. I campioni sono stati prelevati a 0, 24, 48, 72 e 96 ore per quantificare i prodotti consumati e generati.

Determinazioni analitiche

La composizione in carboidrati strutturali della materia prima e dei solidi dopo pretrattamento sono stati misurati mediante cromatografia a scambio anionico (ICS-3000, Dionex, Sunnyvale, CA, USA) con rilevazione amperometrica pulsata (HPAEC-PAD), secondo il metodo di Davis (1998).

Gli zuccheri semplici, l'acido acetico e l'etanolo sono stati misurati con cromatografia liquida ad alta prestazione (*high-performance liquid chromatography*, HPLC) (Gilson 307 system, Villiers-le-Bel, France) equipaggiato con indice di rifrazione RID (Hitachi High Technologies Corporation model L-2490, Hercules, CA, USA) utilizzando una colonna HPX-87H (Bio-rad Laboratories Inc., Hercules, CA, USA) operante a 55°C, H_2SO_4 (5 mM) come fase mobile e $0,3 \text{ mL min}^{-1}$ come flusso.

I composti inibitori generati dalla degradazione degli zuccheri semplici nella frazione emicellulosica, ossia l'idrossimetilfurfurale (HMF)

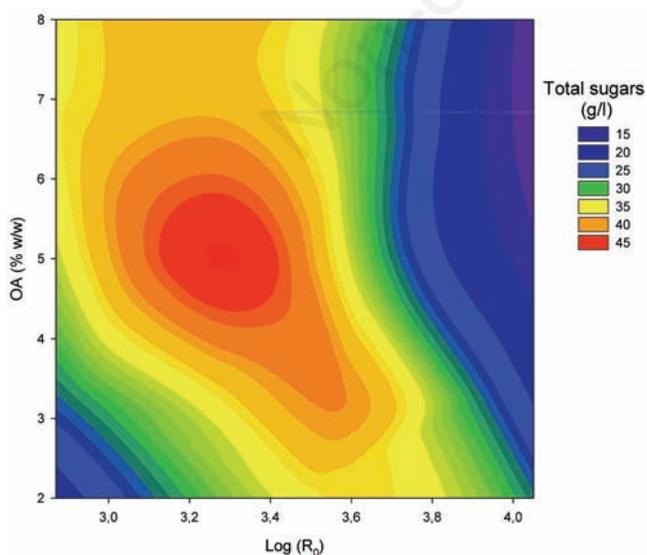


Figura 1. Risposta degli zuccheri totali in funzione del Severity Factor [Log (R_0)] rispetto alla concentrazione di acido ossalico (OA) durante il pretrattamento di canna comune (*Arundo donax* L.) (Modificato da Scordia *et al.*, 2012).

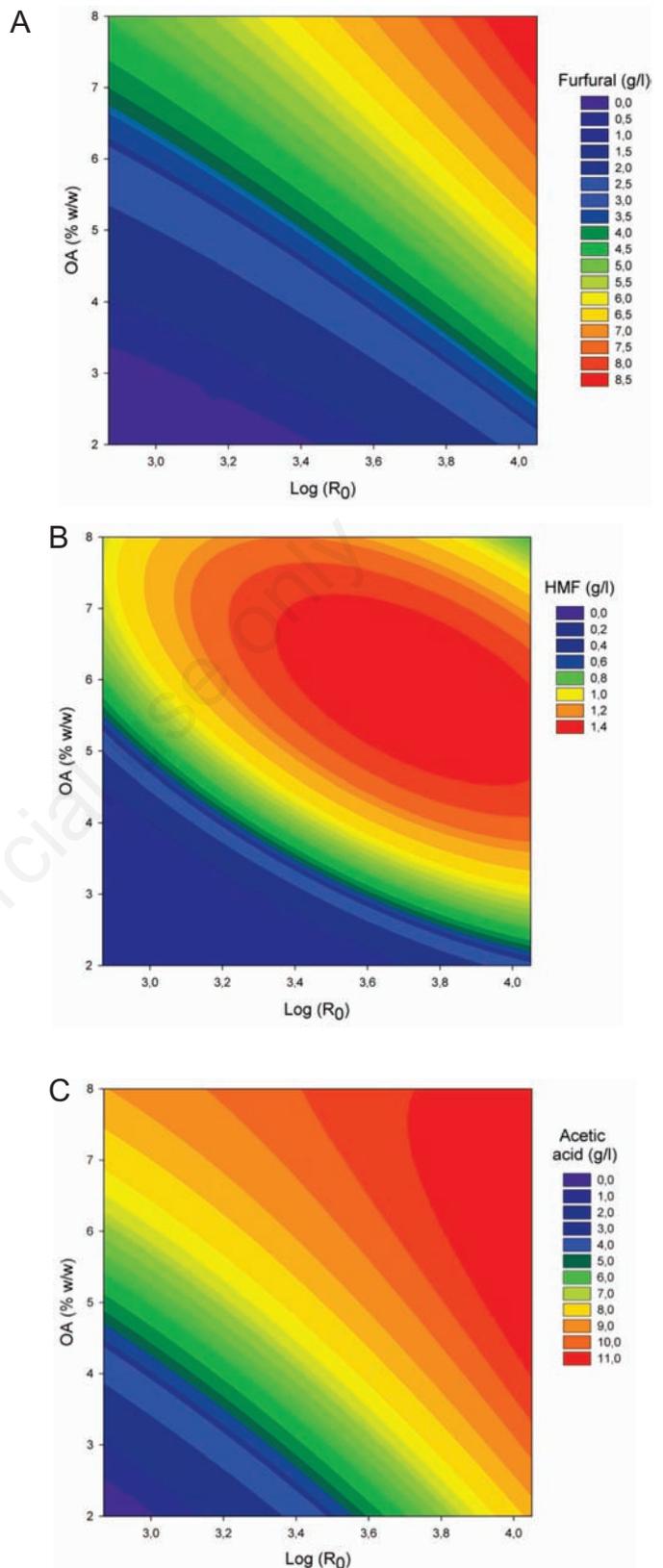


Figura 2. Risposta del rilascio di (A) furfurale, (B) idrossimetilfurfurale (HMF) e (C) acido acetico in funzione del Severity Factor [Log (R_0)] rispetto alla concentrazione di acido ossalico (OA) durante il pretrattamento di canna comune (*Arundo donax* L.) (Modificato da Scordia *et al.*, 2012).

ed il furfurale sono stati misurati con HPLC (HP, 1090 Series II, Hewlett-Packard, Now Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA) con indice di rifrazione UV equipaggiato con una colonna Phenomenex C18(2) e acetonitrile (ACN), acqua ed acido acetico (1%) come fase mobile ad un flusso di 0,8 mL min⁻¹ (Scordia *et al.*, 2010, 2011, 2012).

Disegno sperimentale

La fase di pretrattamento è stata ottimizzata utilizzando un disegno fattoriale completo (central composite design) con due parametri come input, SF e OA, con lo scopo di valutare l'effetto di queste variabili indipendenti (SF e OA) sulla composizione della biomassa dopo pretrattamento (contenuto in xilani, glucani e lignina), il rilascio di zuccheri e composti inibitori nell'idrolizzato emicellulosico, l'idrolisi enzimatica e la SSF della cellulosa. Le condizioni sperimentali effettuate in maniera completamente randomizzata sono riportate in Tabella 1.

L'analisi della varianza è stata condotta utilizzando il software Minitab® 15.0 con un livello di confidenza del 99% (P≤0.001).

Risultati e discussione

Biomassa di canna comune pre e post trattamento, recupero degli zuccheri e generazione di composti inibitori nell'idrolizzato emicellulosico

La biomassa di canna comune è composta per il 57,6% da polisaccaridi strutturali, 20,4% da lignina, 5,9% da ceneri, di cui 1,7% di ceneri della lignina acido-insolubile (Tabella 2). La cellulosa, composta esclusivamente da glucani, ammonta al 34,6%, mentre le emicellulose sono composte da xilani (20,4%), arabinani (1,81%), mannani (0,12%), galattani (0,66%) e ramnani (0,06%).

Il rapporto trovato tra cellulosa, emicellulosa e lignina della canna comune è simile a quello di altre monocotiledoni come il *Saccharum spontaneum*, il *Miscanthus ssp.*, la paglia di frumento, gli stocchi di

mais, ed altri residui erbacei (Scordia *et al.*, 2010, 2013b; Kim *et al.*, 2012). Successivamente al pretrattamento, la biomassa è andata incontro ad idrolisi dell'emicellulosa, questa, secondo la severità adottata è stata più o meno idrolizzata, come mostrato in Tabella 3. Nel contempo, il contenuto in glucani e lignina è aumentato, da una parte perché l'emicellulosa è stata solubilizzata, dall'altra per la maggiore recalcitranza di questi due composti rispetto all'emicellulosa stessa. Mentre la concentrazione in emicellulosa è andata linearmente diminuendo al crescere della severità del trattamento (SF e OA), la concentrazione in glucani e lignina è cresciuta al crescere della severità e della concentrazione di acido.

È stato riportato che la rimozione degli xilani durante il pretrattamento è un buon indicatore dell'efficacia del pretrattamento. Maggiore rimozione degli xilani conduce ad una minore resistenza nella successiva idrolisi della cellulosa all'attacco enzimatico (Kabel *et al.*, 2007).

Tabella 2. Composizione della biomassa secca di canna comune (*Arundo donax* L.) (Tradotto da Scordia *et al.*, 2012).

Componente	Biomassa secca (%)
Glucani	34,60±0,14
Xilani	20,41±0,02
Arabinani	1,81±0,03
Galattani	0,66±0,06
Mannani	0,12±0,01
Ramnani	0,06±0,00
K. Lignina	20,44±0,07
Ceneri	5,90±0,10
Ceneri (acido-insolubili)	1,67±0,08

Valore medio di tre determinazioni±deviazione standard.

Tabella 3. Composizione della biomassa di canna comune (*Arundo donax* L.) dopo pretrattamento in funzione del Severity Factor [Log (R₀)] e concentrazione di acido ossalico (Tradotto da Scordia *et al.*, 2013a).

Log (R ₀)	[OA] (% p/p)	Glucani (% p/p)	Xilani (% p/p)	Lignina (% p/p)
2,87	5,00	43,35	14,63	26,60
2,93	3,20	42,45	18,39	25,10
2,93	6,70	49,34	8,87	29,50
3,06	5,00	48,33	9,94	29,10
3,24	3,20	45,79	14,34	27,00
3,24	6,70	50,16	7,26	30,50
3,46	2,00	46,20	12,64	27,70
3,46	5,00	51,68	6,66	31,10
3,46	5,00	51,79	5,48	31,50
3,46	5,00	51,83	5,89	31,38
3,46	8,00	54,48	3,87	32,40
3,59	3,20	50,90	6,23	31,50
3,59	6,70	54,09	3,31	33,00
3,66	5,00	53,99	5,74	33,30
3,93	3,20	52,17	3,76	34,30
3,93	6,70	53,72	2,11	35,50
4,05	5,00	53,70	1,63	36,47

OA, acido ossalico.

