

Italian Journal of Agronomy

Rivista di Agronomia

An International Journal of Agroecosystem Management

October-December 2010

Vol. 5, No. 4 Suppl.

Contents

<i>Integrazione dei temi ambientali nella politica agricola: il ruolo delle valutazioni economiche</i> Viaggi D.	3
<i>Asimmetrie informative e sicurezza alimentare nei diritti del consumatore e nella competitività dei sistemi produttivi</i> Marinelli N.	13
<i>Effetti dei cambiamenti ambientali sulla fauna selvatica e sull'entomofauna dei sistemi agricoli e forestali</i> Cravedi P., Molinari F., Mazzoni E.	23
<i>Insetti e cambiamento climatico: stato dell'arte e prospettive</i> Battisti A.	29
<i>Opzioni e strategie operative nella gestione delle malerbe per la mitigazione del rischio di contaminazione delle acque superficiali da ruscellamento e deriva</i> Ferrero A., Masin R., Milan M., Otto S., Vidotto F., Zanin G.	35
<i>Nuovi approcci per il miglioramento dell'efficienza d'uso dei nutrienti nelle piante: il caso dello zolfo</i> Sacchi G.A., Nocito F.F., Lancilli C.	57
<i>I cambiamenti climatici e la gestione sostenibile delle risorse nel sistema frutteto</i> Xiloyannis C., Montanaro G., Celano G., Dichio B.	67
<i>Microbiota autoctoni per il controllo dei microrganismi alteranti e patogeni negli alimenti: il ruolo della bioprotezione</i> Cocolin L., Dal Bello B., Alessandria V., Dolci P., Rantsiou K.	73
<i>Evoluzione degli ecosistemi naturali e agricoli in relazione ai cambiamenti climatici</i> Mennella V.G.G., Pacicco L., Grohmann D.	83
<i>Sequestro di CO₂ nei suoli agricoli: opportunità, sfide e rischi</i> Pisante M., Santilocchi R.	91
<i>Biosintesi e controllo delle micotossine negli alimenti</i> Reverberi M., Ricelli A., Fanelli C., Fabbri A.A.	97

Poste italiane S.p.a. - Spedizione in a.p. - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma 1, DCB Udine - Trimestrale



The Official Journal of the
Italian Society of Agronomy

FORUM

Aims and scope

The Italian Journal of Agronomy / Rivista di Agronomia (IJA / RA) is the official journal of the Società Italiana di Agronomia (Italian Society of Agronomy – S.I.A.) for the publication of original research papers reporting experimental and theoretical contributions to agronomy and crop science.

Typical subjects covered by the IJA / RA 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.

Submission of an article to the Italian Journal of Agronomy implies that the work described in the paper has not been previously published, or under consideration for publication elsewhere.

Types of contribution

1. Research papers. Research papers should report the results of original research.
2. Review Articles.
3. Notes on experimental techniques and apparatus.

Full-length papers and short communications are published. The articles should be original, unpublished and not being considered for publication elsewhere. Short communications should not exceed 5 manuscript pages.

CHIEF EDITORS

Carlo Giupponi

Center for Environmental Economics and Management, Dipartimento di Scienze Economiche
Università Ca' Foscari di Venezia, San Giobbe, 873 – 30121 Venezia, Italia
Tel.: +39 041 2349126 – E-mail: cgiupponi@unive.it

Michele Perniola

Dipartimento di Scienze dei Sistemi Colturali, Forestali e dell'Ambiente
Università degli Studi della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano, 10 – 85100 Potenza, Italia
Tel.: +39 0971 205381 – E-mail: perniola@unibas.it

Submission of manuscripts

Manuscripts, typed according to the Instructions for Authors, should be submitted in electronic format by electronic mail to ija.editor@gmail.com. Each paper will be reviewed by two independent members of the Editorial Board or by appropriate referees. The Chief Editors will inform the authors about the acceptance, rejection or necessity of revision of the article. After acceptance the authors should send to the Chief Editor (at ija.editor@gmail.com) the final, revised version of the paper in electronic format.

Subscriptions and back issues

The subscription prices for 2010 are 260,00 € (Institutions) and 200,00 € (Personal). Single issue: 70,00 €. Back issues are available in limited stocks upon request.

Orders for current subscriptions and back issues should be sent to Forum Società Editrice Universitaria Udinese srl, Via Palladio 8, 33100 Udine, Italy. Tel. +39 0432.26001, Fax +39 0432.296756. Payments should be made by Postal Account (number 16451338 payable to Forum Società Editrice Universitaria Udinese srl, Via Palladio 8, 33100 Udine, Italy) or by bank transfer (IBAN: IT 98 V 06340 12300 07404361962T, BIC: IBSPIT2U) payable to Forum Società Editrice Universitaria Udinese srl, via Palladio 8, 33100 Udine, Italy on Cassa di Risparmio del Friuli Venezia Giulia, Via del Monte, Udine, Italy).

General

Manuscripts for submission must be written in English (for the ordinary issues of the Italian Journal of Agronomy) or in Italian (for the Rivista di Agronomia supplement series). Authors whose native language is not English are strongly advised to have their manuscript checked by a language editing service, or by an English speaking colleague prior to submission.

Manuscripts and tables should be submitted as Microsoft Word files and figures as Microsoft Excel charts, or common graphical formats (uncompressed TIFF as a preferred format).

The complete text (abstracts, text, references, tables) should be saved as a single file. Do not use the wordprocessor's options to justify text or to hyphenate words.

The manuscripts should be double spaced typewritten with numbered lines and wide margins.

In case of multiple authors, one should be identified as Corresponding author, and provide a fax number and e-mail address when submitting the manuscript.

Style

The manuscript 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.
- 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. The Results and Discussion could be merged in a single section.
- Acknowledgements.
- References: references in the text should be in full for one or two authors (e.g.: Boniek, 1989; Benites and Ofori, 1993); in the case of multiple authors they should be cited as Verdi et al., 1992. The reference list should be arranged in alphabetical order following the examples given:
Cerrito T., Black A.M. 1990. Comparison of models for describing wheat yield response to potassium fertilizer. *Agron. J.*, 78:434-437.
Benites J.R., Ofori C.S. 1993. Crop production through conservation-effective tillage in the tropics. In: Lal R. (ed.): *Soil tillage for agricultural sustainability. Proceedings 12th Conference of ISTRO*, 8-12 July, Ibadan, Nigeria, 9-33.
Boniek Z.M. 1989. Water management effects on growth of sorghum. In: Smith A.F., Wesson G.A. (eds.): *Irrigation of Field Crops*, 22-34. Miller Publ., New York.
Russell E.W. 1973. *Soil conditions and plant growth*. 10th edition, Longmans, London.
- Figures: each figure should be labelled in pencil on the back upper right edge; avoid unnecessary 3D figures. Since figures will be printed on either 1 (8 cm) or 2 columns (17 cm), please adopt the proper font size and line width, as well as appropriate dimensions.
- Photographs: glossy, black and white prints of good contrast are required. Dimensions should be appropriate for reduction, as described for figures.
- Tables: each table should be typed on a separate page.
- 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).

Publication charges

A publication fee is requested for publishing on IJA/RA. Corresponding authors are asked to provide proof of the payment before publication, when sending back the corrected proofs to the Publisher. The publication fee includes one hundred off-prints which will be delivered to the corresponding authors by the Publisher.

Payment can be made by Postal Account (number 16451338 payable to Forum Società Editrice Universitaria Udinese srl, Via Palladio 8, 33100 Udine, Italy) or by bank transfer (IBAN: IT 98 V 06340 12300 07404361962T, BIC: IBSPIT2U) payable to Forum Società Editrice Universitaria Udinese srl, via Palladio 8, 33100 Udine, Italy on Cassa di Risparmio del Friuli Venezia Giulia, Via del Monte, Udine, Italy).

Publication charges for 2009 are listed below:

no. of pages	€
< 11	215.00 (+ 4% VAT)
11-13	300.00 (+ 4% VAT)
14-16	380.00 (+ 4% VAT)
17-19	430.00 (+ 4% VAT)

Publication charges for papers longer than 19 pages will be provided upon request.

Further information for Authors can be requested by contacting the Editors at ija.editor@gmail.com.



Italian Journal of Agronomy

Rivista di Agronomia

An International Journal of Agroecosystem Management

October-December 2010

Vol. 5, No. 4 Suppl.

Contents

<i>Integrazione dei temi ambientali nella politica agricola: il ruolo delle valutazioni economiche</i> Viaggi D.	3
<i>Asimmetrie informative e sicurezza alimentare nei diritti del consumatore e nella competitività dei sistemi produttivi</i> Marinelli N.	13
<i>Effetti dei cambiamenti ambientali sulla fauna selvatica e sull'entomofauna dei sistemi agricoli e forestali</i> Cravedi P., Molinari F., Mazzoni E.	23
<i>Insetti e cambiamento climatico: stato dell'arte e prospettive</i> Battisti A.	29
<i>Opzioni e strategie operative nella gestione delle malerbe per la mitigazione del rischio di contaminazione delle acque superficiali da ruscellamento e deriva</i> Ferrero A., Masin R., Milan M., Otto S., Vidotto F., Zanin G.	35
<i>Nuovi approcci per il miglioramento dell'efficienza d'uso dei nutrienti nelle piante: il caso dello zolfo</i> Sacchi G.A., Nocito F.F., Lancilli C.	57
<i>I cambiamenti climatici e la gestione sostenibile delle risorse nel sistema frutteto</i> Xiloyannis C., Montanaro G., Celano G., Dichio B.	67
<i>Microbiota autoctoni per il controllo dei microrganismi alteranti e patogeni negli alimenti: il ruolo della bioprotezione</i> Cocolin L., Dal Bello B., Alessandria V., Dolci P., Rantsiou K.	73
<i>Evoluzione degli ecosistemi naturali e agricoli in relazione ai cambiamenti climatici</i> Mennella V.G.G., Pacicco L., Grohmann D.	83
<i>Sequestro di CO₂ nei suoli agricoli: opportunità, sfide e rischi</i> Pisante M., Santilocchi R.	91
<i>Biosintesi e controllo delle micotossine negli alimenti</i> Reverberi M., Ricelli A., Fanelli C., Fabbri A.A.	97

Integrazione dei temi ambientali nella politica agricola: il ruolo delle valutazioni economiche

Davide Viaggi*

*Dipartimento di Economia e Ingegneria Agrarie, Università di Bologna
Viale Fanin 50, 40127 Bologna*

Società Italiana di Economia Agraria (SIDEA)

Riassunto

L'integrazione delle istanze ambientali nella politica agricola costituisce un tema al centro dell'attenzione negli ultimi decenni. Questo contributo ha l'obiettivo di discutere i problemi di ricerca (passati e futuri) in tale ambito ed il ruolo dell'analisi economica a supporto delle decisioni di integrazione delle tematiche ambientali nella politica pubblica in agricoltura, con particolare riferimento alla Politica Agricola Comune (PAC) dell'Unione Europea (EU). Il contributo esamina in primo luogo l'evoluzione del processo di integrazione delle istanze ambientali nella PAC. Di seguito viene discusso il ruolo dell'analisi economica a supporto delle politiche con riferimento specifico a: la valutazione della relazione agricoltura-impatti ed il valore economico dei relativi effetti; la valutazione dell'efficacia e dell'efficienza delle politiche; il disegno ottimale degli interventi; gli effetti sul mercato e sulla struttura delle aziende; il coordinamento e governance degli interventi. I contenuti di questi ambiti di studio sono discussi identificando le linee di ricerca prioritarie per fare fronte ai bisogni emergenti. Il lavoro conclude mettendo in evidenza la contemporanea esigenza di una analisi di maggiore dettaglio degli strumenti di politica, accompagnata dallo sviluppo di una visione innovativa circa il ruolo della politica agricola nel contesto mondiale.

Parole chiave: politica agricola, PAC, ambiente, valutazione economica.

Summary

THE INTEGRATION OF ENVIRONMENTAL ISSUES IN THE AGRICULTURAL POLICY: THE ROLE OF ECONOMIC EVALUATION

The integration of environmental issues into agricultural policies has attracted significant attention in recent years. The objective of this paper is to discuss the (past and future) research questions in this area and the role of economic analysis in supporting decisions regarding the integration of environmental issues into agricultural policies, with a special focus on the Common Agricultural Policy (CAP) of the European Union (EU). The paper first examines the evolution of the process integrating environmental concerns into the CAP. Then, the role of economic analysis is discussed with reference to selected major issues, including: the evaluation of the relationship between agriculture and environmental impacts, and the economic value of such effects; the evaluation of policy effectiveness and efficiency; optimal policy design; the effects on markets and farm structures; and the coordination and governance of policy measures. The contents of these study areas are discussed and the research priorities required to meet future needs are identified. The work concludes by highlighting the need to develop more detailed policy analysis studies while, at the same time, developing a wider and more innovative vision of the role of agricultural policy in the global context.