L'ANOVA condotta sui carboidrati strutturali residui dopo pretrattamento (xilani e glucani) e sulla lignina ha messo in evidenza che le due variabili indipendenti hanno significativamente influenzato le risposte di tali composti. Un coefficiente di determinazione di 0,95-0,99 in ragionevole accordo con l' R^2 aggiustato (0,92-0,98) mostra che gran parte della varianza nella risposta è stata spiegata dalle variabili indipendenti (Tabella 4).

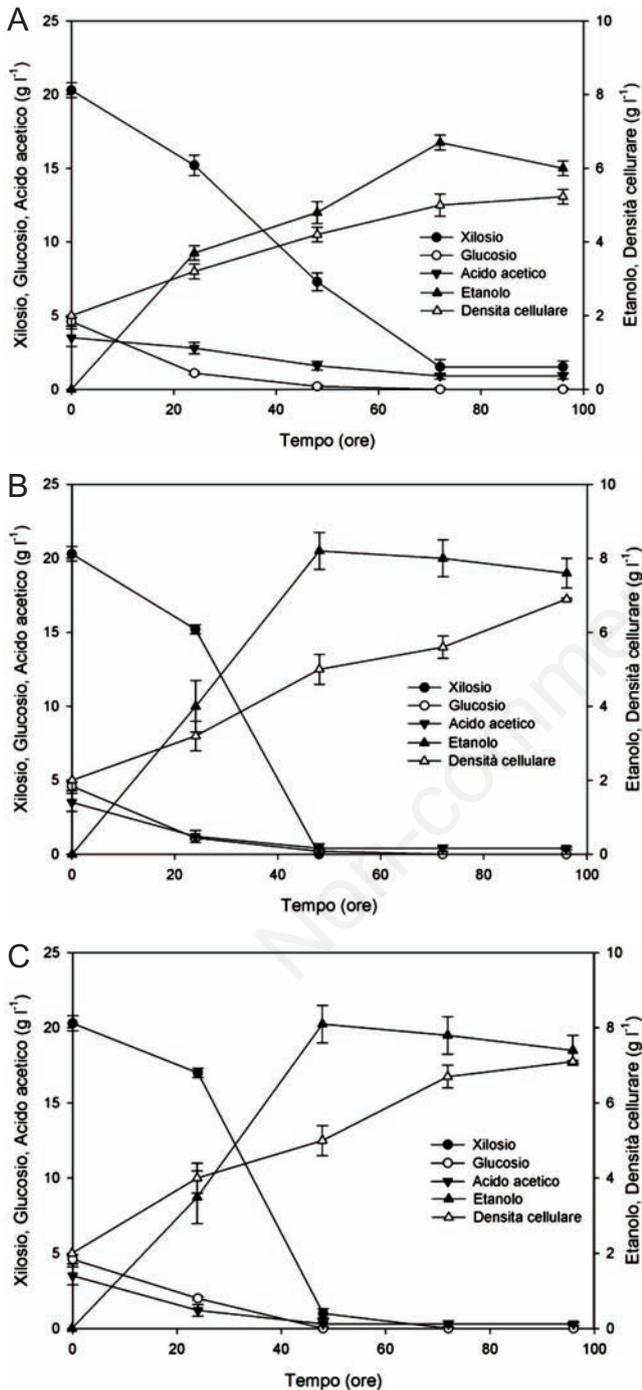


Figura 3. Fermentazione della frazione emicellulosica di canna comune a (A) pH 5,5; (B) pH 6,0 e (C) pH 6,5 (Modificato e tradotto da Scordia *et al.*, 2012).

La resa in monosaccaridi rilasciati nella frazione idrolizzata (g L^{-1}) dipende dal SF o dalla OA durante il pretrattamento. Lo xiliosio è stato lo zucchero maggiormente rilevato nell'idrolizzato, corrispondente all'80% degli zuccheri totali, nella media di tutte le condizioni studiate. Il glucosio è stato trovato in quantità significative ad alti valori di SF o OA, rappresentando, in media, il 18% degli zuccheri totali rilasciati. Quest'ultimo aspetto è in accordo con la recalcitranza dei glucani nelle condizioni di pretrattamento utilizzate. L'arabinosio è stato rilevato in quantità trascurabili (2%), mentre il galattosio, mannosio e ramnosio erano pressoché assenti. Tuttavia, gli xilani rimossi dalla frazione solida e collezionati nella frazione liquida come xiliosio (sia in forma di monomeri che oligomeri) non corrisponde completamente alla quantità rilasciata dalla materia prima. Queste osservazioni sono state comunemente riscontrate in altri studi sul pretrattamento di altri substrati dal momento che alte temperature e lunghi tempi di reazione, durante il pretrattamento, inducono alla degradazione degli zuccheri C6 a HMF e di quelli C5 a furfurale (Palmqvist *et al.*, 2000). La concentrazione di xiliosio (g L^{-1}) nell'idrolizzato emicellulosico cresce fino a valori medi di SF e OA (Figura 1); ad alte severità di trattamento, l'acido acetico ed i composti inibitori crescono linearmente all'aumentare di SF o della OA (Figura 2A, 2B, 2C).

SF è il fattore dominante nel rilascio di zuccheri, seguito dalla OA. Quando SF viene analizzato separatamente, la temperatura ha un effetto significativamente maggiore rispetto al tempo, che si riflette nel SF in cui la temperatura viene elevata ad un valore esponenziale (Scordia *et al.*, 2012).

L'ANOVA condotta sul rilascio di monomeri e composti inibitori nella frazione emicellulosica è mostrata in Tabella 5. Le due variabili indipendenti hanno significativamente influenzato le risposte di tali composti con un coefficiente di determinazione di 0,78-0,97 in ragionevole accordo con l' R^2 aggiustato (0,68-0,95).

Fermentazione della frazione emicellulosica di canna comune

L'idrolizzato emicellulosico prattato a SF 2,87 e 5,0% OA è stato utilizzato come substrato per la fermentazione ad opera di *S. stipitis* CBS6054. Gli zuccheri collezionati erano composti da xiliosio (78%),

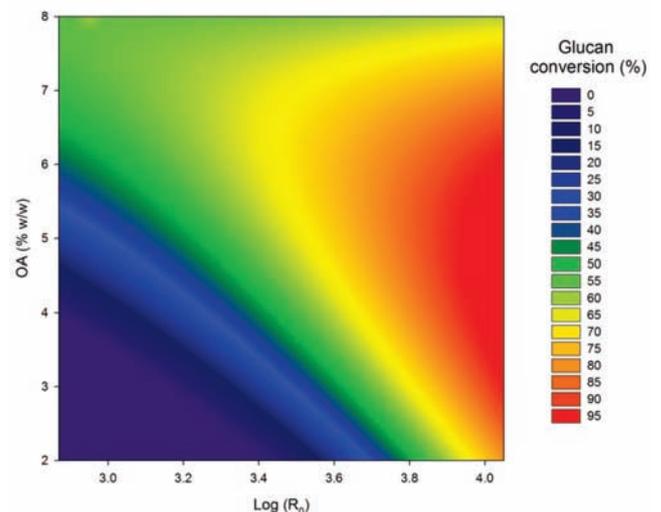


Figura 4. Risposta della conversioni di glucani in funzione del Severity Factor [$\text{Log}(R_0)$] rispetto alla concentrazione di acido ossalico (OA) durante il pretrattamento di canna comune (*Arundo donax* L.) (Modificato da Scordia *et al.*, 2013a).

glucosio (15%) e arabinosio (7%), sul totale degli zuccheri rilasciati. La concentrazione di zuccheri corrisponde a 26,0 g L⁻¹, 5,0 g L⁻¹ e 2,4 g L⁻¹, rispettivamente per xilosio, glucosio e arabinosio (Tabella 6). Gli zuccheri nella forma di monomeri, collezionati nell'idrolizzato sono stati pari al 91% (xilosio), 83% (glucosio) e 94% (arabinosio), rispettivamente. L'acido acetico rappresenta il 44,3%, il furfurale e l'HMF rispettivamente il 5,6 e 5,7% dei composti inibitori rilasciati nell'idrolizzato. La concentrazione corrisponde a 4,80 g L⁻¹ per l'acido acetico, 0,61 e 0,62 g L⁻¹ per il furfurale e l'HMF, rispettivamente (Tabella 6). Prima dell'inoculo dei lieviti, il pH della frazione emicellulosica è stato aumentato a 5,0 con Ca(OH)₂ e successivamente regolata ad un pH finale di 5,5, 6,0 e 6,5 con NaOH. Dopo l'aggiunta di Ca(OH)₂ è stata osservata una riduzione della concentrazione degli zuccheri e dell'acido acetico. Lo xilosio ed il glucosio sono diminuiti del 22% e dell'8% rispettivamente, mentre l'acido acetico è diminuito del 27%. Non è stato riscontrato nessun effetto sul furfurale o sull'HMF.

A pH 5,0 l'acido acetico si trova ad essere nella forma dissociata; questo permette la diffusione all'interno del citoplasma cellulare dei microrganismi utilizzati dove decresce il pH intracellulare sotto il range fisiologico, risultando in una lunga fase stazionaria, inibizione della crescita e del consumo di xilosio e successivamente alla morte cellulare. L'incremento del pH da 5,0 a 5,5, 6,0 e 6,5 rispettivamente, ha significativamente migliorato le performance di fermentazione. A pH 5,5 la concentrazione di etanolo ha raggiunto 6,70 g L⁻¹ dopo 72 ore di fermentazione con una resa di 0,27 (g_e/g_z). Circa il 94% degli zuccheri totali (glucosio e xilosio) ed il 74% di acido acetico sono stati consumati (Figura 3A). L'incremento del pH a 6,0 e 6,5 ha migliorato significativamente la resa in etanolo. La concentrazione si è attestata a 8,20 e 8,10 g L⁻¹ dopo 48 ore di fermentazione, rispettivamente (Figura 3B e 3C) con una produttività di 0,33 (g_e/g_z), corrispondente al 65% della resa massima teorica. Quasi il 100% degli zuccheri e dell'acido acetico sono stati consumati. La produzione di xilitolo non ha mostrato differenze significative tra i diversi pH utilizzati (pH 5,5, 6,0 e 6,5), attestandosi a 0,40 g L⁻¹, come riportato da Scordia *et al.*, 2012.

Idrolisi enzimatica

La conversione della cellulosa a glucosio è aumentata al crescere di SF e della OA. La Figura 4 mostra l'andamento dell'idrolisi di glucani a glucosio di SF rispetto all'OA dopo 96 ore di incubazione a 200 giri al minuto e 50°C. La percentuale di cellulosa convertita in glucosio è passata dal 5%, utilizzando 2,93 SF e 3,21% OA, al 95% utilizzando 4,05 SF e 5,0% OA. Il minor contenuto in xilani nella frazione solida pretrattata ai più alti valori di SF (~1-2%) rispetto ai più bassi (~14%), ha aumentato il tasso di saccharificazione enzimatica, poiché è stato dimo-

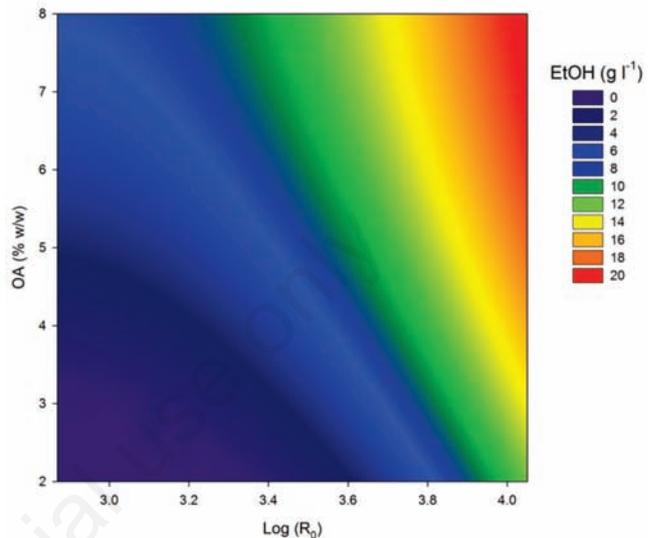


Figura 5. Risposta della produzione di etanolo in funzione del Severity Factor [Log (R₀)] rispetto alla concentrazione di acido ossalico (OA) durante il pretrattamento di canna comune (*Arundo donax* L.) (Modificato da Scordia *et al.*, 2013a).

Tabella 4. ANOVA condotta sui carboidrati strutturali residui dopo pretrattamento (xilani e glucani) e sulla lignina in funzione del Severity Factor e concentrazione di acido ossalico utilizzati durante il pretrattamento della canna comune (*Arundo donax* L.). Modificata da Scordia *et al.*, 2013a.

	DF	SS	Adj MS	F-value	P-value
Xilani (% p/p)					
Regressione	5	347,932	69,586	68,92	0,000
Residuo	11	11,106	1,010	-	-
Lack-of-Fit	9	10,388	1,154	3,22	0,260
Errore	2	0,718	0,359	-	-
Totale	16	359,038	-	-	-
R ²	0,97	R ² (adj)	0,95	-	-
Glucani (% p/p)					
Regressione	5	209,346	41,8692	40,38	0,000
Residuo	11	11,406	1,0369	-	-
Lack-of-Fit	9	11,394	1,2660	209,84	0,005
Errore	2	0,012	0,0060	-	-
Totale	16	220,752	-	-	-
R ²	0,95	R ² (adj)	0,92	-	-
Lignina (% p/p)					
Regressione	5	158,107	31,6214	177,15	0,000
Residuo	11	1,963	0,1785	-	-
Lack-of-Fit	9	1,879	0,2088	4,96	0,179
Errore	2	0,084	0,0421	-	-
Totale	16	160,070	-	-	-
R ²	0,99	R ² (adj)	0,98	-	-

DF, gradi di libertà; SS, somma degli scarti dalla media al quadrato; Adj MS, varianza; R²(adj), R² aggiustato.

Tabella 5. ANOVA condotta sul rilascio di monomeri e composti inibitori nell'idrolizzato emicellulosico in funzione del *Severity Factor* e concentrazione di acido ossalico utilizzati durante il pretrattamento della canna comune (*Arundo donax* L.). Modificata da Scordia *et al.*, 2012.

	DF	SS	Adj MS	F-value	P-value
Zuccheri totali (g L⁻¹)					
Regressione	5	733,458	146,692	25,31	0,000
Residuo	11	58,468	5,315	-	-
<i>Lack-of-Fit</i>	9	58,301	6,478	77,73	0,013
Errore	2	0,167	0,083	-	-
Totale	16	791,925	-	-	-
R ²	0,93	R ² (adj)	0,89	-	-
Acido acetico (g L⁻¹)					
Regressione	5	74,2005	14,840	10,50	0,001
Residuo	11	15,5450	1,4132	-	-
<i>Lack-of-Fit</i>	9	15,5154	1,7239	116,48	0,091
Errore	2	0,0296	0,0148	-	-
Totale	16	89,7455	-	-	-
R ²	0,83	R ² (adj)	0,75	-	-
Furfurolo (g L⁻¹)					
Regressione	5	105,789	21,1578	67,03	0,000
Residuo	11	3,472	0,3156	-	-
<i>Lack-of-Fit</i>	9	3,471	0,3858	528,49	0,127
Errore	2	0,0014	0,00073	-	-
Totale	16	109,261	-	-	-
R ²	0,97	R ² (adj)	0,95	-	-
HMF (g L⁻¹)					
Regressione	5	1,60813	0,321627	28,28	0,000
Residuo	11	0,12508	0,011371	-	-
<i>Lack-of-Fit</i>	9	0,11848	0,013165	3,99	0,216
Errore	2	0,00660	0,003299	-	-
Totale	16	1,73322	-	-	-
R ²	0,93	R ² (adj)	0,90	-	-
Fenoli totali (g L⁻¹)					
Regressione	5	9,9061	1,98122	7,76	0,002
Residuo	11	2,8074	0,25521	-	-
<i>Lack-of-Fit</i>	9	2,7127	0,30141	6,37	0,143
Errore	2	0,0946	0,04732	-	-
Totale	16	12,7134	-	-	-
R ²	0,78	R ² (adj)	0,68	-	-

DF, gradi di libertà; SS, somma degli scarti dalla media al quadrato; Adj MS, varianza; R²(adj), R² aggiustato; HMF, idrossimetilfurfurale.

strato che la percentuale di xilani residui sembra essere un buon indicatore della digeribilità della cellulosa (Jeoh *et al.*, 2007; Scordia *et al.*, 2013b). Il maggior effetto sulla conversione è stato dato da SF rispetto alla OA, perché quando la OA è stata mantenuta costante al 5,0% ed il tempo di reazione costante a 25 minuti, aumentando la temperatura da 150 a 190°C (corrispondente a un SF di 2,87 e 4,05, rispettivamente), la conversione di glucani è aumentata di circa il 65%. Viceversa, quando è stata fissata la temperatura ed il tempo (170°C e 25 min, rispettivamente, corrispondenti a 3,46 SF), aumentando la OA da 2,0 a 8,0%, è stato osservato un aumento del 45%.

Il tempo di reazione ha avuto l'effetto più debole sulla conversione dei glucani. La conversione è aumentata dal 35 al 75% quando il tempo di reazione è aumentato da 10 a 40 minuti, mentre la temperatura e la OA sono stati fissati (170°C, 5% OA, corrispondenti a 3,06 e 3,66 SF, rispettivamente). L'ANOVA condotta sulla conversione di glucani a glucosio dopo idrolisi enzimatica è mostrata in Tabella 7. Le due variabili indipendenti hanno significativamente influenzato la risposta di tale composto con un coefficiente di determinazione di 0,90 in ragionevole accordo con l'R² aggiustato (0,85).

Tabella 6. Concentrazione di monomeri e composti inibitori nella frazione emicellulosica di canna comune (Tradotto da Scordia *et al.*, 2012).

Idrolizzato	Concentrazione (g/L)
Xilosio	26,0±0,56
Glucosio	5,00±0,41
Arabinosio	2,40±0,34
Acido acetico	4,80±0,43
Furfurale	0,61±0,09
HMF	0,62±0,07

Valore medio di tre determinazioni±deviazione standard. HMF, idrossimetilfurfurale.

Tabella 7. ANOVA condotta sulla conversione di glucani a glucosio dopo idrolisi enzimatica in funzione del Severity Factor e concentrazione di acido ossalico utilizzati durante il pretrattamento della canna comune (*Arundo donax* L.). Modificata da Scordia *et al.*, 2013a.

Conversione di glucani (% p/p)	DF	SS	Adj MS	F-value	P-value
Regressione	5	4774,63	954,93	19,38	0,000
Residuo	11	542,06	49,28	-	-
Lack-of-Fit	9	541,75	60,19	395,93	0,003
Errore	2	0,30	0,15	-	-
Totale	16	5316,69	-	-	-
R ²	0,90	R ² (adj)	0,85	-	-

DF, gradi di libertà; SS, somma degli scarti dalla media al quadrato; Adj MS, varianza; R²(adj), R² aggiustato.

Tabella 8. ANOVA condotta sulla produzione di bioetanolo dopo simultanea saccarificazione e fermentazione in funzione del Severity Factor e concentrazione di acido ossalico utilizzati durante il pretrattamento della canna comune (*Arundo donax* L.). Modificata da Scordia *et al.*, 2013a.

Produzione di etanolo (g L ⁻¹)	DF	SS	Adj MS	F-value	P-value
Regressione	5	286,030	57,206	33,52	0,000
Residuo	11	18,774	1,707	-	-
Lack-of-Fit	9	18,634	2,070	29,58	0,033
Errore	2	0,140	0,070	-	-
Totale	16	304,805	-	-	-
R ²	0,93	R ² (adj)	0,91	-	-

DF, gradi di libertà; SS, somma degli scarti dalla media al quadrato; Adj MS, varianza; R²(adj), R² aggiustato.

Simultanea saccarificazione e fermentazione

La SSF è stata condotta con un carico in solido del 10% (p/v) inoculando una concentrazione di 0,5 mL g⁻¹ cellulosa di enzimi cellulasi/β-glucosidasi e 2 g L⁻¹ di *S. stipitis* CBS 6054. Nel processo di SSF il glucosio rilasciato dagli enzimi cellulasi e β-glucosidasi viene contemporaneamente fermentato ad etanolo dai lieviti. Dopo 72 ore di incubazione a 150 giri al minuto e 30°C la produzione di etanolo è aumentata all'aumentare della severità del trattamento. Come detto in precedenza, ciò ha ridotto la quantità di xilani nel substrato permettendo un maggior accesso degli enzimi nella saccarificazione della cellulosa. La Figura 5 mostra la produzione di etanolo dopo 72 ore di SSF al variare del SF rispetto alla OA. La produzione di etanolo è passata da 0,80 g L⁻¹ a 2,93 SF e 3,21% OA al valore massimo di 18,0 g L⁻¹ a 4,05 SF e 5,0% OA.

L'ANOVA condotta sulla produzione di etanolo dopo la SSF è mostrata in Tabella 8. Le due variabili indipendenti hanno significativamente influenzato la risposta di tale composto con un coefficiente di determinazione di 0,93 in ragionevole accordo con l'R² aggiustato (0,91).

La resa teorica di etanolo, calcolata sulla base della massima produzione di etanolo ottenibile considerando il contenuto di glucani nel solido pre-SSF, è mostrata in Tabella 9. La resa teorica in etanolo è stata ottenuta attraverso la seguente formula:

$$\frac{E}{\left(\frac{Gn}{\frac{162}{180}}\right) \times 0.511} \times 100 \quad (2)$$

dove E è la concentrazione di etanolo espressa come g L⁻¹, Gn è il contenuto di glucani del substrato dopo pretrattamento espresso come g glucani/g substrato e 0,511 è lo stechiometrico della resa in etanolo per i lieviti (Scordia *et al.*, 2013a).

Tabella 9. Resa teorica in etanolo al variare del Severity Factor [Log (R₀)] e della [OA] dopo pretrattamento della canna comune (*Arundo donax* L.) (Tradotto da Scordia *et al.*, 2013a).