* Autore corrispondente: tel.: +39 051 2096114; fax: +39 051 2096105. Indirizzo e-mail: davide.viaggi@unibo.it

Introduzione e obiettivi

Il sistema agroalimentare e le politiche ad esso rivolte hanno visto una evoluzione parallela negli ultimi decenni. I principali elementi dei mutamenti del sistema agro-alimentare sono: a) la progressiva riduzione del peso dell'agricoltura sul Prodotto Interno Lordo (PIL) e sull'occupazione; b) il forte cambiamento strutturale delle aziende; c) il crescente ruolo dell'industria e della distribuzione agroalimentare; d) la progressiva internazionalizzazione e globalizzazione del sistema; e) l'attenzione crescente agli aspetti ambientali e sociali, ai temi della qualità e della salute.

Gli scenari attualmente identificabili mettono in evidenza ulteriori importanti cambiamenti nei prossimi anni, alla luce dei mutamenti socio-demografici mondiali, delle minacce del cambiamento climatico e della crisi energetica, nonché dei futuri cambiamenti tecnologici (SCAR, 2009).

All'interno di questo processo, anche il rapporto tra agricoltura, ambiente e salute è caratterizzato da scenari di crescente complessità. Da un lato, tale tema non è altro che il riflesso del generale processo di reazione al degrado ambientale e del progressivo aumento della consapevolezza circa la necessità di una gestione oculata delle risorse ambientali, emerso soprattutto nell'ultimo trentennio. Tale importanza generale è destinata a non diminuire se si considera la centralità assunta dai temi ambientali, con una particolare attenzione al cambiamento climatico, all'interno della strategia europea al 2020 in corso di definizione (Commission of the European Communities, 2009). Dall'altro lato, tale tema si declina in modo del tutto peculiare per il settore agricolo ed alimentare. Ciò in virtù sia dell'intrinseco legame con l'ambiente, sia della deliberata strategia, adottata dall'inizio degli anni Novanta e poi maturata con Agenda 2000 e le successive riforme, di identificare nella produzione di output ambientali uno strumento di valorizzazione del settore agricolo e dei relativi prodotti, attorno al concetto, pure tutt'ora ambiguo, di multifunzionalità. Per una discussione dettagliata dei riflessi del tema ambientale per le imprese del settore agricolo e agroalimentare italiano si vedano Viaggi (2003) e Marangon (2006).

Un nodo di tale complessità è costituito dal-

l'interazione tra le politiche agricole e alimentari, e le istanze ambientali. Questa interazione può essere scomposta in tre elementi principali: a) effetti ambientali delle politiche agricole ed alimentari, comunque finalizzate; b) armonizzazione e coordinamento tra politiche agricole e politiche ambientali; c) integrazione delle istanze ambientali nelle politiche agricole.

Questo contributo ha l'obiettivo di discutere il ruolo dell'analisi economica a supporto delle decisioni di politica agricola ed alimentare nell'ambito di tali problematiche, con particolare riferimento all'integrazione delle istanze ambientali nelle politiche agricole (punto c).

All'interno degli ambiti di politica agricola oggetto di integrazione, quello di maggiore rilevanza è costituito sicuramente dalla Politica Agricola Comune (PAC). La PAC costituisce oggi il principale capitolo di spesa dell'Unione Europea (UE), pari a circa il 40% del budget totale, anche se diminuito costantemente negli ultimi vent'anni (alla fine degli anni Ottanta era tra il 60 e il 70%). Tale importo corrisponde a circa 55 miliardi di euro all'anno (2 euro per famiglia a settimana) (Commissione europea, 2008). Per questo motivo, anche in questo lavoro si farà riferimento in particolare alla PAC.

Il contributo esamina prima criticamente l'evoluzione attuale e potenziale delle politiche. Di seguito viene discusso il ruolo dell'analisi economica a supporto delle politiche, distinguendo i principali campi di ricerca rinvenibili in tale ambito. Il lavoro conclude identificando le linee di ricerca prioritarie per fare fronte ai bisogni emergenti.

Integrazione dei temi ambientali nella PAC

I principali ambiti di integrazione dei temi ambientali nella PAC possono essere ricondotti ai due grandi temi tra loro correlati: a) l'uso di riferimenti derivanti dalle politiche ambientali nel disegno delle politiche agricole; b) l'inserimento di obiettivi e strumenti di politica ambientale "autonomi" all'interno della PAC.

Il primo tema presenta diverse dimensioni, che vanno dal livello europeo a quello locale, ed include ormai numerosi e sempre più frequenti esempi, quali le aree natura 2000, la direttiva nitrati, la direttiva quadro sull'acqua, la pianificazione locale. Il secondo ambito riguar-

da la vera e propria integrazione degli obiettivi ambientali nella PAC, e può essere distinto in attività riguardanti il primo pilastro ed attività riguardanti il secondo. Come è noto, il primo pilastro della PAC è sostanzialmente costituito dagli aiuti ai redditi, attualmente rappresentati, per la maggior parte, dal cosiddetto Pagamento Unico Aziendale (PUA), disaccoppiato da particolari scelte produttive. L'integrazione delle istanze ambientali nel primo pilastro è principalmente rappresentata dal meccanismo della condizionalità, che prevede l'accettazione di prescrizioni ambientali a carattere obbligatorio per i beneficiari del pagamento unico, alla cui ottemperanza è condizionato il pagamento degli aiuti.

Il secondo pilastro è costituito dagli aiuti allo sviluppo rurale ed è attualmente suddiviso in quattro assi principali: competitività (asse 1), ambiente (asse 2), qualità della vita (asse 3), e Leader (asse 4). L'adesione alle misure del secondo pilastro è volontaria. La componente di più diretto interesse rispetto all'integrazione dei temi ambientali è costituita dall'asse 2, che prevede pagamenti per la produzione di servizi ambientali positivi. Il tema ambientali ha assunto una crescente rilevanza anche per l'asse 1, in cui

hanno un peso sempre maggiore incentivi per innovazioni rispettose dell'ambiente (ad esempio impianti irrigui più efficienti, impianti per la produzione di energia da biomasse ecc.) (Swinbank, 2009a; 2009b).

I pagamenti agroambientali hanno una storia ormai quasi ventennali. Inizialmente introdotti con il reg. 2078/92, sono stati poi integrati nei piani di sviluppo rurale con Agenda 2000 (reg. 1257/99); il loro ruolo è stato successivamente confermato ed ampliato dal reg. 1698/2005 per il periodo di programmazione 2007-2013.

La condizionalità ambientale ha una storia più recente. Introdotta con la riforma Fishler (reg. 1782/2003) ed entrata in vigore in Italia con il pagamento unico nel 2005, i suoi contenuti sono stati rivisti ed aggiornati con la cosiddetta "revisione dello stato di salute" (Health Check) realizzata nel 2008. A seguito dell'Health Check, la PAC ha reindirizzato i suoi obiettivi relativi alla preservazione dell'ambiente europeo, introducendo e/o rafforzando tre temi principali: a) la biodiversità e la preservazione e sviluppo di sistemi agricoli tradizionali; b) la gestione e l'uso dell'acqua; c) il cambiamento climatico.

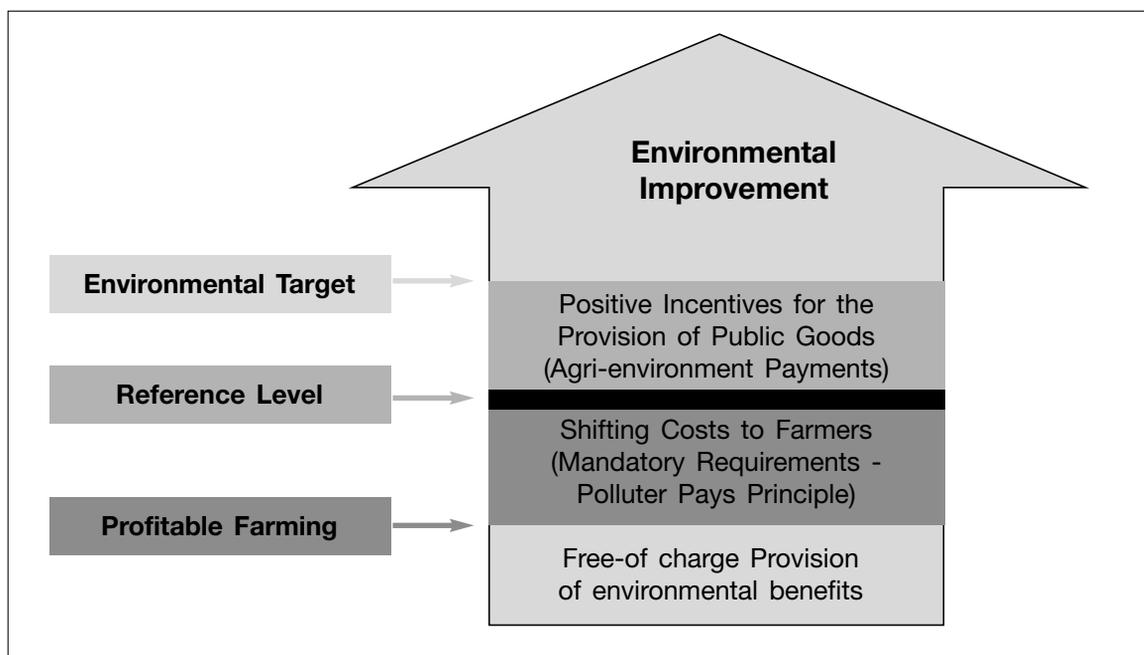


Figura 1. I diversi livelli di produzione di servizi ambientali.

Figure 1. The different levels of production of environmental services.

I requisiti ambientali nel primo e nel secondo pilastro sono collegati tra di loro (fig. 1). In particolare, i requisiti di condizionalità costituiscono il punto di riferimento minimo al quale la società si aspetta che gli agricoltori si adeguino senza alcuna compensazione.

Rispetto a tale livello di riferimento avviene la definizione delle prescrizioni ambientali proposte nel secondo pilastro e la determinazione dei relativi pagamenti, che risultano giustificati solo per la produzione di beni ambientali aggiuntivi rispetto a quanto fissato dalla condizionalità. Tuttavia, questi livelli di riferimento non sono statici; al contrario, i livelli di produzione di qualità ambientale richiesti al settore aumenteranno nel tempo, limitando la disponibilità a pagare sociale solo a beni ambientali sempre più intensamente “positivi”.

Che avvenga nell’ambito del primo o del secondo pilastro, la spinta alla (ulteriore) integrazione dei temi ambientali nella PAC è giustificata da diverse considerazioni: a) il peso economico della PAC ne determina un ruolo primario nel forgiare il sistema agricolo ed i suoi effetti sull’ambiente; b) la PAC storicamente ha a disposizione un budget cospicuo, che gli altri settori di intervento non hanno (es. ambiente); c) come già osservato, l’agricoltura europea e la PAC hanno intrapreso un cammino di valorizzazione verso la società europea basato sull’attenzione alla produzione di servizi ambientali e sociali (multifunzionalità, tipicità).

L’attuale periodo di programmazione della PAC è destinato a terminare nel 2013. In vista del periodo successivo è già iniziato il dibattito sul futuro della PAC e sul disegno futuro di tale politica. Centrale, in tale dibattito, si profila il ruolo dell’agricoltura come produttrice di beni e servizi pubblici, all’interno dei quali il ruolo dei beni ambientali continuerà ad avere una posizione prioritaria, e forse di crescente importanza, seppure affiancato da tematiche di carattere più prettamente sociale.

Tale ruolo si calerà tuttavia in un contesto ed in un quadro normativo notevolmente diverso da quello in cui è iniziata l’integrazione dei temi ambientali nella PAC. In particolare: a) esisteranno più forti vincoli di bilancio; b) le politiche ambientali si sono andate progressivamente rafforzando e continueranno in questa direzione; c) in alcuni casi, politiche solo in fase embrionale al tempo della precedente riforma sono state implementate (ad esempio la di-

rettiva acque), offrendo in futuro riferimenti più operativi per il disegno dei meccanismi di incentivazione della produzione di beni pubblici (zonizzazione, ecc.); d) la nuova enfasi sulla competitività e sul mercato, nonché i forti processi di cambiamento strutturale potrebbero portare ad un’agricoltura via via più dualistica, caratterizzata da un lato da aree/aziende orientate alla competitività e dall’altro da fenomeni di abbandono nelle aree più marginali, spesso caratterizzate dalla più alta valenza naturalistica. Una terza tipologia, ormai in fase di consolidamento, sembra riconoscibile in aziende/aree vitali orientate alla multifunzionalità e basate sia sulla valorizzazione commerciale dei beni ambientali prodotti, sia sull’uso di finanziamenti pubblici mirati al supporto della produzione di beni ambientali.

Il ruolo dell’analisi economica

Overview

La discussione del ruolo dell’analisi economica nell’ambito dell’integrazione delle istanze ambientali nella PAC viene sviluppata di seguito attorno ai seguenti temi: a) Valutazione economica degli effetti ambientali; b) Valutazione della relazione agricoltura-impatti; c) Valutazione dei costi delle politiche; d) Valutazione efficacia/efficienza delle politiche; e) Disegno ottimale delle politiche; f) Effetti delle politiche sul mercato e sulle strutture agricole; g) Coordinamento e governance. La ricerca sui punti a) e b) risponde alla domanda “Quanto sono rilevanti (in termini economici) gli effetti sull’ambiente delle misure incluse nella PAC?”. Le ricerche sui punti c) e d) affrontano la domanda “Le politiche funzionano bene?”. Il punto e) concerne la domanda “Come dovrebbero essere disegnate le politiche per funzionare meglio?”. Il punto f) riguarda la domanda “Quali sono gli effetti indiretti sul settore dell’integrazione delle tematiche ambientali nelle politiche agricole?”. Infine, il punto g) affronta la domanda “Come dovrebbero essere organizzate le istituzioni per gestire bene l’integrazione dei temi ambientali nella PAC?”.

Valutazione economica degli effetti ambientali

L’elemento di partenza nella logica dell’integrazione delle tematiche ambientali nella PAC

risiede nell'apprezzamento del valore dei servizi ambientali ai quali le politiche sono finalizzate. L'enfasi posta nel dibattito politico o nell'attenzione dell'opinione pubblica su specifiche priorità non ne garantisce la corrispondente rilevanza economica, e, anzi, ne sollecita piuttosto una misurazione oggettiva. L'economia ambientale ha sviluppato molteplici metodi in questa direzione, sui quali esiste una letteratura ormai consolidata. Molto grossolanamente si possono identificare metodi monetari e metodi non monetari. Ciascuno dei due gruppi è caratterizzato da diversi vantaggi e svantaggi (Vatn, 2009). I metodi monetari presentano il vantaggio di portare a valutazioni dei benefici nella stessa unità di misura dei costi delle politiche, ma lo svantaggio di essere di difficile e costosa applicazione e non sempre sufficientemente robusti da accogliere la fiducia degli stakeholder coinvolti nel processo di valutazione. I metodi non monetari presentano limiti in termini di interpretabilità degli indici utilizzati, ma hanno il vantaggio di basarsi su una linea di ragionamento analogo a quello dei processi decisionali reali e di fornire un potenziale supporto a tali processi.

Le applicazioni dirette al problema delle politiche agroambientali sono tuttora limitate e sono sostanzialmente assenti i casi di applicazione al problema della condizionalità. Alcune motivazioni sono ascrivibili alle politiche stesse. Le misure agroambientali prevedono pagamenti orientati alla copertura dei costi (e non alla remunerazione dei benefici prodotti), per cui la stima dei costi e benefici ambientali non trova applicazioni di politica immediate. Sul lato della condizionalità, il fatto che questa si basi su norme già stabilite ed applicate in modo uniforme, non differenziato in relazione al beneficio ambientale prodotto, ha posto poca attenzione al tema degli effettivi benefici ambientali e del disegno delle prescrizioni relative.

Le poche esperienze esistenti in Italia mettono in evidenza una entità economica degli effetti ambientali rilevante ma non sempre sufficiente a giustificare i costi degli interventi (es. Bazzani et al., 2002), sollecitando una maggiore attenzione a questa tematica.

Valutazione della relazione politica-agricoltura-impatti

Le valutazioni della relazione tra agricoltura (politica agraria) ed impatti è stato l'oggetto di

innumerevoli studi, spesso basati su modelli di simulazione. Le determinanti degli impatti sono in genere costituite da variabili di prezzo o politica. In tal senso la letteratura dimostra come sia di grande interesse sia l'effetto delle misure specificamente deputate alla produzione di servizi ambientali (condizionalità e misure agroambientali), sia l'effetto delle altre componenti delle politiche, sia del contesto di mercato. Anzi, queste ultime sono frequentemente le determinanti di maggiore importanza, a cui le misure specifiche portano solo dei correttivi. Questo è generalmente vero per i servizi pubblici legati alla riduzione di esternalità negative (es. inquinamento). Al contrario, i servizi pubblici legati alla produzione di beni ambientali sono più direttamente condizionati da specifiche politiche finalizzate alla loro produzione.

I limiti maggiori della letteratura esistente sono riscontrabili soprattutto su due piani. In primo luogo la considerazione della differenziazione tra agricoltori circa l'effetto delle prescrizioni ambientali sulle scelte aziendali e circa il livello di ottemperanza, che spesso portano a stime per eccesso degli effetti, avendo come riferimento comportamenti medi attesi. In secondo luogo, il fatto che i comportamenti simulati si fermino a quantificazioni delle pressioni piuttosto che degli impatti, i quali a volte possono essere molto diversi a seconda del contesto (es. vulnerabilità dell'area) (es. Gallerani et al., 2004). La letteratura più recente ha cercato soprattutto soluzioni a questa tipologie di problemi, attraverso modelli caratterizzati da una più attenta rappresentazione spaziale (Nelson, 2002; Bell and Irwin 2002; Holloway, et al. 2007; Raggi e Viaggi, 2009) e modelli bio-economici (Janssen and van Ittersum., 2007; Setti et al., 2008; Wam, 2010). Si tratta di un ambito caratterizzato da un forte contributo interdisciplinare, le cui potenzialità sono ancora solo parzialmente sviluppate.

Valutazione dei costi delle politiche

L'implementazione di una politica ambientale comporta diversi tipi di costo. In primo luogo è necessario distinguere la lettura dei costi in un'ottica "budgetaria", dai costi reali. I primi sono costituiti dalla spesa pubblica, che, in quanto tale, costituisce un mero trasferimento. I costi reali delle politiche sono costituiti dalla variazione di ricchezza causata: a) dalle variazioni di reddito dovute alle prescrizioni ambienta-

li; b) dai costi di transazione in senso lato (inclusi i costi amministrativi) necessari all'implementazione delle politiche; c) dalle distorsioni dovute ai trasferimenti (Whitby and Saunders, 1996; Vatn, 2001; Falconer e Saunders, 2002).

La categoria a) ha sollecitato un notevole interesse operativo, al quale fa riscontro un importante ma non altrettanto intenso interesse sul piano della ricerca, a partire dal reg. 1698/2005 che ha richiesto agli enti responsabili dei Piani di Sviluppo Rurale (PSR) di giustificare gli aiuti per le misure agroambientali mediante appositi calcoli legati al costo aziendale delle prescrizioni previste dalle misure. La seconda categoria (b) ha destato l'interesse soprattutto della ricerca. Tuttavia, la valutazione dei costi di transazione privati ha avuto anche risvolti operativi, in quanto tali costi sono stati inclusi nelle valutazioni finalizzate alla giustificazione degli aiuti trattate al punto precedente. Il concetto di costo di transazione è di introduzione relativamente recente e la letteratura in proposito si è pertanto scontrata con la difficoltà di definire prima e di stimare poi tali costi, nonché di trarne indicazioni per la politica. I risultati mostrano che i costi di transazione hanno una rilevanza notevole, potendo arrivare a decine di euro per ettaro (Bartolini et al., 2007; Gallerani et al., 2008), ma le stime attualmente disponibili sono probabilmente molto parziali¹. Un tema strettamente legato a questo è quello dei costi di transazione pubblici, che, pur trattati da più lungo tempo in letteratura, presentano altrettante difficoltà, non solo nella stima, ma, soprattutto, nella misurazione delle interazioni con i costi di transazione privati (Mettepenningen et al., 2008).

Valutazione dell'efficacia/efficienza delle politiche

La valutazione dell'efficacia delle politiche implica la misurazione del grado di raggiungimento degli obiettivi prefissati. La valutazione dell'efficienza comporta la formulazione di un rapporto tra gli impatti e le risorse dedicate ai programmi. Gli esercizi di valutazione dell'efficacia

e dell'efficienza delle politiche agro-ambientali fino ad oggi effettuati hanno incontrato la duplice difficoltà dovuta all'assenza di obiettivi definiti in termini quantitativi (sia per quanto riguarda la misura fisica, sia per quanto riguarda l'importanza relativa) e alla difficile valutazione degli impatti (Oreade Breche 2005; Finn et al., 2009).

Il primo problema è stato in parte risolto con il passaggio dalla programmazione 2000-2006 a quella 2007-2013, che ha richiesto una più stringente identificazione degli obiettivi delle misure e dei relativi target quantitativi. Il secondo rimane ancora ampiamente aperto. Dal 2000, tuttavia, la Commissione Europea ha predisposto una griglia di indicatori comuni di valutazione che è stata poi adattata in vista della programmazione 2007-2013 e che sta progressivamente fornendo una base dati per analisi più accurate.

Il lavoro svolto sul primo pilastro è stati finora molto inferiore, sia per la più recente introduzione dei vincoli ambientali legati alla condizionalità, sia per la apparente minore necessità di valutazione dovuta al fatto che si tratta di requisiti obbligatori. In realtà, anche in questo caso esiste una certa variabilità di ottemperanza e dei possibili meccanismi di autoselezione degli agricoltori che rendono il problema rilevante, ancora di più se si pensa che le superfici coinvolte (sostanzialmente tutti i beneficiari di aiuti UE) sono molto maggiori rispetto a quelle interessate dal secondo pilastro.

Per entrambi i pilastri, restano tutt'ora da affinare le modalità di analisi dei meccanismi di causa-effetto e la misura dell'addizionalità degli effetti delle politiche, in gran parte tutt'ora basati su metodi qualitativi o su forti assunzioni.

Disegno ottimale delle politiche

Il termine disegno delle politiche si riferisce alla progettazione delle regole di funzionamento delle *policy* o di specifiche misure sulla base di criteri di efficienza economica (Latachz Lohman, 2001). La letteratura, in questo caso, si presenta molto fertile, ma spesso apparentemente lontana dalla realtà operativa. In particolare, la ricerca, soprattutto mutuata dall'economia ambientale, ha dato vita a molti studi finalizzati a valutare l'efficienza di meccanismi di politica tenendo conto che: a) politiche di incentivazione possono portare all'autoselezione degli agricol-

¹ L'ultimo tema, quello della distorsione dovuto ai trasferimenti (punto c), esula in genere dal campo di indagine economico agrario, in quanto collegato ai trasferimenti tra settori economici, direttamente trattati nell'economia pubblica e in macroeconomia.

tori che partecipano a minori costi e che, presumibilmente, portano i minori effetti ambientali (*adverse selection*); b) esiste la possibilità che gli agricoltori non ottemperino completamente alle prescrizioni adottate (*moral hazard*). La difficoltà di gestire tali situazioni dipende dalla generale non osservabilità completa degli effetti ambientali e dei costi di ottemperanza, che impedisce di disegnare meccanismi di remunerazione precisa delle prestazioni ambientali da parte del decisore pubblico (asimmetria informativa).

Alcuni dei meccanismi candidati a risolvere questi problemi non trovano riscontro nella prassi attuale. Il caso forse più noto è quello delle aste di contratti agroambientali, che pur trattati nella letteratura almeno dagli anni Novanta e previsti anche nel reg. 1698/2005, non hanno mai trovato una applicazione rilevante nella pratica del nostro paese (Latacz-Lohmann and Van der Hamsvoort, 1998; Gallerani et al., 2008). Altri temi di potenziale rilievo, quali la zonizzazione hanno spesso trovato attenzione come metodi di allocazione territoriale degli interventi, non sempre sufficientemente coerenti con gli importi degli aiuti.