Run	Log (R ₀)	OA (% w/w)	Resa teorica in etanolo (%)
1	2,93	3,21	14,34
2	3,59	3,21	38,87
3	2,93	6,79	32,61
4	3,59	6,79	54,67
5	3,24	3,21	23,74
6	3,93	3,21	49,18
7	3,24	6,79	32,08
8	3,93	6,79	63,95
9	2,87	5,00	18,56
10	4,05	5,00	75,28
11	3,46	2,00	18,83
12	3,46	8,00	43,90
13	3,06	5,00	30,59
14	3,66	5,00	36,25
15	3,46	5,00	33,66
16	3,46	5,00	34,01
17	3,46	5,00	33,14

OA, acido ossalico.

Analogamente a quanto segnalato per la produzione di etanolo, la resa massima teorica a SF 2,93 e 3,21% OA ha fatto registrare il valore inferiore (14,3%), mentre a 4,05 SF e 5,0% OA il valore massimo (75,3%).

Conclusioni

I risultati mostrano che il pretrattamento della canna comune con acido ossalico diluito fornisce un substrato idoneo alla SSF della cellulosa e alla fermentazione della frazione emicellulosica. Tuttavia, la condizione ottimale di pretrattamento per la fermentazione della frazione emicellulosica non corrisponde alla condizione ottimale per la SSF.

Rilevanti criticità per rendere la produzione di bioetanolo di seconda generazione utilizzabile su scala industriale includono ulteriori studi per il massimo recupero dei pentosi, un basso livello di composti inibitori e lo sviluppo di robusti ceppi di microrganismi aventi la capacità di produrre etanolo da tutti gli zuccheri disponibili nel materiale lignocellulosico in un unico step. La canna comune, essendo una coltura no-food con elevate rese in biomassa secca e polisaccaridi strutturali, può essere indicata come specie promettente per la produzione di bioetanolo di seconda generazione.

Bibliografia

- Cosentino SL, Copani V, D'Agosta GM, Sanzone E, Mantineo M, 2006. First results on evaluation of *Arundo donax* L. clones collected in Southern Italy. *Indust. Crops Prod.* 23:212-22.
- Davis MW, 1998. A rapid modified method for compositional carbohydrate analysis of lignocellulosics by high pH anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection (HPAEC/PAD). *J. Wood Chem. Technol.* 18:235-52.
- Jeoh T, Ishizawa CI, Davis MF, Himmel ME, Adney WS, Johnson DK, 2007. Cellulase digestibility of pretreated biomass is limited by cellulose accessibility. *Biotechnol. Bioener.* 98:112-22.
- Kabel, MA, Bos G, Zeevalking J, Voragen AGJ, Schols HA, 2007. Effect of pretreatment severity on xylan solubility and enzymatic breakdown of the remaining cellulose from wheat straw. *Bioresour. Technol.* 98:2034-42.
- Kim HY, Lee JW, Jeffries TW, Choi IG, 2011. Response surface optimization of oxalic acid pretreatment of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) for production of glucose and xylose monosaccharides. *Bioresour. Technol.* 102:1440-6.
- Kim SJ, Kim MY, Jeong SJ, Jang MS, Chung IM, 2012. Analysis of the biomass content of various *Miscanthus* genotypes for biofuel production in Korea. *Indust. Crops Prod.* 38:46-9.
- Lee JW, Jeffries TW, 2011. Efficiencies of acid catalysts in the hydrolysis of lignocellulosic biomass over a range of combined severity factors. *Bioresour. Technol.* 102:5884-90.
- Lee JW, Rodrigues RCLB, Jeffries TW, 2009. Simultaneous saccharification and ethanol fermentation of oxalic acid pretreated corncob assessed with response surface methodology. *Bioresour. Technol.* 100:6307-11.
- Overend RP, Chornet E, 1987. Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments. *Philos. Trans. R Soc. Lond. A* 321:523-36.
- Palmqvist E, Hahn-Hägerdal B, 2000. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition. *Bioresour. Technol.* 74:25-33.
- Pan X, Xie D, Gilkes N, Gregg DJ, Saddler JN, 2005. Strategies to enhance the enzymatic hydrolysis of pretreated softwood with high residual lignin content. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 121/124:1069-79.
- Scordia D, Cosentino SL, Jeffries TW, 2010. Second generation bioethanol production from *Saccharum spontaneum* L. ssp. *aegyptiacum* (Willd.) Hack. *Bioresour. Technol.* 101:5358-65.
- Scordia D, Cosentino SL, Lee JW, Jeffries TW, 2011. Dilute oxalic acid pretreatment for biorefining giant reed (*Arundo donax* L.). *Biomass Bioener.* 35:3018-24.
- Scordia D, Cosentino SL, Lee JW, Jeffries TW, 2012. Bioconversion of giant reed (*Arundo donax* L.) hemicellulose hydrolysate to ethanol by *Scheffersomyces stipitis* CBS6054. *Biomass Bioener.* 39:296-305.
- Scordia D, Cosentino SL, Jeffries TW, 2013a. Enzymatic hydrolysis, simultaneous saccharification and ethanol fermentation of oxalic acid pretreated giant reed (*Arundo donax* L.). *Indust. Crops Prod.* 49:392-99.
- Scordia D, Cosentino SL, Jeffries TW, 2013b. Effectiveness of dilute oxalic acid pretreatment of *Miscanthus giganteus* biomass for ethanol production. *Biomass Bioener.* [In press].
- Tilman D, Hill J, Lehman C, 2006. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science* 314:1598-600.
- Wyman CE, 1994. Ethanol from lignocellulosic biomass: technology, economics, and opportunities. *Bioresour. Technol.* 50:3-16.

Raccolta meccanica della canna comune (*Arundo donax* L.) a destinazione energetica, cantieri a confronto

Roberta Martelli, Marco Bentini

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Università di Bologna, Italia

Abstract

Diversi studi evidenziano il ruolo delle colture dedicate nel rifornimento di biomassa ligno-cellulosica soprattutto per la produzione di biocarburanti di seconda generazione e per la produzione di calore ed elettricità. La coltura dell'Arundo (*Arundo donax* L.) è particolarmente interessante per le aree centro-settentrionali dell'Italia in relazione alle sue elevate rese e alle basse esigenze relativamente alle caratteristiche del suolo e alla richiesta di elementi nutritivi. La raccolta meccanica di tale coltura presenta alcune criticità legate soprattutto alla dimensione e resistenza al taglio dei culmi che richiedono la progettazione e messa a punto di macchine dedicate. In questo studio sono state valutate le prestazioni e i costi di esercizio di un prototipo sviluppato in collaborazione con un'azienda costruttrice. Sono stati confrontati due sistemi di raccolta, il primo, a cantieri separati, che prevede due passaggi (taglio-sfibrazione e imballatura) il secondo, a cantieri riuniti, che effettua in un unico passaggio tutte le operazioni. I sistemi proposti consentono di imballare la biomassa raccolta riducendo i costi legati alla movimentazione e stoccaggio del prodotto. Considerando il numero di ettari che possono essere raccolti dal prototipo (123 ha per il sistema a un passaggio e 180 ha per il sistema con due passaggi) e il costo totale dell'operazione (11,6 e 10,5 € Mg⁻¹ rispettivamente per la raccolta con un solo passaggio e per quella in due fasi) il sistema rappresenta una soluzione efficace per aree non eccessivamente estese ed è quindi adatto per situazioni come quelle dell'Italia settentrionale caratterizzate da dimensioni medie aziendali di poco superiori a dieci ettari.

Corrispondente: Roberta Martelli, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Università di Bologna, viale Fanin 50, 40127 Bologna, Italia.

E-mail: roberta.martelli@unibo.it

Key words: giant reed (*Arundo donax*), colture erbacee da energia, raccolta meccanica, analisi dei costi.

Ringraziamenti: si ringrazia il Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (MiPAAF) che ha finanziato il progetto BIOSEA, Ottimizzazione delle filiere Bioenergetiche per una Sostenibilità Economica ed Ambientale.

©Copyright R. Martelli and M. Bentini, 2013

Licensee PAGEPress, Italy

Italian Journal of Agronomy 2013; 8(s1):e6

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License (by-nc 3.0) which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

Introduzione

Il Piano Energetico Nazionale prevede un incremento dell'impiego di biomassa a destinazione energetica, in particolare il contributo del settore agricolo è ritenuto fondamentale nella produzione di biomassa anche ottenuta da colture dedicate sia arboree che erbacee (JRC EC, 2011). Diversi studi evidenziano che importanti opportunità nell'offerta potenziale di biomassa sono riconducibili alle colture dedicate (Berndes *et al.*, 2003; Ericsson e Nilsson, 2006). Tali colture possono rivestire un ruolo primario nel rifornimento di biomassa ligno-cellulosica per la produzione di biocarburanti di seconda generazione e per lo sviluppo di calore ed elettricità (Jäger-Waldau *et al.*, 2011). I limiti alla diffusione delle colture dedicate sono principalmente riconducibili alla competizione per l'uso del suolo, tema oggetto di ampio dibattito in ambito politico e scientifico (Bringezu *et al.*, 2012). Ulteriori vincoli derivano dai costi di coltivazione che possono rendere meno conveniente l'impiego di biomassa ligno-cellulosica rispetto ai combustibili fossili tradizionali e dalle operazioni di impianto e raccolta che presentano criticità sia di carattere tecnico che economico (Cosentino *et al.*, 2008).

Lo sviluppo di una filiera sostenibile richiede che la coltivazione delle colture dedicate garantisca un adeguato livello di remunerazione per il produttore e che la biomassa prodotta abbia caratteristiche tecniche e un costo adeguato al suo utilizzo energetico. In particolare è necessario che le fasi di raccolta e condizionamento siano ottimizzate per migliorare le caratteristiche della biomassa in termini di energia specifica e ridurre i costi di stoccaggio e movimentazione.

La raccolta richiede che siano soddisfatte alcune condizioni, in particolare è necessario che la biomassa sia sempre disponibile in quantità adeguata all'alimentazione degli impianti quindi, lo sfasamento temporale fra la produzione e l'utilizzo impone lo stoccaggio di scorte adeguate possibilmente in prossimità degli impianti. Il prodotto deve inoltre presentare caratteristiche qualitative adeguate al processo di conversione.

Nel nord Italia le colture erbacee dedicate più interessanti sono il sorgo da fibra (*Sorghum bicolor* L.), fra le colture annuali, e la canna comune (*Arundo donax* L.) ed il panico (*Panicum virgatum* L.), fra le poliennali (Venturi e Venturi, 2003; Angelini *et al.*, 2005, 2009; Monti *et al.*, 2009; Nasso o Di Nasso *et al.*, 2011a, 2011b).

Queste ultime presentano minori costi economici per la semina o trapianto essendo ripartiti su tutta la durata dell'impianto (8-10 anni).

La meccanizzazione della raccolta delle colture dedicate erbacee può prevedere due linee di intervento: i) trinciatura del prodotto tal quale, con un'umidità che varia dal 50% al 70% in relazione al periodo di raccolta (estivo o invernale) e stoccaggio del prodotto sfuso; ii) taglio e imballatura della biomassa, in questo caso è previsto un parziale essiccamento in campo per raggiungere valori di umidità della biomassa preferibilmente inferiori al 40%.

Il prodotto trinciato può essere conservato tramite insilamento oppure previa essiccazione artificiale, operazione onerosa dal punto di vista energetico. La linea di raccolta con trinciatura, effettuata con falcia-trincia-caricatrici, determina un prodotto caratterizzato da una

bassa massa volumica ed elevata umidità che incide negativamente sui costi di trasporto.

La linea di raccolta con imballatura richiede interventi in più fasi, taglio della pianta, andanatura e imballatura. Le dimensioni delle piante, che, per Arundo e Sorgo, possono superare quattro metri di altezza con culmi di diametro superiore a 20 mm e caratterizzati da elevata resistenza al taglio (Yitao *et al.*, 2007) non consentono di utilizzare le classiche falciatrici da foraggio ma richiedono lo sviluppo di macchine specifiche. Le fasi di rivoltamento e andanatura possono provocare l'inquinamento del prodotto con particelle di terreno determinando inconvenienti nella conversione energetica della biomassa. Il prodotto imballato può essere stoccato e conservato presso i centri aziendali o direttamente in campo. Questa modalità di raccolta permette di aumentare la massa volumica del prodotto riducendo i costi di trasporto e stoccaggio.

Per l'Arundo, inoltre, la raccolta è resa difficoltosa dal suo sviluppo rizomatoso, la coltura infatti emette diversi culmi che, nel corso degli anni, tendono ad invadere le interfile. La pianta può essere raccolta anche in epoca invernale con parziale essiccamento delle piante in campo, è quindi possibile intervenire con macchine che lavorano in successione o con cantieri riuniti.

Sviluppo di prototipi per la raccolta

Per eseguire la raccolta dell'Arundo è stato sviluppato, in collaborazione con la ditta Nobili S.r.l. (Bologna, Italia) un primo prototipo (Figura 1) che esegue il taglio, la sfibratura e l'andanatura della coltura. La macchina derivava da un trinciastocchi cui erano state apportate modifiche dimensionali e inseriti organi specifici per il taglio-sfibratura dei culmi di Arundo (Bentini *et al.*, 2008). La macchina presentava un cofano mobile azionato da cilindri idraulici, uno spartitore-abbattitore fisso che consentiva di piegare la pianta prima del taglio e un sistema di convogliamento per allineare il prodotto in andana (Tabella 1).

Successivamente è stato sviluppato un secondo prototipo per ottenere una macchina con maggiori prestazioni e che ha dato origine a un modello commerciale denominato *Biotrituratore RM280BIO* (Figura 2 e Tabella 2).

In successione, i principali organi della macchina sono:

- *Abbattitore-spartitore*: localizzato nella parte anteriore della macchina e azionato da cilindri idraulici, consente il parziale piegamento e convogliamento al centro della macchina delle piante.

- *Rullo abbattitore*: inserito anteriormente al cofano mobile, costituito da un rullo metallico folle che consente di ridurre gli attriti tra macchina e coltura e favorisce l'ingresso del prodotto nella camera di trincia-sfibratura.

Tabella 1. Caratteristiche tecniche del primo prototipo.

Parametro	Unità di misura	Valore
Massa	kg	605
Larghezza operativa	m	1,6
Larghezza massima	m	1,9
Presa di potenza	rad s ⁻¹	100
Larghezza rotore	m	1,6
Diametro rotore	mm	152
Ø esterno rotore (compr. coltelli)	mm	580
Rotazione	rad s ⁻¹	190
Supporti coltelli	n.	16
Coltelli	n.	32
File coltelli	n.	4

Tabella 2. Caratteristiche tecniche del *Biotrituratore RM280BIO*.

Parametro	Unità di misura	Valore
Massa	kg	1400
Larghezza operativa	m	2,8
Regime pdp	rad s ⁻¹	105
Rotore trinciatura		
Larghezza	m	2,8
Diametro	mm	219
Ø esterno rotore (compr. coltelli)	mm	647
Reg. rotazione	rad s ⁻¹	0-205
Supporti coltelli	n.	32
Coltelli	n.	64
File coltelli	n.	8
Coclea		
Larghezza	m	2,8
Diametro	mm	400
Reg. rotazione	rad s ⁻¹	0-50



Figura 1. Macchina per il taglio, sfibratura e andanatura dell'Arundo, primo prototipo.

- *Trinciatura*: costituito da un rotore ad asse orizzontale con 32 supporti su cui sono incernierati gli utensili.
- *Coltelli*: coppie di utensili conformati a Y.
- *Controcoltelli*: applicati internamente alla camera di trinciatura e costituiti da due profilati, il primo con sezione a U e il secondo con sezione ad L che intensificano l'azione sfibrante.
- *Coclee convogliatrici*: due coclee situate nella zona posteriore della camera di trinciatura consentono il convogliamento al centro del prodotto trinciato favorendone l'andanatura. Una valvola regolatrice di flusso permette di impostare la velocità di rotazione (0-50 rad s⁻¹).
- *Rullo di appoggio*: la posizione della macchina rispetto al terreno è regolabile variando l'altezza di un rullo di appoggio posteriore.

I cantieri di raccolta

Per valutare le prestazioni del prototipo nella raccolta dell'Arundo sono stati confrontati due sistemi, il primo a cantieri separati che prevede due passaggi (taglio-sfibratura e imballatura) il secondo, a cantieri riuniti che effettua in un unico passaggio tutte le operazioni (Tabella 3).

In entrambi i sistemi di raccolta è stata utilizzata la seconda versione del prototipo e una imballatrice *Kuhn VB 2160* per balle cilindriche a camera variabile con legatura a rete.

Sono stati impiegati due trattori caratterizzati da diversa potenza nominale, *CNH T5060* 78 kW per la sola imballatura, *CNH T6090* per il taglio-sfibratura e per l'operazione a cantieri riuniti. Il trattore *CNH T6090* presentava un sistema di gestione della potenza EPMS (*Engine*

Power Management System) che consentiva di variare la potenza in funzione dello sforzo operativo in un range 121-147 kW, sufficiente a garantire l'energia adeguata alle operazioni da svolgere.

Sia nella raccolta a cantieri separati che a cantieri riuniti il *Biotrituratore* era collegato frontalmente all'attacco a tre punti del *CNH T6090* (Figura 3).

La raccolta è stata eseguita a fine febbraio quando la pianta era ancora in riposo vegetativo e presentava un contenuto di umidità pari al 41%, le rese medie ottenute sono coerenti con i valori riportati in bibliografia per le aree dell'Italia centro-settentrionale (Angelini *et al.*, 2005, 2009).

Le caratteristiche della coltura alla raccolta sono riepilogate in Tabella 4.

Aspetti tecnici

La capacità di lavoro dei sistemi di raccolta è stata valutata misurando i tempi durante le prove di campo ed applicando lo Standard ASAE EP496.3 (ASAE, 2007).

Sono stati ottenuti valori pari a 0,95 e 0,90 ha h⁻¹ rispettivamente per le operazioni di taglio-sfibratura e imballatura del cantiere separato mentre il cantiere riunito ha evidenziato una capacità operativa inferiore e pari a 0,62 ha h⁻¹ (Tabella 5). I fattori che hanno condizionato la capacità operativa del cantiere riunito sono riconducibili a una velocità leggermente inferiore rispetto al cantiere separato, in relazione al maggior impegno di potenza richiesto e a un minore rendimento di impiego condizionato sia dai tempi di legatura e scarico delle rotoballe che dai tempi di svolta più alti dovuti alla maggiore lunghezza del cantiere.

Le rotoballe, misurate e pesate in campo tramite dinamometro elet-

Tabella 3. Cantieri di raccolta.

Sistema di raccolta	Operazioni	Macchine
Singolo-passaggio	Taglio-sfibratura + imballatura	<i>Nobili RM280BIO + Kuhn VB2160 + CNH T6090</i>
Doppio-passaggio	Taglio-sfibratura Imballatura	<i>Nobili RM280BIO + CNH T6090</i> <i>Kuhn VB2160 + CNH T5060</i>



Figura 2. Macchina per il taglio, sfibratura e andanatura dell'Arundo, secondo prototipo *Biotrituratore RM280BIO*.

tronico, avevano un volume medio di 2,4 m³ (1,6x1,2 m), in Tabella 6 sono riportate le principali caratteristiche (massa, densità e umidità).

Aspetti economici

Il costo totale delle macchine impiegate è stato ottenuto dalla somma dei costi fissi e variabili ipotizzando un impiego da parte di un'azienda agricola o agro-meccanica che consenta il pieno utilizzo dei cantieri. Nell'analisi dei costi si è fatto riferimento agli standards ASAE D497.7, EP496.3 (ASAE, 2007, 2011). È stata ipotizzata una vita utile di 10 anni

per i trattori e un impiego medio annuo di 800 ore mentre per le macchine operatrici una vita utile di 5 anni con un impiego medio annuo di 200 ore. Il prezzo di acquisto è stato definito sulla base dei valori di listino scontati di una percentuale che tiene conto degli sconti medi praticati dai rivenditori in relazione alla tipologia di macchina. I costi orari dei cantieri sono stati determinati sommando quelli delle diverse macchine che costituiscono i cantieri di raccolta, nel computo non sono stati considerati i costi di movimentazione e di stoccaggio delle rotoballe (Tabella 7).

Il costo dell'operazione eseguita in un singolo passaggio è legger-

Tabella 4. Caratteristiche della coltura.

Parametro	Unità di misura	Valore
Età	anni	7
Densità	piante/m ²	15
Altezza media dei culmi	m	3,7
Umidità sul tal quale	%	41
Produzione (s.s.)	t/ha	20,1



Figura 3. Sistema di raccolta a cantiere riunito.

Tabella 5. Dati operativi per le due tipologie di raccolta.

	Cantiere riunito		Cantiere separato	
	Taglio-sfibratura + imballatura	Taglio-sfibratura	Taglio-sfibratura	Imballatura
Velocità, km h ⁻¹	4,00	4,50	4,50	5,00
Larghezza operativa, m	2,80	2,80	2,80	2,80
Rendimento d'impiego, η	0,55	0,75	0,75	0,64
Capacità operativa, ha h ⁻¹	0,62	0,95	0,95	0,90
Superficie annua dominabile, ha	123	189	189	179
Capacità operativa (s.t.q.), Mg h ⁻¹	21,1	32,2	32,2	28,4
Capacità operativa (s.s.), Mg h ⁻¹	12,6	19,0	19,0	18,0

Tabella 6. Caratteristiche delle rotoballe.

	Unità di misura	Singolo passaggio	Doppio passaggio
Massa	kg	380	407
Densità (s.t.q.)	kg m ⁻³	158	170
Densità (s.s.)	kg m ⁻³	105	100
Umidità	%	41	34

Tabella 7. Parametri economici.

		CNH T5060	CNH T6090	Nobili RM280BIO	Kuhn VB2160
Prezzo acquisto	€	44000	84000	7500	24000
Vita utile	h	8000	8000	1000	1000
Utilizzo annuo	h	800	800	200	200

Tabella 8. Costi di esercizio dei due sistemi di raccolta.