Effetti delle politiche su mercato/struttura/innovazione

Molti degli effetti dell'integrazione di tematiche ambientali nella PAC si ripercuotono sul funzionamento dei mercati e sulle strutture agricole, nonché sugli incentivi all'innovazione. Esempi sono costituiti dagli effetti dei pagamenti agro ambientali al biologico o alle razze in via di estinzione sui relativi mercati. Delle due componenti, gli effetti sui mercati sono probabilmente quelli più evidenti, mentre gli effetti sulle strutture appaiono meno distinguibili, dato che la situazione controfattuale è determinata da variabili di peso sicuramente maggiore, quali le opportunità di reddito alternativo, l'invecchiamento della popolazione, ecc. Un effetto più immediato, in quanto direttamente connesso alle prescrizioni ricomprese in ogni misura, è quello sulla tecnologia aziendale. Questa tende a strutturarsi nelle scelte strategiche di più lungo periodo, legandosi anche alle strategie commerciali a livello comprensoriale.

Coordinamento e governance

Il coordinamento delle politiche rappresenta un tema di grande rilevanza operativa e tutt'ora

poco trattato in letteratura. Esempi di notevole rilievo pratico sono il riferimento diretto alle normative ambientali nel disegnare le prescrizioni della condizionalità e il riferimento diretto a queste e ad altre normative per identificare numerose misure del secondo pilastro (ad esempio le compensazioni relative all'applicazione di misure Natura 2000 o della direttiva quadro sulle acque). Anche nei casi in cui l'interazione tra normative non è incorporata nel disegno delle politiche agricole, il moltiplicarsi degli atti normativi e degli interventi pone di fatto le aziende di fronte alla necessità di ottemperare contemporaneamente a diverse istanze, evidenziando di fatto un problema di coordinamento tra politiche.

Tre temi principali sembrano emergere: a) la valutazione della coerenza tra gli effetti di diverse politiche/interventi; b) lo studio del disegno integrato delle politiche; c) il coordinamento tra competenze (es. diversi assessorati o diversi enti) nel disegno ed implementazione degli interventi.

Molti studi in proposito hanno avuto un carattere descrittivo/qualitativo, mentre pochi lavori hanno affrontato in dettaglio il tema del disegno comune degli interventi, anche all'interno della stessa PAC. Ad esempio, Bartolini et al. (2008) discutono il problema del disegno contemporaneo delle prescrizioni previste dalla condizionalità e dalle misure agro ambientali, mettendo in evidenza la necessità di pensare queste misure in modo congiunto.

Discussione: i temi emergenti, le future linee di ricerca, le occasioni di confronto interdisciplinare

Nella prospettiva di una riduzione del buget, di un rafforzamento del ruolo dell'agricoltura come produttrice di beni pubblici e di revisione del ruolo del pagamento unico, la capacità di misurare i benefici ambientali e sociali derivabili dalle misure di politica agraria costituisce un nodo fondamentale tutto'ora irrisolto, almeno sul piano operativo. Un'area prioritaria di ricerca per il futuro appare quindi quella della valutazione economica degli effetti ambientali e sociali delle politiche. Se, da un lato, lo sviluppo di questo ambito dipenderà molto dalla volontà della politica di considerare direttamente

tale tipo di informazione, come previsto, ad esempio, dalla direttiva acque 60/2000, sicuramente un nodo fondamentale consisterà dalla capacità dei ricercatori di affrontare il problema della robustezza dei metodi di valutazione economica e della loro fattibilità operativa per valutazioni sistematiche.

Un secondo ambito prioritario riguarda lo sviluppo di strumenti per l'analisi ed il supporto del coordinamento e governance degli interventi. Questo aspetto rappresenta forse l'elemento di maggiore interesse, che connette più direttamente fattori di natura economica ed istituzionale. I tentativi presenti in letteratura (ad esempio nella direzione della Nuova Economia Istituzionale) sono solo ai primi passi e possono sicuramente trovare supporto nell'ambito delle scienze sociali e politiche, ma anche nell'ambito dei metodi economici del *mechanism design*, tutt'ora quasi inutilizzati nel settore delle politiche agricole.

La valutazione della relazione agricoltura-impatti è l'ambito per il quale si possono intravedere i maggiori spazi di collaborazione interdisciplinare con le altre discipline dell'area agraria, alimentare e ambientale. Tre aree di sviluppo si possono identificare per questo ambito: a) un affinamento dei modelli in termini di rappresentazione tipologica degli agricoltori, derivante da migliori e più mirate basi dati e dalla maggiore capacità di calcolo dei modelli, nonché da nuove tipologie di modelli (ad esempio agent-based, già presenti in letteratura ma con potenzialità di utilizzo ben più ampie); b) una migliore comprensione dei meccanismi di ottemperanza, attraverso uno sviluppo dei modelli in asimmetria informativa; c) una migliore integrazione tra modelli economici e fisico-biologici al fine di una rappresentazione più accurata della relazione politica-agricoltura-impatti. Anche se diversi esempi di integrazione tra modelli sono già stati proposti negli ultimi decenni, il punto c) sembra essere quello foriero di maggiori occasioni di collaborazione interdisciplinare, anche in virtù dello sviluppo atteso dalle applicazioni informatiche e computazionali, nonché dallo sviluppo di sempre più cospicue basi dati in tutti i settori disciplinari.

La valutazione dei costi delle politiche e la valutazione dell'efficacia/efficienza delle politiche rappresentano i due temi "istituzionalmente" più sviluppati, ma non per questo comple-

tamente maturi. La valutazione dei costi diretti dovuti all'implementazione delle politiche rappresenta il tema di interesse pratico forse più immediato, in particolare per la condizionalità ambientale i cui costi sono a tutt'oggi sostanzialmente sconosciuti. Il calcolo di tali costi richiede una più attenta formulazione anche teorica tutt'ora assente, in particolare per quanto riguarda la relazione con la significatività delle base informative (spesso ampiamente basate su giudizi di esperti o su pochissimi dati) e la rappresentazione dei meccanismi di politica, tenendo conto delle già citate asimmetrie informative e della diversificazione degli agricoltori in termini di comportamenti e di costi. L'uso oculato di metodi qualitativi (es. focus group) e l'integrazione tra questi e misure quantitative costituisce un tema di grande priorità nell'ambito della valutazione dell'efficacia/efficienza. I costi di transazione rappresentano un'area di interesse pratico e anche di potenziale sviluppo teorico, contestualmente ad un miglioramento della chiarezza delle relative definizioni.

Il disegno ottimale delle politiche rappresenta forse la tematica con il più ampio spazio di sviluppo sia per la sostanziale arretratezza di molti degli strumenti di policy attualmente utilizzati, sia per il know how derivante, anche attraverso confronti territoriali, dal bagaglio conoscitivo dell'economia agraria. Temi di rilievo riguardano i meccanismi di risoluzione delle asimmetrie informative sul piano dei costi di ottemperanza (es. aste e contratti auto-selettivi) e dell'ottemperanza (es. controlli), il legame in termini di incentivo tra le misure del primo e del secondo pilastro, così come tra i diversi assi del secondo pilastro. Si tratta di temi per i quali esiste una base teorica e pratica già molto sviluppata e per i quali l'economia agraria potrebbe trarre notevoli benefici da una maggiore attenzione alla letteratura economica generale e all'economia applicata.

Le esigenze di maggiore interesse sono tuttavia quelle che riguardano le relazioni tra i processi di integrazione dei temi ambientali nelle politiche agricole ed i contesti più ampi. Ad esempio, gli effetti delle politiche sui mercati e sulla struttura del settore sono tutt'ora poco studiati e richiederebbero una maggiore attenzione, soprattutto attraverso l'esplicita considerazione di fenomeni dinamici nella valutazione degli interventi. La mancata considerazione di

questi aspetti si riflette peraltro anche in una parziale valutazione degli effettivi costi e benefici.

Le vere sfide per il futuro, tuttavia, verranno dalla necessità di calare il tema ambientale e le relative politiche nel contesto delle grandi sfide del cambiamento globale: la rinnovata enfasi sulla competitività e l'innovazione tecnologica, l'evoluzione del peso e della struttura organizzativa dell'industria alimentare e no-food, la globalizzazione dell'economia e la progressiva maggiore transnazionalità delle imprese e del mercato dei fattori (terra, lavoro), i fenomeni del cambiamento climatico globale. Rispetto a questi temi, lo studio dell'integrazione dei temi ambientali nella PAC sembra mantenere una visione caratterizzata da un eccessivo localismo e dal legame con la tradizione, ignorando frequentemente i fenomeni più ampi e, a volte, più rilevanti.

Affrontare più direttamente questi temi richiederà sicuramente ben più che un affinamento degli strumenti. Sembra prioritario piuttosto prestare più attenzione alla capacità di concettualizzare adeguatamente la lettura di questi fenomeni e di mettersi in relazione con tutte le altre discipline che possono contribuire alla produzione di quadri di riferimento più efficaci per dare una lettura più rispondente (e più utile) dei fenomeni che verranno.

Discussione

Il tema dell'integrazione tra politiche sta assumendo un ruolo di grande rilievo nella letteratura e nel modo in cui l'intervento pubblico influenza i risultati economici e la struttura delle imprese agricole. Si tratta di un tema estremamente complesso a causa dell'ampiezza della normativa ambientale, la cui trattazione, anche da un punto di vista economico, richiede tipicamente una molteplicità di competenze ed un approccio interdisciplinare.

L'analisi economica in merito all'integrazione degli aspetti ambientali nella PAC riguarda diversi ed articolati temi, tra i quali si possono distinguere la valutazione economica degli effetti ambientali, la valutazione della relazione agricoltura-impatti, la valutazione dei costi delle politiche, la valutazione dell'efficacia/efficienza delle politiche, il disegno ottimale delle

politiche, gli effetti delle politiche sul mercato e sulle strutture agricole, il coordinamento e la governance.

Il tema dell'integrazione degli aspetti ambientali nella PAC, già importante nell'ultimo ventennio, sembra destinato ad una attenzione ancora maggiore in futuro, spinto, in particolare, dalla discussione sulla PAC post 2013 e degli scenari globali sempre più dinamici ed articolati.

L'analisi della letteratura oggetto di questo contributo mette in evidenza numerosi temi di rilievo per il futuro, ma, soprattutto, due macro-esigenze. Da un lato, il supporto concettuale ad un ripensamento dell'integrazione degli aspetti ambientali nella PAC, soprattutto in relazione al contesto più ampio (ruolo dell'agricoltura nella società, contesto economico globalizzato). Dall'altro un lavoro di ulteriore analisi di dettaglio nel supportare operativamente il disegno e l'applicazione dei relativi strumenti di policy. Su entrambi questi piani le collaborazioni interdisciplinari possono fornire un contributo di grande rilievo, con un'attenzione prevalente, nel primo caso, alle scienze sociali (economia, sociologia, scienze politiche) e nel secondo alle materie del settore agro-alimentare (agronomia, protezione, tecnologie alimentari, biotecnologie).

Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare Associazione Italiana Società Scientifiche Agrarie (AISSA) e il Consiglio di presidenza della Società Italiana di Economia Agraria (SIDEA) per averlo invitato a svolgere la relazione da cui questo lavoro è tratto. Ringrazia inoltre Fabio Bartolini per la lettura di una versione intermedia del lavoro. La responsabilità dei contenuti rimane comunque dell'autore.

Bibliografia

- Bartolini F., Gabaldo A., Viaggi D. 2007. Valutazione dei costi di transazione privati nelle misure agro-ambientali. Atti del convegno SIDEA 2007, Taormina, 8-9 novembre 2007.
- Bartolini F., Gallerani V., Raggi M., Viaggi D. 2008. Linking cross-compliance and agri-environmental schemes: a case study in Emilia Romagna. 109th Seminar of the European Association of Agricultural Economists (EAAE) "The Cap After the Fischer Reform: National Implementations, Impact Asses-

- sment and the Agenda for Future Reforms, Viterbo (Italy), 20/21 November 2008.
- Bazzani G.M., Viaggi D., Zanni G. 2002. Evaluation of the recreation uses of rural land. A case study. In Canavari M., Caggiati P., Easter K.W. (eds.): *Economic Studies on Food, Agriculture and the Environment*, 117-131. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (ISBN 0 306 47242 2).
- Bell KP., Irwin E.G. 2002. Spatially explicit micro-level modelling of land use change at the rural-urban interface. *Agricultural Economics*, 27:217-232.
- Commission of the European Communities, 2009. Commission Working Document. Consultation on the future "EU 2020" strategy, COM(2009) 647 final, Bruxelles.
- Commissione Europea 2008. The Common agricultural policy explained, Bruxelles.
- Falconer K., Saunders C. 2002. Transaction costs for SS-SIs and policy design. *Land Use Policy*, 19:157-166.
- Finn J.A., Bartolini F., Bourke D., Kurz I., Viaggi D. 2009. Ex post environmental evaluation of agri-environmental schemes using experts' judgement and multicriteria analysis. *Journal of Environmental Planning and Management*, 52:717-737 (ISSN: 0964-0568).
- Gallerani V., Bazzani G.M., Viaggi D., Bartolini F., Raggi M. 2004. The case of Italy. In: Berbel J., Gutierrez C. (ed.): *Sustainability of European Irrigated Agriculture under Water Framework Directive and Agenda 2000*, 141-164. EUR 21220, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities (ISBN 92-894-8005-X).
- Gallerani V., Raggi M., Viaggi D. 2008. Evaluating the potential contribution of contract auctions to AEP's efficiency. 107th EAAE Seminar "Modeling of Agricultural and Rural Development Policies". Sevilla, Spain, January 29th - February 1st 2008 (risorsa elettronica).
- Holloway G., Lacombe D., LeSage J.P. 2007. Spatial Econometric Issues for Bio-Economic and Land-Use Modelling. *Journal of Agricultural Economics*, 58:549-588.
- Janssen S., van Ittersum M.K. 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, 94:622-636.
- Latacz-Lohmann U. 2001. A policy decision-making framework for devising optimal implementation strategies for good agricultural and environmental policy practices. *OECD Report*, 33.
- Latacz-Lohmann U., Van der Hamvoort C.P.C.M. 1998. Auctions as a means of creating a market for public goods from agriculture. *Journal of Agricultural Economics*, 49:334-345.
- Marangon F. 2006. Imprese agroalimentari e produzione di beni pubblici. XLIII Convegno annuale SIDEA "Agricoltura e mercati in transizione", Assisi (PG) - 7/9 settembre 2006.
- Mettepenningen E., Beckmann V., Eggers J. 2008. Public transaction cost of agri-environmental schemes and its determinants – Analysing stakeholders' involvement and perceptions. 12th Congress of the European Association of Agricultural Economists – EAAE 2008.
- Nelson G.C. 2002. Introduction to the special issue on spatial analysis for agricultural economists. *Agricultural Economics*, 27:197-200.
- OREADE-BRECHE 2005. Evaluation des mesures agro-environnementales [online]. Available in <http://ec.europa.eu/agriculture/eval/reports/measure/fulltext.pdf>
- Raggi M., Viaggi D. 2009. Valutazione degli effetti di politiche di tariffazione e di scenari di mercato nel consorzio di bonifica della Romagna occidentale. In: Gallerani V., La Via G., Zanni G. (eds.): *Acqua e agricoltura in Italia: valutazioni di scenari e strumenti di supporto alle decisioni*, FrancoAngeli, Milano.
- Scheele M. 2008. Common Agricultural Policy: landscapes goods and environmental services for rural areas. Presentazione al XII Congress of the European Association of Agricultural Economists – Brussels Session Brussels, Health check and future perspectives of the CAP: Challenges for agriculture – A day of scientific dialogue, 28 August 2008.
- Setti M., Bontempi S., Broekman A., Palladino G. 2008. Politiche ambientali per la gestione sostenibile della risorsa acqua in agricoltura. In: Casini L., Gallerani V., Viaggi D. (eds.): *Acqua, agricoltura e ambiente*, 105-120. FrancoAngeli, Milano.
- Standing Committee in Agricultural Research (SCAR) 2009. New challenges for agricultural research: climate change, food security, rural development, agricultural knowledge systems, Bruxelles.
- Swinbank A. 2009a. EU Policies on Bioenergy and their Potential Clash with the WTO. *Journal of Agricultural Economics*, 60:485-503.
- Swinbank A. 2009b. EU Support for Biofuels and Bioenergy, Environmental Sustainability Criteria, and Trade Policy. CTSD Programme on Agricultural Trade and Sustainable Development. International Centre for Trade and Sustainable Development, Geneva, Switzerland, 54.
- Vatn A. 2009. An institutional analysis of methods for environmental appraisal. *Ecological Economics*, 68:2207-2215.
- Viaggi D. 2003. Economia dei contratti e nuove tipologie di impresa in un'agricoltura multifunzionale. In: AA.VV.: *Nuove tipologie di impresa nell'agricoltura italiana*. Atti del XXXIX Convegno di Studi SIDEA, Firenze, 12-14 settembre 2002, 83-122.
- Wam H.K. 2010. Economists, time to team up with the ecologists! *Ecological Economics*, 69:675-679.
- Whitby M., Saunders C. 1996. Estimating the supply of conservation goods in Britain: A comparison of the financial efficiency of two policy instruments. *Land Economics*, 72:313-325.

Asimmetrie informative e sicurezza alimentare nei diritti del consumatore e nella competitività dei sistemi produttivi

Nicola Marinelli*

DEISTAF – Dipartimento di Economia, Ingegneria, Scienze e Tecnologie Agrarie e Forestali,
Università degli Studi di Firenze
Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze

SIEA – Società Italiana di Economia Agroalimentare

Riassunto

Nella sua accezione di base la sicurezza alimentare nelle nostre società rappresenta una questione prevalentemente legata alla qualità degli alimenti intesa in termini di salubrità complessiva del prodotto, in ragione dell'intero processo di produzione, trasformazione, conservazione, al quale esso viene sottoposto sino a giungere al consumo finale.

Nel presente contributo sono approfonditi i temi della sicurezza alimentare soprattutto considerando gli strumenti attraverso i quali essa incide sugli equilibri del mercato, tanto nei diritti del consumo consapevole che nei vantaggi competitivi di un sistema produttivo che, puntando sempre di più sulla qualità, può fare della tracciabilità certificata un elemento di ulteriore distinzione. L'analisi è condotta mettendo in primo piano gli aspetti legati all'informazione sulla sicurezza come causa delle inefficienze di mercato e, di conseguenza, dell'intervento pubblico di regolamentazione attraverso strumenti di carattere sia obbligatorio che volontario. L'esigenza di informazione relativa alle caratteristiche di sicurezza di un prodotto alimentare chiama a un ruolo molto delicato (e oggetto di intenso dibattito) non solo il regolamentatore pubblico, ma anche le stesse imprese e i media. Soffermandosi su tali aspetti, nel focalizzare le opportunità di valorizzazione della sicurezza per la competitività, si porranno in evidenza i compiti e le responsabilità delle istituzioni pubbliche e dei vari soggetti privati che, a vario titolo, possono concorrere all'abbattimento delle asimmetrie informative di mercato, contenendo peraltro anche i fenomeni di disinformazione.

Parole chiave: Alimentazione, sicurezza, informazione, consumatore, mercato.

Summary

INFORMATION ASYMMETRIES AND FOOD SAFETY IN CONSUMERS' RIGHTS AND THE COMPETITIVENESS OF PRODUCTION SYSTEM

In our society, the basic issues of food safety are essentially related to health as a result of the whole process that the product undergoes until it reaches the final consumer.

This paper outlines the themes of food safety with a particular focus on how it influences market equilibria, both by being included in the rights of consumption awareness and as part of competitive advantages for a quality-driven production system that can exploit certified traceability as a further differentiation tool. The analysis points out how the nature of information about food safety causes market inefficiencies and, as a consequence, it requires public regulation that uses both mandatory and voluntary tools. The need of information in the field of food safety calls for a very delicate role to be played by the public decision making institutions, producers and mass media. While focusing on how safety valorisation may result in an opportunity to improve competitiveness, the roles of the different operators will be outlined in order to analyse how each can contribute to the abatement of information asymmetries.

Key-words: Food, safety, information, consumer, market.

* Autore corrispondente: tel.: +39 055 3288237; fax: +39 055 361771. Indirizzo e-mail: nicola.marinelli@unifi.it

1. Introduzione

La questione della sicurezza degli alimenti, sebbene radicata da sempre negli ambiti delle scelte del consumatore e del comportamento dei produttori, ha subito una sostanziale rivalutazione nel corso degli ultimi anni.

A partire dagli anni Ottanta, in particolare, il rapido susseguirsi di molteplici “scandali” legati ai prodotti alimentari e con forti ripercussioni sulla salute umana non solo ha determinato una maggiore attenzione da parte dei consumatori ma ha anche dato il via a un percorso politico e legislativo, a livello mondiale, europeo, nazionale e locale, che ha fortemente caratterizzato e influenzato l’approccio, da parte della collettività, al quotidiano rapporto col cibo.

Da un lato, a partire dagli eventi legati al “vino al metanolo” e alla BSE fino a giungere al recente “caso Velenitaly” e alle questioni relative alla produzione della mozzarella di bufala in Campania, il consumatore si è sentito sempre di più a rischio di fronte al consumo di prodotti alimentari, vedendo aumentare le proprie incertezze in sede di scelta dei prodotti da acquistare e impiegare nella propria dieta; gli interventi di carattere normativo e politico, poi, hanno influenzato sostanzialmente le modalità con le quali il consumatore stesso si pone di fronte alle sue scelte. Tali interventi hanno determinando un incremento delle informazioni a disposizione al fine di effettuare le proprie decisioni di acquisto e di consumo, ma è ancora in discussione quale sia la qualità dell’informazione fornita, la sua affidabilità e la sua sufficienza.

L’attenzione verso i temi della sicurezza alimentare ha generato nel corso degli ultimi anni la nascita di istituzioni nazionali e comunitarie il cui specifico ruolo consiste proprio nella valutazione dei rischi associati al consumo di alimenti e alla comunicazione verso la collettività dei risultati dei propri studi in merito. La comunità scientifica è sempre più al centro dell’attenzione, anche per il diretto coinvolgimento con tali istituzioni, e sempre più spesso l’indissolubile associazione tra tali tematiche e la produzione degli alimenti, l’informazione e la comunicazione nei confronti del consumatore fa sì che il mondo della ricerca medica si incroci con la ricerca in campo economico agrario e di marketing. L’informazione rappresenta un passaggio chiave in questo schema: è totalmente

inutile valutare il rischio del consumo di un determinato alimento se poi non si comunicano adeguatamente i risultati agli *stakeholders*, siano essi i consumatori o le istituzioni che devono prendere provvedimenti in sede normativa.

Così come si è creato uno schema molto complesso, dal punto di vista dell’architettura istituzionale e dei ruoli dei singoli agenti, nell’ambito della *regulation* della sicurezza alimentare, è anche vero che nel contesto della produzione, del commercio e del consumo dei prodotti alimentari si vanno a intersecare interessi multipli e contrastanti in quanto espressi da soggetti portatori di valori differenti: dalle questioni strettamente legate ai contenuti salutistici dei cibi e al rischio per la salute che interessano consumatori e istituzioni, ai fattori strettamente legati a fenomeni di mode più o meno transitorie che influenzano in egual modo produzione e consumo, alla qualità e la tradizionalità dei prodotti tipici locali che si collegano agli ambiti della competitività dei sistemi produttivi locali. Tale situazione può risultare, per l’occhio non sempre educato del consumatore, in una sovrapposizione all’informazione e in una sensazione di confusione di fronte a segnali diversi, di origine multipla e spesso difficili da decifrare.

A complicare ulteriormente lo scenario, le modalità con cui l’opinione pubblica viene a conoscenza delle questioni legate alla sicurezza alimentare svolgono un ruolo delicatissimo, soprattutto in funzione della gestione delle informazioni da parte dei media. Anche alla luce di quanto successo nel corso degli ultimi anni relativamente agli “scandali” alimentari, è impossibile negare l’influenza della gestione delle informazioni da parte dei media non solo sulle performance commerciali dei prodotti “incriminati”, ma anche sulle performance degli interi comparti colpiti, anche se solo parzialmente, da tali emergenze.

In tale ottica, appare evidente come la questione informativa sia di basilare importanza nella corretta gestione di un sistema complesso come quello della produzione e del consumo degli alimenti.

Dopo alcune considerazioni di carattere generale che serviranno a definire al meglio lo scenario di riferimento, il presente contributo intende inquadrare le problematiche relative alla sicurezza alimentare nell’ambito dell’informazione in una duplice ottica: da un lato il ruolo

che le asimmetrie informative svolgono in questo specifico ambito, con le conseguenti ripercussioni sui meccanismi di efficienza del mercato, dall'altro i pericoli associati alla possibile diffusione di disinformazione in campo alimentare. Inoltre, verrà messo in evidenza come l'intervento delle istituzioni a correzione degli inefficienti meccanismi allocativi del mercato costituisca solo un primo step della regolamentazione, lasciando spazio a ulteriori livelli di intervento, appannaggio dei produttori e di tipo prettamente volontaristico, che, adeguatamente integrati in precise strategie di comunicazione, contribuiscono a costituire forti vantaggi competitivi nei confronti della concorrenza.