Sistema di raccolta	Operazioni	Cantiere	Costo (€ha ⁻¹)
Singolo-passaggio	Taglio + imballatura	<i>Nobili RM280BIO + Kuhn VB2160 + CNH T6090</i>	233,4
Doppio-passaggio	Taglio	<i>Nobili RM280BIO + CNH T6090</i>	65,4
	Imballatura	<i>Kuhn VB2160 + CNH T5060</i>	143,8
Totale			209,2



Figura 4. Fase di scarico della rotoimballatrice.

mente superiore ($24,2 \text{ € ha}^{-1}$) rispetto alla raccolta in due fasi, dove il 68% del costo complessivo è dovuto alla imballatura (Tabella 8). Il costo di raccolta riferito all'unità di biomassa secca è $10,5 \text{ € Mg}^{-1}$ per la raccolta in due fasi e $11,6 \text{ € Mg}^{-1}$ per quella in un unico passaggio.

Il minor costo del cantiere separato è ascrivibile alla maggiore capacità operativa delle macchine usate singolarmente rispetto a quella delle macchine combinate.

Conclusioni

La macchina ha dimostrato di eseguire in maniera adeguata la raccolta dell'Arundo sia nella modalità in due fasi che in un unico passaggio anche se la distribuzione irregolare della coltura in campo, combinata all'elevata resistenza al taglio dei culmi, limita a $4,5 \text{ km h}^{-1}$ la velocità del prototipo.

Il costo complessivo di raccolta è leggermente inferiore nel sistema a cantieri separati rispetto al sistema in un unico passaggio in quanto, in questo ultimo caso, il cantiere procede alla velocità della macchina più lenta, ossia è la rotoimballatrice che condiziona l'efficienza del cantiere. Nel cantiere di raccolta in due fasi, i maggiori costi dovuti al lavoro e ai consumi di carburante sono più che compensati dal beneficio derivante dall'incremento della capacità di lavoro.

L'imballatura si conferma, quindi, come l'operazione che maggiormente influenza i costi di raccolta incidendo per circa il 60-70% del costo totale. Tuttavia è necessario considerare che, nell'ottica di un bilancio complessivo che tenga conto anche degli aspetti logistici della biomassa, l'imballatura consente di ridurre i costi di trasporto e stoccaggio rispetto alla falcia-trinciatura della biomassa che richiede un successivo insilamento del prodotto sfuso (Sokhansanj *et al.*, 2009).

Il prototipo descritto può essere impiegato anche su altre colture a destinazione energetica quali il sorgo e il panico, e presenta una versatilità di impiego che, congiuntamente al prezzo di acquisto contenuto della macchina, consente di limitare i costi complessivi di gestione. In bibliografia non sono disponibili studi che analizzano il costo di raccolta dell'Arundo considerando misure dirette di campo, diversamente sono riportati studi basati su modelli di simulazione che effettuano un'analisi economica preliminare (Soldatos *et al.*, 2004). Confrontando il costo di raccolta dell'Arundo con quello di altre colture erbacee a destinazione energetica (panico e sorgo) il costo, riferito all'unità di

biomassa, che deriva dal presente studio, appare confrontabile rispetto a quello ottenuto da altri Autori (Cundiff e Marsh, 1996; Thorsell *et al.*, 2004).

Dal punto di vista tecnico ed economico il sistema di raccolta si dimostra quindi adeguato per le aree agricole tipiche dell'Italia centro-settentrionale caratterizzate da una superficie media aziendale di poco superiore a 10 ha (ISTAT, 2011).

Qualora la coltivazione dell'Arundo si diffonda su ampie superfici, si può ipotizzare la progettazione di una macchina semovente che invii direttamente il prodotto dalla testata falcia-sibratrice al sistema di imballatura contatti con il suolo. Questa soluzione consentirebbe di ridurre sia le perdite di biomassa che l'inquinamento del prodotto con particelle di terreno che macchine separate inevitabilmente determinano.

Bibliografia

- Angelini L, Ceccarini L, Bonari E, 2005. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. *Eur. J. Agron.* 22:375-89.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nasso N, Bonari E, 2009. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass Bioenerg.* 33:635-43.
- ASAE, 2007. Agricultural machinery management. Standard ASAE EP496.3. February 2007. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI, USA.
- ASAE, 2011. Agricultural Machinery Management Data. Standard ASAE D497.7. March 2011. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI, USA.
- Bentini M, Caliceti M, Zucchelli M, 2008. Development of a prototype implement for *Arundo donax* harvesting for combustion purpose. pp 523-6 in Proc. 16th Eur. Biomass Conf. Exhib. 'From research to industry and markets', Valencia, Spain.
- Berndes G, Hoogwijk M, van den Broek R, 2003. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass Bioenerg.* 25:1-28.
- Bringezu S, O'Brien M, Schütz H, 2012. Beyond biofuels: Assessing global land use for domestic consumption of biomass: a conceptual and empirical contribution to sustainable management of global resources. *Land Use Policy* 29:224-32.
- Cosentino SL, Copani V, Patanè C, Mantineo M, D'Agosta GM, 2008. Agronomic, energetic and environmental aspects of biomass energy crops suitable for Italian environments. *Ital. J. Agron.* 3:81-95.
- Cundiff JS, Marsh LS, 1996. Harvest and storage costs for bales of switchgrass in the southeastern United States. *Bioresour. Technol.* 56:95-101.
- Ericsson K, Nilsson LJ, 2006. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach. *Biomass Bioenerg.* 30:1-15.
- ISTAT, 2011. Istituto nazionale di statistica, VI Censimento generale dell'agricoltura. Available from: <http://www.istat.it/it/censimento-agricoltura/agricoltura-2010>
- Jäger-Waldau A, Szabó M, Monforti-Ferrario F, Bloem H, Huld T, Lalac Arantegui R, 2011. Renewable Energy Snapshots 2011. JRC Report. Available from: http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2011_renewable_energy_snapshots.pdf
- JRC EC, 2011. Technology map of the European strategic energy technology plan (SET-Plan) technology descriptions. Joint Research Centre – European Commission, Luxembourg. Available

- from: http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm?id=1410&obj_id=14620&dt_code=NWS&lang=en
- Monti A, Fazio S, Venturi G, 2009. The discrepancy between plot and field yields: Harvest and storage losses of switchgrass. *Biomass Bioenerg.* 33:841-7.
- Nasso N, Roncucci N, Triana F, Tozzini C, Bonari E, 2011a. Productivity of giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter) as energy crops: growth analysis. *Ital. J. Agron.* 6:141-7.
- Nasso N, Roncucci N, Triana F, Tozzini C, Bonari E, 2011b. Seasonal nutrient dynamics and biomass quality of giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter) as energy crops. *Ital. J. Agron.* 6:152-8.
- Sokhansanj S, Mani S, Turhollow A, Kumar A, Bransby D, Lynd L, Laser M, 2009. Large-scale production, harvest and logistics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) -current technology and envisioning a mature technology. *Biofuel. Bioprod. Bior.* 3:124-41.
- Soldatos P, Lychnaras V, Asimakis D, Christou M, 2004. BEE - Biomass Economic Evaluation: a model for the economic analysis of biomass cultivation. Proc. the 2nd World Conf. Technol. Exhib. on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, Italy.
- Thorsell S, Epplin FM, Huhnke RL, Taliaferro CM, 2004. Economics of a coordinated biorefinery feedstock harvest system: lignocellulosic biomass harvest cost. *Biomass Bioenerg.* 27:327-37.
- Venturi P, Venturi G, 2003. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass Bioenerg.* 25:235-55.
- Yitao L, Qingxi L, Boping T, Caixia S, Jing W, Aili M, 2007. Experimental research on the mechanical physical parameters of bottom stalk of the *Arundo donax* L. in harvesting period. *Trans. Chinese Soc. Agric. Eng.* 23:124-9.

Non-commercial use only

Esperienze nel nord-est Italia: la combustione del pellet di canna comune ed altre colture erbacee in impianti di piccola potenza

Denis Picco

CETA, Centro di Ecologia Teorica ed Applicata, Gorizia, Italia

Abstract

Le colture energetiche erbacee sono generalmente caratterizzate da un elevato contenuto di ceneri con un basso punto di fusione e possono contenere alti livelli di azoto e di zolfo, rispetto alle biomasse legnose. Una serie di prove di combustione sono state effettuate utilizzando una caldaia commerciale da 15 kW al fine di valutare la possibile applicazione del pellet prodotto a partire da differenti colture energetiche erbacee (sorgo da fibra, miscanto e canna comune). Il rendimento di combustione, la tendenza alla formazione di scorie, nonché la composizione dei fumi (O_2 , CO_2 , CO, NO_x , SO_2 , VOC ed emissioni di particolato) sono stati studiati. Il sorgo presenta un elevato contenuto di ceneri con un basso punto di fusione ed il suo utilizzo nelle caldaie tradizionali non è consigliabile a causa della elevata tendenza alla formazione di scorie fuse ed al livello di emissioni di polveri elevato. Il miscanto e la canna comune, nonostante l'elevato contenuto in ceneri e le non favorevoli proprietà basso-fondenti, sono idonei ad essere utilizzati in caldaie in grado di gestire combustibili con elevato contenuto di ceneri e dotate di dispositivi per il controllo-gestione dell'eventuale formazione di accumuli di ceneri, scorie ed incrostazioni. L'alto livello misurato di emissioni di NO_x e SO_2 è fortemente correlato alla concentrazione di N e S nel combustibile utilizzato.

Introduzione

Le colture energetiche di natura erbacea possono svolgere un importante ruolo ai fini del raggiungimento degli obiettivi dell'UE rispetto all'incremento sia della produzione di energia da fonte rinnovabile, sia alla sempre maggior diffusione della generazione energeti-

ca distribuita (Dahl e Obernberger, 2004). A livello nazionale, il Piano d'Azione Nazionale (PAN) per le energie rinnovabili imputa alle biomasse un ruolo fondamentale nella produzione di energia elettrica e/o termica (Dare *et al.*, 2001).

Tuttavia, la grande variabilità delle caratteristiche dei biocombustibili influenza significativamente sia l'efficienza sia l'impatto ambientale legato al loro utilizzo (González *et al.*, 2006). Infatti, la qualità della biomassa può ridurre drasticamente la produzione netta di energia, in relazione alla potenziale minor efficienza degli impianti di conversione (Jenkins *et al.*, 1998) ed al minor potere calorifico della biomassa stessa (Monti *et al.*, 2008). Inoltre, le ceneri e gli elementi inorganici (ad esempio alcali) prodotti durante la combustione possono causare una serie di gravi problemi alle centrali energetiche, per i fenomeni di *slagging*, corrosione e formazione di incrostazioni (Van Loo e Koppejan, 2008).

L'interesse per l'utilizzo di colture energetiche erbacee, in particolare quelli perenni, come materia prima per la produzione di biocombustibili è aumentata negli ultimi anni, stante i bassi costi di produzione, la disponibilità locale e come valida alternativa ai combustibili legnosi.

Uno dei fattori limitanti lo sviluppo della filiera *colture erbacee - energia* resta comunque la composizione chimica della biomassa erbacea che, rispetto a quella legnosa, è contraddistinta da un maggior contenuto in ceneri, azoto, cloro, zolfo, silicio e altri microelementi che incidono negativamente su diversi parametri qualitativi, quali il potere calorifico (ogni incremento dell'1% del contenuto in ceneri comporta un decremento del potere calorifico di circa 0,2 MJ/kg), la temperatura di fusione delle ceneri (i metalli alcalini ne abbassano il punto di fusione) e l'efficienza del processo di conversione energetica (causa formazione di scorie in caldaia, fenomeni di corrosione, intasamento degli scambiatori di calore, emissioni di particolato) (Obernberger *et al.*, 2006). Queste caratteristiche chimico fisiche rendono difficoltoso l'utilizzo del biocombustibile erbaceo nei tradizionali impianti di combustione, specificamente studiati e realizzati per l'alimentazione con biomasse legnose.