2. Qualità, sicurezza e informazione

Spesso, nel linguaggio comune, qualità alimentare diventa sinonimo di sicurezza. Un prodotto di qualità non può far male alla salute. E certamente, senza ricorrere a definizioni di carattere scientifico, l'affermazione regge. Sarebbe del tutto sbagliato, però, confondere i due termini e considerarli sinonimi. La sicurezza alimentare, sebbene con tutte le cautele del caso vista la complessità dell'argomento, può essere definita come "assicurazione sul fatto che il cibo non causerà danni al consumatore al momento della preparazione e/o consumo, in base all'uso cui è preposto" (Raspor, 2007). Tale definizione mette subito in evidenza come il concetto di sicurezza alimentare sia indissolubilmente legato al rischio per la salute umana derivante dagli alimenti. Tale definizione, tra l'altro, non esclude che il concetto sia allargato dal prodotto alimentare a ogni tipo di servizio accessorio (o, ad esempio, alla confezione) che costituisca parte integrante del bene acquistato dal consumatore.

In questi termini, potremmo essere tentati dal considerare la sicurezza alimentare come un sottoinsieme della qualità di un prodotto. Il concetto di qualità, infatti, è molto più complesso e di difficile definizione. Secondo una visione "olistica" della qualità, tale concetto si radica in una molteplicità di aspetti legati al prodotto e di difficoltosa quantificazione.

In genere, i tre aspetti della qualità che vengono richiamati nella visione olistica sono la *qualità di prodotto*, la *qualità di processo* e la

qualità dell'ambiente (di produzione). Ognuna delle componenti della qualità concorre con specifiche caratteristiche alla costituzione dell'identità del prodotto. Tali caratteristiche, però, assumono un valore maggiore sulla base delle relazioni tra ambiente di produzione, processo e prodotto finale; pertanto, è possibile interpretare lo schema della qualità in base a un approccio che richiama la teoria dei sistemi: il valore della qualità di un prodotto non è dato semplicemente dalla somma dei valori delle sue componenti ma anche dal valore delle relazioni tra le componenti stesse. Questo è tanto più importante quanto più si fa riferimento al valore delle caratteristiche nella misura in cui viene percepito dal consumatore, in base alle capacità e alle volontà del produttore (strategie di marketing e comunicazione) e alle capacità interpretative del consumatore stesso.

Così come per la qualità nel suo insieme, anche per la definizione della sicurezza è importante tenere conto dell'influenza sul prodotto finale di ogni caratteristica dell'ambiente e del processo (e le relazioni tra di esse) che può andare a costituire parte integrante della salubrità dell'alimento e che viene posta all'attenzione del consumatore per la sua valutazione di acquisto.

La distanza esistente tra produttore e consumatore è essenzialmente una distanza informativa. Facendo un ulteriore passo nella descrizione delle dinamiche tra gli agenti, è possibile identificare come "caratteristiche" del prodotto quegli elementi che vengono ad esso forniti dal produttore e che vengono trasmessi al consumatore in base alla volontà-capacità di comunicarle da parte del sistema produttivo. Tali caratteristiche vengono percepite dai consumatori come "attributi" del prodotto anche in base alle abilità, i valori e i convincimenti individuali. È a questi attributi che il consumatore conferisce un valore, la determinante del suo processo di scelta (fig. 1).

Spesso il consumatore, quindi, non è in grado di interpretare autonomamente le informazioni necessarie per valutare le caratteristiche dei beni che acquista e che consuma. Per tale motivo l'informazione su tali caratteristiche può essere considerata un bene "di club" (Antle, 1999), in quanto non rivale ma escludibile da parte dei produttori stessi. Questa situazione, mette in evidenza come nel caso della sicurezza

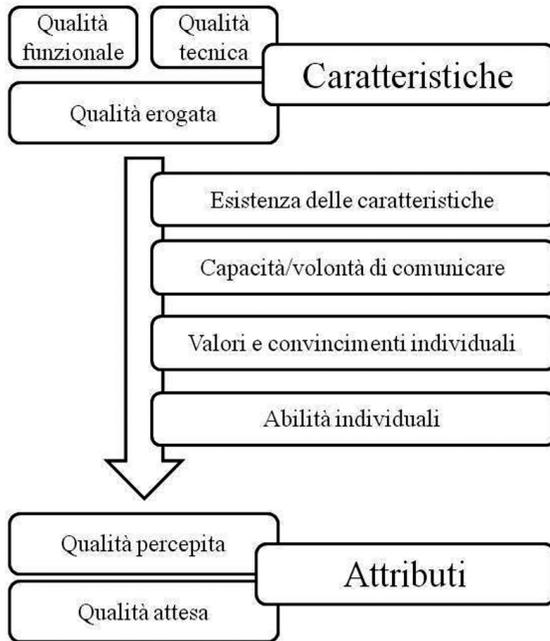


Figura 1. Il rapporto tra attributi e caratteristiche di qualità (e sicurezza).

Figure 1. The relation between quality (and safety) attributes and characteristics.

za alimentare, in assenza di alcun tipo di regolamentazione, si generi una profonda asimmetria informativa che ha come risultato un cattivo funzionamento del mercato (Fernández, 2008).

In linea teorica, le caratteristiche di un qualsiasi prodotto, relativamente al loro contenuto informativo, possono essere classificate come segue:

- 1) caratteristiche di ricerca (*search*): il consumatore possiede già le informazioni necessarie alla valutazione di tali caratteristiche al momento dell'acquisto, pertanto le sa valutare autonomamente e tale valutazione si trasforma in una scelta consapevole del prodotto;
- 2) caratteristiche di esperienza (*experience*): il consumatore entra in possesso delle informazioni riguardanti tali caratteristiche solo dopo aver acquistato e consumato il bene o servizio in questione. Sarà in grado, quindi, di formare una propria valutazione solo successivamente;
- 3) caratteristiche di fiducia (*credence*): il consumatore non è in grado di valutare tali caratteristiche perché non è in grado di otte-

nere indipendentemente le informazioni necessarie. Al limite, per talune di queste informazioni è possibile avere una loro certificazione da parte di un ente che garantisce l'esistenza e la qualità delle caratteristiche del prodotto. Il consumatore, appunto, si appoggia alla fiducia in un ente certificatore per i contenuti in questione.

Tale classificazione segue quindi la decrescente capacità del consumatore di valutare i contenuti di un prodotto in modo tale da definire la propria disponibilità a pagare per esso in base a informazioni certe (Cho e Hooker, 2002, Delleck et al., 2009). Ora, se si eccettuano rari casi in cui la sicurezza di un alimento può essere direttamente osservabile (quindi come caratteristica di ricerca, ad esempio nel caso di un prodotto evidentemente deperito) o direttamente valutabile dopo il consumo (quindi come caratteristica di esperienza, come nel caso di un prodotto avariato che causa immediate conseguenze sullo stato di salute del consumatore), si può stabilire che, in assenza di regolamentazione, nella maggior parte dei casi le caratteristiche di sicurezza di un alimento siano classificabili come caratteristiche di fiducia.

Il contesto di asimmetria informativa che si viene così a creare per i prodotti alimentari, in linea teorica, può generare comportamenti distortivi sia da parte del consumatore che da parte del produttore che conducono verso il cattivo funzionamento del mercato. I limiti del mercato si devono leggere fondamentalmente nel fatto che il consumatore, non riuscendo a percepire pienamente tutte le caratteristiche di sicurezza che il bene può garantire, tende naturalmente a diminuire la sua disponibilità a pagare per esse: in altri termini, osservando il tutto nelle logiche della "customer satisfaction", mentre il consumatore ha piena e assoluta consapevolezza del "sacrificio" che deve sostenere per godere di un determinato bene, tende a non ricomprendere nella "soddisfazione" che deriva dal consumo di quello specifico bene tutte le caratteristiche di sicurezza suddette.

La difficoltà che il consumatore ha nel ricomprendere appieno negli "attributi" dei beni tutto l'insieme delle "caratteristiche" che essi possiedono genera per il sistema produttivo la difficoltà nel gestire questo stesso insieme di caratteristiche, in misura tanto maggiore quanto più queste caratteristiche si legano a maggiori

costi di produzione. In un sistema di ipotetica concorrenza perfetta questo specifico ordine di caratteristiche tende ad essere escluso dal mercato (Bowles e Gintis, 1993); in questo meccanismo si genera il parziale fallimento del mercato stesso, con dei produttori che sono naturalmente tentati (o costretti in termini di confronto con i *competitors*) a produrre beni di qualità inferiore. Peraltro, questa stessa asimmetria informativa può generare comportamenti speculativi, con taluni produttori che possono cercare di vantare caratteristiche di qualità anche superiori a quelle effettivamente possedute, cercando così di elevare il valore degli attributi che il consumatore può riconoscere (fig. 2).

Quello appena delineato è, in sostanza, lo stesso schema che veniva descritto da Akerlof nel suo “mercato dei bidoni” (Akerlof, 1970), dove comportamenti di alea morale conducono verso un mercato che, non essendo in grado di autoregolarsi, necessita di un intervento pubblico.

Come evidenziato anche da Weiss (Weiss, 1995), la sicurezza alimentare, secondo la visione integrata dell’economia dell’informazione, rappresenta una serie di attributi non pienamente scambiabili “esplicitamente” sul mercato. Tale problema riguarda anche le questioni relative ai contenuti nutrizionali dei prodotti: infatti, in assenza di indicazioni specifiche in etichetta, il consumatore non è da solo in grado di misurare e valutare i contenuti nutrizionali di un prodotto alimentare. La regolamentazione esterna deve quindi avere allo stesso tempo il ruolo di garantire sicurezza e contenuti nutrizionali e impedire pratiche scorrette da parte dei produttori che possono diffondere false informazioni in un contesto in cui il cibo più si-

curo non può competere in termini di prezzo con quello meno sicuro ma “dichiarato” sicuro dai soli produttori.

È molto importante mettere in evidenza che il problema dell’informazione sulla sicurezza riguarda in larga parte i contenuti nutrizionali dei prodotti: i problemi legati alle contaminazioni dei cibi ricadono spesso e volentieri nell’ambito *experience* (l’effetto della contaminazione ha spesso ricadute immediate sulla salute del consumatore), mentre per quanto riguarda i contenuti nutrizionali gli effetti negativi del consumo sono spesso di lungo periodo e dovuti non tanto al consumo di uno specifico alimento ma alla reiterazione del consumo all’interno di una dieta non equilibrata. In questa ultima fattispecie, tra l’altro, sono minori le certezze riguardo alle cause specifiche delle eventuali patologie sviluppate, o, caso limite, le patologie stesse possono svilupparsi senza che il consumatore ne sia a conoscenza. In questo senso, il contenuto nutrizionale rappresenta una caratteristica credence ancora meglio della sicurezza alimentare nel suo complesso (Weiss, 1995). Inoltre, c’è anche da notare che, sebbene le “emergenze” e gli scandali alimentari siano ancora all’ordine del giorno, in molti paesi sviluppati i problemi legati a una cattiva nutrizione sono molto più rilevanti e necessitano pertanto di una particolare attenzione da parte delle autorità di regolamentazione.

L’analisi delle questioni informative legate alla sicurezza alimentare richiede una attenta osservazione del sistema degli incentivi che si stabiliscono tra gli agenti coinvolti; tale approccio conduce all’individuazione dei rapporti Principale-Agente all’interno del sistema (fig. 3). Un

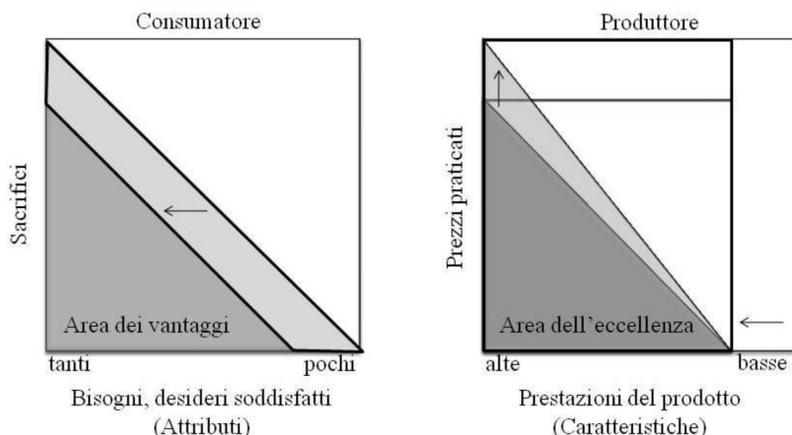


Figura 2. Gli effetti dell’informazione sulla sicurezza nella Customer Satisfaction.

Figure 2. The effects of safety information on Customer Satisfaction.

primo rapporto Principale-Agente è rappresentato dalle dinamiche tra consumatore e produttore: il Principale-consumatore richiede un prodotto con determinate caratteristiche all'Agente-produttore il quale, attraverso il suo sforzo produttivo, lo fornisce. Tale rapporto è viziato dai comportamenti di alea morale descritti in precedenza, dando luogo a un mercato che non raggiunge un equilibrio efficiente: la disponibilità a pagare del consumatore, in assenza di regolamentazione, non può basarsi su informazioni certe relative all'entità dello sforzo produttivo del produttore e alle conseguenti caratteristiche del prodotto. Sul mercato, quindi, si viene a determinare una formazione dei prezzi che non ha corrispondenze con i costi e i benefici sociali che sono coinvolti nella produzione di sicurezza alimentare e contenuto nutrizionale dei prodotti. La situazione richiede pertanto l'intervento di regolamentazione delle istituzioni, che però dà luogo a un nuovo rapporto Principale-Agente (Weiss, 1995) tra il Principale-consumatore che richiede garanzie di sicurezza per i prodotti che acquista e l'Agente-istituzione che mette in atto politiche di regolamentazione per fornire tali garanzie; anche in questo caso, però, si crea un rapporto con carenze informative: infatti, il consumatore non è generalmente in grado di verificare la bontà dell'operato dell'ente regolamentatore e, inoltre, la disponibilità a pagare del consumatore per tale servizio non è decisa dal Principale-consumatore stesso ma, paradossalmente, dall'Agente-istituzione attraverso l'imposizione fiscale. Di fronte a una situazione del genere, quindi, diventa assolutamente determinante il grado di fiducia nei confronti delle istituzioni, poiché proprio sulla base di esso si fonda la larga parte la formulazione del giudizio di bontà degli interventi di regolamentazione da parte di chi è utente ultimo degli effetti di garanzia di sicurezza di tali interventi, cioè il consumatore.

3. Strumenti per la sicurezza alimentare

L'analisi dello scenario di interazione tra i soggetti coinvolti sul mercato mette in evidenza la necessità della soluzione di tipo pubblico: l'intervento delle istituzioni che ha lo scopo di garantire un livello di sicurezza per tutti i consumatori. È anche vero, però, che tale azione non

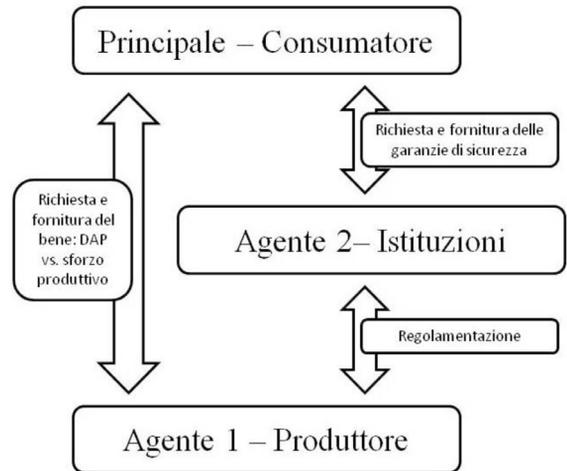


Figura 3. Dinamiche tra consumatore, produttore ed istituzioni.

Figure 3. The dynamics among consumer, producer and institutions.

preclude ulteriori strategie per la sicurezza di carattere privato, su iniziativa dei produttori stessi.

In sostanza, le soluzioni alle problematiche descritte possono essere sintetizzate come segue:

- 1) soluzioni pubbliche:
 - a. Analisi del rischio
 - b. Disposizioni operative
 - i. Standard obbligatori per requisiti garantiti di sicurezza
 - ii. Obblighi di attestazione delle caratteristiche dei prodotti
 - c. Standard pubblici ad adesione volontaria
 - d. Comunicazione
- 2) soluzioni private:
 - a. Standard privati
 - b. Adesione volontaria a certificazioni di prodotto e di processo
 - c. Marketing

3.1 Il ruolo pubblico

La regolamentazione della sicurezza alimentare parte essenzialmente dall'analisi del rischio. È su questo versante, tra l'altro, che si è concentrato gran parte del movimento istituzionale e normativo europeo degli ultimi anni. La nascita dell'Autorità Europea per Sicurezza Alimentare, con sede a Parma, nel 2002 e della rete di istituzioni nazionali legate ai Ministeri della Sa-

lute degli Stati dell'Unione Europea costituiscono il momento cruciale del processo di "presa di coscienza" da parte dell'UE nei riguardi della sicurezza alimentare.

Tali istituzioni portano avanti l'analisi del rischio nelle sue tre fasi principali:

- 1) Valutazione – analisi effettiva dell'esistenza di rischi legati al consumo di determinate sostanze;
- 2) Gestione – analisi degli impatti del consumo delle sostanze rischiose in base alla loro presenza nei prodotti e alla loro diffusione;
- 3) Comunicazione – trasmissione dei risultati della ricerca sul rischio a due categorie di utenti:
 - a. Autorità che si occupano di legiferare in materia di sicurezza alimentare.
 - b. Consumatori.

Questo processo avviene nel rispetto del "principio di precauzione" in base al quale, nell'incertezza del rischio, si preferisce un approccio cautelativo (Henson e Caswell, 1999).

Gli strumenti di regolamentazione che vengono successivamente adottati, che siano a carattere *ex-ante* (di regolamentazione diretta) o a carattere *ex-post* (cioè riguardanti la *product liability*), garantendo gli standard di sicurezza, riconducono le caratteristiche *credence* dei prodotti verso l'ambito delle caratteristiche *search*, abbattendo le asimmetrie informative tra produttore e consumatore.

3.2 Il ruolo privato

Sul versante privato, le iniziative che possono essere messe strategicamente in atto dalle imprese si possono sovrapporre alle iniziative a carattere pubblico. Attraverso la fissazione di standard aggiuntivi e la creazione di certificazioni di tipo privato e attraverso un'attenta strategia di comunicazione nei confronti del consumatore, il produttore può essere in grado di intercettare in termini di prezzo la latente disponibilità a pagare per maggiori livelli di garanzia di sicurezza. In tal modo, la sicurezza si pone come vero e proprio elemento di differenziazione del prodotto rispetto ai *competitors*. È importantissima, da questo punto di vista, la fase del marketing da parte delle aziende: un corretto utilizzo della leva della comunicazione può essere in grado di far percepire efficacemente la differenziazione del prodotto in termini di sicurezza e rendere il consumatore effettivamen-

te in grado di riconoscerla, valutarla ed effettuare di conseguenza una scelta d'acquisto informata.

3.3 Il ruolo del settore sanitario

Come anticipato in precedenza, l'asimmetria informativa esistente nell'ambito della sicurezza alimentare dipende in buona parte dalle abilità del consumatore di verificare personalmente l'esistenza di determinate caratteristiche nei prodotti alimentari e di utilizzare correttamente tali prodotti all'interno della propria dieta. A fronte dell'azione di regolamentazione pubblica e delle ulteriori forme di differenziazione dei prodotti in termini di sicurezza e di natura privata, è necessario quindi che il consumatore sia educato alla lettura e alla valutazione delle informazioni che entrano in suo possesso. Oltre all'evidente ruolo della ricerca scientifica in campo sanitario per quanto concerne la partecipazione alle attività di analisi del rischio (e alla diffusione dei risultati della ricerca), un ruolo determinante in questo senso viene svolto necessariamente dalle categorie dei dietisti e dei nutrizionisti. Il ruolo è particolarmente rilevante non solo nei termini della loro naturale collocazione nel settore clinico e della prevenzione ma anche dalla trasversalità in cui spesso tali figure professionali possono collocarsi, con collaborazioni costanti con il mondo della ricerca, dell'istruzione e dei media.

Le associazioni dei professionisti della nutrizione riconoscono questo ruolo che va oltre la loro collocazione professionale primaria e contribuiscono attivamente alla diffusione verso il consumatore (e non solo il paziente) di informazioni che riguardano la sicurezza. Dietisti e nutrizionisti, agendo prevalentemente nell'ambito della prevenzione, dedicano particolare attenzione all'individuazione delle principali forme di disinformazione sulla sicurezza alimentare, mettendo spesso in evidenza come un uso improprio dei mezzi di comunicazione possa compromettere il sistema delle conoscenze dei consumatori e fornire indicazioni fuorvianti o del tutto sbagliate sull'uso e sul consumo di determinati prodotti. Particolarmente critica è la posizione di alcune associazioni nei confronti di specifici media per la diffusione di informazioni parziali o incorrette. Si ricorda, in particolare, la posizione ufficiale dell'ADA (*American Dietetic Association*) su fonti e costi della di-

sinformazione in campo alimentare: una recente ricerca (ADA, 2006) individua le seguenti principali fonti di disinformazione:

- 1) inadeguata interpretazione dei risultati della ricerca scientifica da parte dei media;
- 2) incontrollabilità delle informazioni via internet;
- 3) cattive informazioni (spesso radicate in usi e costumi) derivanti da familiari e amici.

A fronte della disinformazione così (e in altri modi) generata, vengono individuate le principali voci di costo della disinformazione:

- 1) costi legati al danno immediato sulla salute;
- 2) costi legati al mancato ricorso all'assistenza sanitaria;
- 3) costi legati all'acquisto di prodotti non necessari.

3.4 Il ruolo dei media

Qualsiasi tipo di intervento nell'ambito della sicurezza alimentare finisce prima o poi per transitare attraverso i *mass media*. Il sistema gestito dai principali canali di informazione (televisione, giornali, riviste, stampa specializzata o non, internet...) è alquanto delicato e richiede una forte assunzione di responsabilità da parte degli operatori. In realtà la responsabilità è equamente ripartita tra chi utilizza i media come tramite per la comunicazione (imprese, istituzioni, sanità...) e i gestori dei media stessi. Affinché la comunicazione abbia il corretto effetto di abbattere le asimmetrie informative di cui parliamo, e quindi di ridurre le distanze tra quelle che sono le caratteristiche di un prodotto e gli attributi che il consumatore legge nel prodotto stesso, è necessario che le imprese si adoperino per utilizzare un approccio di massima trasparenza, che le istituzioni riescano a creare un rapporto di estrema fiducia nei propri confronti da parte dei cittadini e che allo stesso tempo i cittadini riconoscano il ruolo chiave del settore sanitario.

Queste premesse sono però condizione necessaria ma non sufficiente per il corretto funzionamento della comunicazione: utilizzando i canali dei media, infatti, si pongono i problemi che caratterizzano i canali stessi, e cioè quelli relativi principalmente al linguaggio utilizzato e all'attendibilità delle fonti. Il problema del linguaggio è duplice: da un lato esiste la difficoltà di rendere accessibili e comprensibili informazioni di carattere tecnico e scientifico (è il caso

della diffusione dei risultati delle ricerche), dall'altro la tendenza dei media ad usare linguaggi di facile presa che possono mettere fuori strada il consumatore fornendo anche informazioni parziali o non abbastanza dettagliate (è il caso, per esempio, di alcune pubblicità di prodotti alimentari).

Molti dei più recenti "scandali" alimentari hanno avuto una esposizione mediatica che ha scaturito effetti negativi andati ben oltre la reale entità dei fatti. Due esempi su tutti: il "caso Velenitaly" e il caso della mozzarella di bufala campana. L'uso di un determinato linguaggio e la diffusione di solo una parte delle informazioni, insieme all'inadeguata preparazione dei consumatori a leggere determinate notizie, hanno portato ad aumentare oltremodo il clima di sfiducia per i settori dell'agroalimentare colpiti da tali eventi, con conseguenze negative sul mercato al di là di quanto potesse essere giustificabile dall'entità dei casi in sé.

4. Conclusioni

L'analisi svolta mette in evidenza come le tematiche della sicurezza alimentare siano intimamente legate a valutazioni di carattere informativo. La natura stessa delle caratteristiche di sicurezza di un prodotto alimentare (prevalentemente caratteristiche *credence*) fa sì che il mercato non funzioni e mostri aspetti di inefficienza nel raggiungimento del suo equilibrio. La risultante necessità di un diffuso intervento pubblico di regolamentazione, però, non risolve interamente i problemi generati poiché, accanto alle problematiche di asimmetrie informative, si pongono quelle relative alla disinformazione. La comunicazione, sia essa da parte delle istituzioni o da parte dei produttori nei confronti dei consumatori, riveste quindi un ruolo centrale e le responsabilità ad essa legate sono appannaggio non solo delle vere e proprie fonti ma anche dei mezzi (media) con cui i contenuti informativi giungono all'utente finale.