I microelementi presenti nel biocombustibile sono un fattore scatenante di alcune reazioni che possono avvenire in caldaia, come meccanismi di corrosione, di formazione di aerosol, nonché di scorie fuse ed incrostazioni. Cloro e zolfo sono i maggiori componenti dei depositi che si formano sulle pareti della camera di combustione e sulle superfici degli scambiatori di calore (effetto ancor più evidente nel caso di elevate presenze nel biocombustibile di K e Si) e giocano un ruolo fondamentale nelle reazioni di corrosione e di formazione di pericolose emissioni in atmosfera (SO_2 , HCl e diossine) (Wopienka *et al.*, 2009; Obernberger e Thek, 2002).

La caratterizzazione chimico fisica del biocombustibile è quindi il primo passo fondamentale per poterne definire le concrete possibilità di impiego energetico e per mettere in luce le presumibili problematiche di utilizzo in caldaia.

Pellets con le più importanti colture energetiche erbacee nel sud dell'Europa (Venturi e Venturi, 2003; Angelini *et al.*, 2009; Mantineo *et al.*, 2009) come il sorgo da fibra (*Sorghum bicolor* Moench), il miscanto (*Miscanthus sinensis* X *Giganteus* Greef & Deuter) e la canna comu-

Corrispondente: Denis Picco, CETA, Centro di Ecologia Teorica ed Applicata, via Licinio 44, 34170 Gorizia, Italia.
Tel. +39.0481.537159 - Fax: +39.0481.393882.
E-mail: denis.picco@ceta.ts.it

Key words: ceneri, colture energetiche, combustione, emissioni, pellet.

Ringraziamenti: si ringrazia il Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (MiPAAF) che ha finanziato il progetto BIOSEA, Ottimizzazione delle filiere Bioenergetiche per una Sostenibilità Economica ed Ambientale.

©Copyright D. Picco, 2013
Licensee PAGEPress, Italy
Italian Journal of Agronomy 2013; 8(s1):e7

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License (by-nc 3.0) which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

ne (*Arundo donax* L.) sono stati quindi prodotti e caratterizzati (contenuto di acqua e ceneri, p.c.i., C, O, H, N, S, Cl, comportamento alla fusione ceneri). Successivamente sono state realizzate una serie di prove di combustione per valutare l'eventuale applicazione di tali pellets come biocombustibili in una caldaia innovativa di piccola potenza. Durante le prove di combustione, il rendimento di combustione, la tendenza alla formazione di scorie, nonché la composizione dei fumi e le emissioni di particolato, sono stati studiati. Per confronto, sono stati studiati anche pellet di legno e di paglia.

Materiali e metodi

I campioni di biomassa dalle colture poliennali sono stati raccolti nel corso del periodo invernale da impianti di 5 anni di età. La biomassa di miscanto e canna comune, raccolta con un contenuto idrico rispettivamente del 22% e del 54%, è stata stoccata in cumulo al coperto, sino alle fasi antecedenti alla pellettizzazione. Il contenuto idrico della biomassa è stato ridotto a valori inferiori al 20%, dopo 100 giorni di ventilazione naturale.

I campioni di sorgo da fibra sono stati raccolti nel mese di settembre, con un contenuto idrico del 70%. La biomassa è stata essiccata mediante ventilazione forzata con aria calda, sino al raggiungimento di un valore di contenuto idrico del 9%. Successivamente la biomassa è stata immediatamente pellettizzata.

Le operazioni di pellettizzazione sono state condotte in un impianto pilota della capacità produttiva di 500 kg/h.

Per la caratterizzazione dei pellets sono stati considerati i seguenti parametri fisico chimici: il contenuto in ceneri, l'umidità, il potere calorifico, l'analisi dei macroelementi (CHN), l'analisi del contenuto in zolfo e cloro, la determinazione del comportamento delle ceneri alla fusione. I risultati sono stati quindi valutati considerando la tendenza alla formazione di scorie fuse, di emissioni nocive e di potenziali fenomeni corrosivi.

Le prove di combustione sono state eseguite per valutare le potenziali applicazioni del pellet di canna comune e di miscanto in caldaie commerciali, di piccola potenza. Nel corso dei test, della durata di 48 ore per ogni tipologia di pellet, condotti a piena potenza, sono stati esaminati vari parametri quali le performance di combustione, la tendenza a formare scorie, le emissioni gassose (O₂, CO₂, CO, NO_x, SO₂, VOC) e di particolato (polveri). I test di combustione sono stati condotti su di una caldaia innovativa, con potenza nominale di 15 kW, caratterizzata dalla camera di combustione con rivestimento refrattario, la regolazione della combustione mediante sonda lambda, il sistema di alimentazione in continuo della griglia orizzontale con spostamento delle ceneri lungo la griglia fino alla caduta nel box di raccolta (i movimenti della griglia possono essere regolati a intervalli predefiniti in funzione del tipo di

combustibile impiegato), il sistema di pulizia degli scambiatori di calore mediante turbolatori. La taratura dei parametri di controllo della caldaia è stata realizzata grazie ad un test preliminare; al fine di rimuovere efficacemente le ceneri dalla zona di combustione primaria ed evitarne la fusione, le principali modifiche apportate alle regolazioni standard (ottimizzate per l'utilizzo con pellet di legno) sono state:

- la riduzione dei tempi di intervallo tra due movimenti consecutivi della griglia;
- l'estensione della durata del movimento della griglia.

Solamente per i test con il sorgo da fibra la quota di alimentazione della caldaia è stata ridotta al 75%, in quanto a piena potenza il biocombustibile non aveva abbastanza spazio e tempo di residenza per essere combusto completamente, risultando in un accumulo di una elevata percentuale di residui incombusti nel box di raccolta delle ceneri.

Risultati

Caratterizzazione del pellet

Il contenuto in ceneri del sorgo da fibra è circa 20 volte maggiore rispetto ai valori comunemente riscontrabili per il pellet di legno, mentre sono comparabili con il pellet di paglia, materiale notoriamente ricco in ceneri (Tabella 1). La canna comune mostra elevati valori di contenuto in ceneri (4,9%), mentre il miscanto evidenzia valori inferiori (2,9%), pur sempre 10 volte più alti del pellet di legno. A questo proposito, l'utilizzo di una tecnologia di combustione con un adeguato sistema di rimozione delle ceneri è fortemente raccomandato in caso di utilizzazione di pellet di natura erbacea.

Il contenuto in acqua del pellet è variabile in funzione delle diverse condizioni ambientali; i valori comuni per il pellet di legno e di paglia sono compresi tra 7,5%-10%: i valori determinati per le colture in oggetto sono compresi nella parte bassa di questo intervallo.

Il potere calorifico è nell'intervallo tipico di biocombustibili per tutti i pellets erbacei identificati. Le differenze sono dovute principalmente alle variazioni del contenuto di ceneri, ossia più alto il contenuto di ceneri, minore è la quantità di materia combustibile e di conseguenza il valore di riscaldamento.

Il contenuto di sostanze volatili (SV) varia significativamente con il 82,3% per il miscanto ed il 75,3% per il sorgo da fibra: questo fattore può essere spiegato con le differenze per quanto riguarda il contenuto di ceneri, e quindi la determinazione del contenuto di materia combustibile nel biocombustibile.

I quantitativi di carbonio, ossigeno e idrogeno sono relativamente costanti in tutti i biocombustibili. Le concentrazioni di azoto possono invece variare in maniera considerevole in funzione della tipologia di biomassa considerata (Monti *et al.*, 2008; Samson e Mehdi, 1998;

Tabella 1. Proprietà dei biocombustibili (pellet) da sorgo da fibra, miscanto, canna comune, legno e paglia.

Biocombustibile	Parametro			
	Contenuto in ceneri (% s.s.)	Contenuto idrico (%)	p.c.i. (MJ/kg s.s.)	Sostanza volatile (% s.s.)
FS	6,3	7,9	17,5	75,3
MI	2,9	7,7	18,2	82,3
GR	4,9	7,1	17,9	75,8
WP	0,3	-	18,8	85,1
SP	5,7	-	17,3	74,8

p.c.i., potere calorifico inferiore; FS, fibra; MI, miscanto; GR, canna comune; WP, legno; SP, paglia.

Bakker e Elbersen, 2005), della porzione di pianta raccolta (stelo, foglie, etc.) (Monti *et al.*, 2008; Samson e Mehdi, 1998), e del periodo di raccolta della biomassa (Monti *et al.*, 2008; Samson e Mehdi, 1998; Bakker e Elbersen, 2005). Nel pellet di canna comune i valori di azoto sono molto elevati, circa otto volte rispetto al pellet di legno e circa due volte e mezzo quello di miscanto (Tabella 2). Anche i valori misurati per zolfo e cloro sono particolarmente elevati, soprattutto per la canna comune ed il sorgo da fibra. Tuttavia, la concentrazione del cloro nella pianta è uno degli elementi che presenta maggior variabilità in assoluto. Nel corso del processo di combustione sono diversi gli elementi presenti nelle ceneri che possono prendere parte in reazioni rilevanti come, ad esempio meccanismi di corrosione, la formazione di aerosol o di fusione delle ceneri e la formazione di depositi. Riguardo a ciò, le concentrazioni di cloro e zolfo sono molto elevate se comparate al combustibile legnoso. Questi elementi sono componenti importanti che vanno a formare depositi sulle pareti delle camere di combustione o sulle superfici degli scambiatori di calore e giocano un ruolo importante nelle reazioni di corrosione. Inoltre, zolfo e cloro possono formare emissioni nocive, come anidride solforosa (SO), acido cloridrico (HCl) o anche diossine. Alte concentrazioni di azoto, zolfo e cloro nel biocombustibile possono causare maggiori emissioni di NO_x, SO₂ e HCl, nonché la formazione di depositi che possono determinare gravi problemi di corrosione all'unità di combustione (Samson e Mehdi, 1998).

Le caratteristiche temperature di fusione dei pellet analizzati sono riportate in Tabella 3 e comparate con quelle tipiche del pellet di legno

e paglia. All'interno della grande varietà dei biocombustibili di origine agricola, le caratteristiche temperature di fusione delle ceneri differiscono alquanto, anche nell'ambito della stessa specie vegetale (Coulson *et al.*, 2004).

La temperatura di deformazione delle ceneri osservata per il miscanto, pari a 1,172°C, è più bassa se confrontata con i valori tipici per il pellet di legno, normalmente superiori a 1300°C, ma notevolmente più elevata se raffrontata con i valori riscontrati per le ceneri basso fondenti dei pellets di canna comune, paglia o mais.

Ad ogni modo, la formazione di scorie fuse in camera di combustione non è correlata solamente alla temperatura al suo interno; altri fattori, come l'agitazione del letto di combustione ed il tempo di residenza delle ceneri hanno una analoga incidenza.

Test di combustione

Le concentrazioni di O₂ e CO₂ sono state stabili durante l'intero sperimentazione.

La formazione di CO dipende dalle specifiche condizioni nella camera di combustione e dal letto di combustione. I movimenti della griglia mobile hanno impedito la formazione di scorie fuse che non avrebbero permesso il normale flusso di aria primaria attraverso il letto di combustione. Le emissioni di CO prodotte dalla combustione dei pellet di miscanto e di canna comune sono molto bassi, rispettivamente di 39 e 38 mg/MJ, mentre per il sorgo da fibra è di 61 mg/MJ

Tabella 2. Concentrazione di macroelementi (in % s.s.) e zolfo e cloro (in mg/kg s.s.) per fibra, miscanto, canna comune, legno e paglia.

Biocombustibile	Elemento				
	C	H (% s.s.)	N	S	Cl (mg/kg s.s.)
FS	46,90	5,81	1,08	1100	3390
MI	48,29	5,91	0,28	521	202
GR	47,25	5,83	0,74	1800	2632
WP	51,30	5,90	0,10	41	22
SP	47,20	5,70	0,66	1008	1720

C, carbonio; H, idrogeno; N, azoto; S, zolfo; Cl, cloro; FS, fibra; MI, miscanto; GR, canna comune; WP, legno; SP, paglia.

Tabella 3. Temperature di fusione delle ceneri caratteristiche per fibra, miscanto, canna comune, legno e paglia.

Biocombustibile	Temperature (°C)			
	SOT	SPT	HT	FT
FS	990	n.o.	1070	1080
MI	1172	n.o.	1256	1260
GR	893	1048	1126	1169
WP	1370	n.o.	1460	1470
SP	800	890	1060	1080

SOT, softening temperature; SPT, spherical temperature; HT, hemispherical temperature; FT, fluid temperature; FS, fibra; n.o., non osservato; MI, miscanto; GR, canna comune; WP, legno; SP, paglia.

Tabella 4. Emissioni gassose e di polveri dai test di combustione di fibra, miscanto, canna comune, legno e paglia.

Biocombustibile	Emissioni (mg/MJ)				
	CO	NO _x	SO ₂	VOC	Polveri
FS	61	156	70	2	130
MI	39	148	37	<1	8
GR	38	241	116	<1	61
WP	<25	117	<5	n.d.	<20
SP	186	246	44	n.d.	169

CO, monossido di carbonio; NO_x, ossidi di azoto; SO₂, anidride solforosa; VOC, composti organici volatili; FS, fibra; MI, miscanto; GR, canna comune; WP, legno; n.d., non disponibile; SP, paglia.

(Tabella 4). Le emissioni di CO dei combustibili studiati sono inferiori alle emissioni mediante rilevate durante la combustione della paglia ma leggermente superiori rispetto alle emissioni derivanti dalla combustione di pellet di legno.

Le emissioni di composti azotati da canna comune sono significativamente superiori a quelle rilevate per il miscanto e il sorgo da fibra, mentre le emissioni di composti dello zolfo per canna comune e sorgo da fibra sono significativamente superiori a quelle del miscanto. L'elevato livello misurato di NO_x e SO₂ è strettamente correlato alla concentrazione di N e S nel combustibile.

Le emissioni di polveri totali da sorgo da fibra sono notevolmente superiori a quelle rilevate con pellet di legno e due volte maggiori rispetto alla canna comune (Tabella 4). Le emissioni di polveri prodotte dalla combustione di miscanto hanno una media di 8 mg/MJ, e quindi paragonabili a quelle della combustione di pellet di legno standard, che sono solitamente nell'intervallo di 10-15 mg/MJ (Haslinger, 2007). Le emissioni di polveri sono costituite da componenti incombusti organici e composti inorganici, come sali di condensati e particelle di cenere.

L'efficienza della caldaia è principalmente influenzata dalla temperatura del gas di scarico, ma anche dalle perdite di calore per radiazione, nonché dalla presenza di materiale incombusto nei residui di combustione e nei gas di combustione. Per tutti i combustibili indagati, l'efficienza della caldaia è stata determinata tra l'88% e il 93%. Le maggiori perdite sono dovute alla quantità di calore nel gas di combustione (temperatura compresa tra 130°C e 150°C). Alte temperature dei fumi possono essere determinate dal funzionamento inefficiente dello scambiatore di calore a causa di depositi. Pertanto, un efficiente dispositivo di pulizia dello scambiatore di calore è essenziale.

Nonostante le regolazioni apportate al sistema di movimentazione delle ceneri, è stato osservato lo sviluppo di accumuli di cenere e di scorie fuse sulla griglia nel corso delle prove di combustione di canna comune e miscanto. Le ceneri di miscanto e canna comune raccolte nel box presentano un colore grigio scuro e sono composte da un miscuglio di particelle fini e materiale grossolano. L'analisi dimensionale, mediante vagliatura, ha mostrato che il 37% delle ceneri presenta particelle con dimensioni superiori a 5,6 mm (nel legno tale frazione è inferiore al 5%). Le particelle con dimensioni superiori a 5,6 mm consistono in scorie o materiale fuso ed sono facilmente removibili dal sistema automatico di pulizia delle ceneri.

Conclusioni

La caldaia utilizzata durante il test è da considerarsi lo state dell'arte dei sistemi di combustione di pellet di legno, grazie alla sonda lambda per il controllo delle emissioni ed il sistema a griglia mobile per la gestione delle ceneri e delle scorie fuse. La strategia di controllo della caldaia mediante sonda lambda è più flessibile rispetto ai sistemi di controllo della temperatura, in quanto può permettere di utilizzare differenti tipi di combustibile pur mantenendo un buon livello di emissioni.

Dalle risultanze dei test di combustione si delinea che i pellets di canna comune e miscanto, nonostante l'elevato contenuto in cenere e le non favorevoli proprietà basso-fondenti, sono idonei ad essere utilizzati in caldaie in grado di gestire combustibili con elevato contenuto di cenere e dotate di dispositivi per il controllo-gestione dell'eventuale formazione di accumuli di cenere, scorie ed incrostazioni. Questi pellets, se utilizzati in sistemi di combustione tradizionali, possono causare seri problemi operativi.

L'utilizzo dei pellet di sorgo da fibra nelle tradizionali caldaie non è invece consigliabile in relazione alla elevata tendenza a produrre scorie fuse e per le elevate emissioni in atmosfera di polveri.

Sono stati rilevati bassi livelli di emissioni di CO per tutti i biocom-

combustibili. Con il pellet di miscanto le emissioni di polveri sono comparabili a quelle normalmente ottenute con il pellet di legno; con la canna comune tali emissioni aumentano notevolmente. Per conseguire un abbassamento delle emissioni di polveri, principalmente composti minerali, è possibile agire solo sulla qualità del biocombustibile in ingresso e poco ancora sulla caldaia, alla luce dei bassi livelli di CO (combustione efficiente).

Le emissioni di NO_x e SO₂ sono strettamente correlate alle concentrazioni di N e S presenti all'interno del biocombustibile. Le emissioni di SO_x difficilmente possono essere ridotte mentre una certa riduzione delle emissioni di NO_x può essere raggiunta migliorando la tecnologia di combustione; ad ogni modo, per il miscanto le emissioni di NO_x rilevate sono simili al pellet di legno, e al di sotto della soglia di legge, mentre per la canna comune potrebbero rappresentare un problema.

Raccomandazioni

Tutti i pellets investigati evidenziano un elevato contenuto in cenere, dalle caratteristiche basso-fondenti, se raffrontate al pellet di legno. Di conseguenza questi biocombustibili dovrebbero essere utilizzati in caldaie sviluppate per la combustione di biomasse con elevati contenuti di cenere, al fine di evitare problemi operativi durante la combustione e con le emissioni in atmosfera. In particolare, è raccomandata la presenza di meccanismi automatici, opportunamente regolati, di rimozione e movimentazione delle ceneri e di pulizia degli scambiatori di calore.

In relazione ai depositi formati sugli scambiatori di calore ed in considerazione della composizione elementare del biocombustibile, in particolare per il pellet di canna comune e sorgo da fibra, sarebbero necessari test di lunga durata per monitorare eventuali effetti corrosivi (Coulson *et al.*, 2004; Haslinger, 2007).

Bibliografia

- Angelini LG, Ceccarini L, Nasso N, Bonari E, 2009. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass Bioener.* 33:635-43.
- Bakker RR, Elbersen HW, 2005. Managing ash content and quality in herbaceous biomass: an analysis from plant to product. pp 210-213 in Proc. 14th European Biomass Conf., Paris, France.
- Coulson M, Dahl J, Gansekoele E, Bridgwater AV, Obernberger I, van de Beld L, 2004. Ash characteristics of perennial energy crops and their influence on thermal processing. pp 359-362 in Proc. 2nd World Conf. on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, Italy.
- Dahl J, Obernberger I, 2004. Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (*Arundo donax*, *Cynara cardunculus*, *Miscanthus X Giganteus* and *Panicum virgatum*). pp 1265-1270 in Proc. 2nd World Conf. on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, Italy.
- Dare P, Gifford J, Hopper RJ, Clemens AH, Damiano LF, Gong D, Matheson TW, 2001. Combustion performance of biomass residue and purpose grown species. *Biomass Bioener.* 21:277-87.
- González JF, González-García CM, Ramiro A, Gañán J, Ayuso A, Turegano J, 2006. Use of energy crops for domestic heating with a mural boiler. *Fuel Proces. Technol.* 87:717-26.
- Haslinger W, 2007. Combustion technologies and emissions. State of the art small scale pellets combustion technologies. pp 79-88 in Proc. 43rd Corso di Cultura in Ecologia. Biomasse forestali ad uso energetico in ambiente alpino. Potenzialità e limiti. San Vito di

- Cadore, 4-7 giugno 2007.
- Jenkins BM, Baxter LL, Miles Jr. TR, Miles TR, 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Proces. Technol.* 54:17-46.
- Mantineo M, D'Agostani GM, Copani V, Patanè C, Cosentino SL, 2009. Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 114:204-13.
- Monti A, Di Virgilio N, Venturi G, 2008. Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass Bioener.* 32:216-23.
- Obernberger I, Brunner T, Bärnthaler G, 2006. Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. *Biomass and Bioenergy.* 30: 973-982.
- Obernberger I, Thek G, 2002. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. In: Swedish Bioenergy Association (ed), Proc. 1st Conf. of pellets, Stockholm, Sweden. Swedish Bioenergy Association, Stockholm, Sweden, pp 115-122.
- Samson R, Mehdi B, 1998. Strategies to reduce the ash content in perennial grasses. R.E.A.P. Canada. Research Reports. Available from: http://www.reap-canada.com/online_library/feedstock_biomass/24%20Strategies%20to.pdf
- Van Loo S, Koppejan J, 2008. *Biomass Combustion & Co-firing.* Earthscan, London, UK.
- Venturi P, Venturi G, 2003. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass Bioener.* 25:235-55.
- Wopienka E, Friedl G, Haslinger W, 2009. Reality check for agricultural biofuels. pp 15-19 in Proc. Worlds Sustainable Energy Days, Wels, Austria.

Non-commercial use only