La garanzia di sicurezza nel consumo di prodotti alimentari quindi rappresenta un diritto del consumatore che deve essere, in varia forma, tutelato. Inoltre, la sicurezza rappresenta anche un'opportunità per i produttori stessi; di fronte alla messa in essere, da parte del settore pubblico, di strumenti atti a garantire la diffu-

sione di alimenti salutari e il corretto utilizzo degli stessi, un ulteriore livello di garanzia, fissato secondo standard privati e adeguatamente e responsabilmente comunicato al consumatore, può captare una latente maggior disponibilità a pagare del consumatore stesso. Infatti il consumatore, che oggi si trova a esprimere in tal senso esigenze in costante evoluzione, necessita di un numero sempre maggiore di informazioni e di mezzi sempre migliori per leggerle e interpretarle. Ma solo alla condizione che si venga a stabilire un rapporto di fiducia con le istituzioni e con i produttori, la spesa sostenuta per la garanzia della sicurezza troverà un adeguato riconoscimento nella reale disponibilità a pagare del consumatore.

Bibliografia

- Akerlof G. 1970. The market for 'lemons': quality uncertainty and the market mechanism. *Quarterly Journal of Economics*, 77:488-550.
- ADA 2006. Position of the American Dietetic Association: Food and Nutrition Misinformation. *Journal of the American Dietetic Association*, 106, 4:601-607.
- Andersen E.S., Philipsen K. 1998. The evolution of credence goods in customer markets: exchanging 'pigs in pokes'. Contributo presentato al *DRUID Winter Seminar*, Middelfart, 8-10 gennaio.
- Antle J. 1999. Benefits and costs of food safety regulation. *Food Policy*, 24:605-623.
- Bowles S., Gintis H. 1993. The Revenge of Homo Economicus: Contested Exchange and the Revival of Political Economy. *Journal of Economic Perspectives*, 7, 1:83-102.
- Cho B., Hooker N. 2002. A note on three qualities: search, experience and credence attributes. Department of Agricultural, Environmental and Development Economics, University of Ohio, Working Paper AE-DE-WP-0027-02.
- Delleck U., Kerschbamer R., Sutter M. 2009. The economics of credence goods: on the role of liability, verifiability, reputation and competition. Göteborg University, Working Papers in Economics, No. 348.
- Fernández M. 2008. Il contributo dell'economia dell'informazione alla sicurezza alimentare. In: Grazia C., Green R., Hammoudi A. (eds.): *Qualità e sicurezza degli alimenti. Una rivoluzione nel cuore del sistema agroalimentare*, 175-202. Franco Angeli, Milano.
- Henson S., Caswell J. 1999. Food safety regulation: an overview of contemporary issues. *Food Policy*, 24:589-603.
- Kerry J., Ledward D. 2002. *Meat processing: improving quality*. Woodhead Publishing Limited.
- Mancino L., Kuchler F., Leibtag E. 2008. Getting consumers to eat more whole-grains: The role of policy, information and food manufacturers. *Food Policy*, 33:489-496.
- Pasquali M. (ed.) 2001. *Food Safety, Food Quality and Food Ethics*. Atti del terzo convegno annuale della European Society of Agricultural and Food Ethics, Firenze, 3-5 ottobre.
- Raspor P. 2007. Total food chain safety: how good practices can contribute? *Trends in Food Science & Technology*, 20:1-8.
- Radner R. 1987. Decentralization and Incentives. In: Groves T., Radner R., Reiter S. (eds.): *Information, Incentives and Economic Mechanisms*, 3-47. University of Minnesota Press, Minneapolis, Minnesota.
- Rosa F., Sillani S. 2001. *Consumatore, alimenti e marketing: fra globalizzazione e culture locali*. Forum, Udine.
- Vitale A. 2007. *Manuale di legislazione alimentare*. Franco Angeli, Milano.
- Weiss M. 1995. Information Issues for Principals and Agents in the 'Market' for Food Safety and Nutrition. In: Caswell J. (ed.): *Valuing Food Safety and Nutrition*. Westview Press, Boulder, Colorado.

Effetti dei cambiamenti ambientali sulla fauna selvatica e sull'entomofauna dei sistemi agricoli e forestali

Piero Cravedi*, Fabio Molinari, Emanuele Mazzoni

Istituto di Entomologia e Patologia vegetale, Università Cattolica del Sacro Cuore
Via Emilia parmense 84, 29122 Piacenza

Associazione Italiana per la Protezione delle Piante (AIPP)

Riassunto

Negli ultimi decenni l'agricoltura è stata caratterizzata da profondi cambiamenti che hanno avuto rilevanti conseguenze sull'ambiente. All'intensificazione produttiva di alcune aree si è accompagnato un sostanziale abbandono di ampie zone collinari e montane. Cause sociali, economiche e demografiche hanno agito congiuntamente sull'ambiente con effetti complessi. A questi si sono aggiunti quelli sempre più evidenti del cambiamento climatico.

Il progresso delle tecniche agricole verso sistemi più intensivi ha acuitizzato la problematica della difesa antiparassitaria che, dopo un periodo di abuso dei mezzi chimici, alla fine degli anni Sessanta del secolo scorso, ha reso necessario un ripensamento sulle strategie da adottare e una maggiore attenzione alle ripercussioni ambientali del processo produttivo.

Il miglioramento della difesa antiparassitaria ha poi coinvolto l'intero processo produttivo in agricoltura giungendo alla situazione attuale in cui l'applicazione delle strategie di produzione integrata si è ampiamente estesa.

Gli effetti positivi derivanti dall'uso razionale dei mezzi chimici dotati di basso potere di contaminazione dell'ambiente sono progressivamente apparsi evidenti.

Le problematiche fitosanitarie si sono in molti casi ridimensionate, sicché i rischi per la salute degli operatori agricoli sono sensibilmente diminuiti, ma ci sono state anche altre vistose conseguenze.

Nelle zone in cui l'agricoltura è più intensiva è aumentata la fauna selvatica tanto da creare, in alcune circostanze, danni alle coltivazioni.

Contemporaneamente le colline e le montagne, sempre meno coltivate, sono state occupate da specie quali il cinghiale e il capriolo che hanno spesso rapporti difficili con le attività agricole e forestali.

Un capitolo sempre più ricco è poi rappresentato da specie accidentalmente introdotte da altri continenti. Oltre a varie specie di insetti che stanno modificando il quadro fitosanitario di colture importanti quali vite, mais, pomodoro e castagno, per le quali si possono citare: *Scaphoideus titanus*, *Diabrotica virgifera virgifera*, *Metcalfa pruinosa*, *Dryocosmus kuriphilus*, *Tuta absoluta*, meritano di essere ricordati tra gli Artropodi alcuni gamberi di origine americana e tra i Vertebrati la nutria.

Il loro impatto sull'agricoltura e sull'ambiente è importante ma non sempre adeguatamente considerato.

Da ultimo si segnala una progressiva urbanizzazione delle campagne e l'elevata produzione di rifiuti. Le specie, particolarmente di uccelli, che frequentano le aree urbane mantengono contatti con le campagne e spesso provocano danni rilevanti all'agricoltura. La complessità delle situazioni evidenziate richiama l'attenzione sull'importanza di avviare studi interdisciplinari per seguire l'evoluzione dei cambiamenti ambientali, spesso molto rapidi, le cui cause sono spesso molteplici e difficili da individuare.

Parole chiave: danni, lepre, cinghiale, specie invasive.

Summary

EFFECTS OF ENVIRONMENTAL CHANGES ON WILDLIFE AND PEST COMPLEX IN FOREST AND RURAL ECOSYSTEMS

In the last decades agriculture has undergone deep changes that had strong effects on the environment.

Agriculture has been intensified in some areas, while in others has been abandoned.

The environment has been influenced by the interaction of social, economic and demographic changes, together with climatic modifications.

* Autore corrispondente: tel.: 0523 599237; fax: 0523 599235. Indirizzo e-mail: piero.cravedi@unicatt.it

Intensive agriculture requires an increasing attention for the phytosanitary management, taking into account its environmental impact after the overuse of chemicals in the late sixties of the last century.

The control of pests and diseases is now mainly organized in the frame of Integrated Production (IP), that has led to an impressive reduction of both the load of chemical pollution and pest pressure.

In this situation, wild animals, such as wild boars and roes, increase their populations, causing damages to the crops, especially in hilly and mountain areas, that are mostly uncultivated.

The phytosanitary situation of many crops is continuously changed following the introduction of pests from other continents: *Scaphoideus titanus*, *Diabrotica virgifera virgifera*, *Metcalfa pruinosa*, *Dryocosmus kuriphilus*, *Tuta absoluta*, are new pests for grape, corn, chestnut and tomato; another arthropod is an American crayfish and among vertebrates *coypu* is widespread.

The urbanization of rural areas makes the waste problem worst. Many bird species living in the urban areas move easily to cause damage to agricultural production.

Key-words: damages, hare, wild boar, invasive species.

La seconda metà del secolo scorso è stata caratterizzata da profonde variazioni dell'ambiente provocate da un complesso di fenomeni che hanno coinvolto sia il mondo agricolo sia l'intera società.

Le ripercussioni sulla flora e sulla fauna sono state rilevanti e sono attualmente ancora in atto con effetti ben evidenti.

L'agricoltura è stata caratterizzata da un prodigioso aumento della produttività accompagnato da una progressiva specializzazione e semplificazione degli avvicendamenti culturali. Questo cambiamento ha prevalentemente interessato le aree di pianura. Contemporaneamente in molte zone collinari e montane si assiste a una regressione dell'agricoltura e ad un abbandono da parte della popolazione. Il fenomeno dello spopolamento delle campagne dovuto alla vistosa diminuzione degli occupati in agricoltura ha certamente comportato effetti anche sull'ambiente.

Sono quindi state cause sociali, economiche e le loro conseguenze demografiche che, dopo secoli di sostanziale stabilità, hanno agito anche sull'ambiente in un modo che generalmente è sottovalutato o non riconosciuto.

In questi anni è diventata attuale la tematica dei cambiamenti climatici. Ad essa si dedicano giustamente ricerche per approfondire molteplici aspetti scientifici che consentano la previsione di possibili scenari futuri. L'attenzione per l'ambiente ha anche comportato il finanziamento di interventi di vario tipo in questo settore. Un limite che emerge appare legato a una scarsità di reale verifica dell'efficacia di tali iniziative. Non si deve però dimenticare

di tentare un'interpretazione più completa dei fenomeni verificando anche quali sono le conseguenze e gli effetti ambientali di certe strategie proposte e attuate. Risulta sufficiente la previsione teorica dei loro effetti positivi.

Nel settore della difesa antiparassitaria i cambiamenti climatici stanno influenzando l'area di distribuzione delle avversità facilitando l'insediamento nelle zone temperate di avversità tipiche della fascia tropicale.

Di questi ultimi anni è la crescente preoccupazione per la problematica della produzione di micotossine in colture importanti quali mais e vite (Mazzoni e Battilani, 2007).

La presenza di nuove specie comporta la necessità di variare strategie di difesa integrata già consolidate per le quali le possibili conseguenze sull'ambiente sono state studiate da tempo, particolarmente nel settore dell'entomologia.

Lo studio degli effetti degli interventi antropici sull'entomofauna di vari ecosistemi è stato sempre oggetto di attenzione fin dall'inizio dell'uso degli insetticidi della "seconda generazione", e ha consentito di far emergere gravi effetti collaterali negativi.

A partire dalla fine degli anni Sessanta del secolo scorso sono state avviate ricerche interdisciplinari che hanno portato ad applicare strategie di Difesa Integrata che si sono evolute nelle attuali forme di Produzione Integrata.

La già citata emergenza dovuta all'accidentale introduzione di specie nuove sta interessando colture economicamente importanti quali il pomodoro (*Tuta absoluta*) (Viggiani et al., 2009), il mais (*Diabrotica virgifera virgifera*) (Mazzoni et al., 2008), la vite (*Scaphoideus tita-*

nus) (Cravedi et al., 1993), il castagno (*Dryocosmus kuriphilus*) (Brussino et al., 2002) e anche le alberature del verde urbano (*Rhynchophorus ferrugineus* e *Anoplophora chinensis*) (Hérard et al., 2006; Longo et al., 2008).

La continua evoluzione del complesso delle avversità richiede continui aggiornamenti, tuttavia risulta evidente che l'adozione dei criteri di produzione integrata ha comportato un significativo miglioramento dell'ambiente.

La sensibile diminuzione dell'impiego di insetticidi, fungicidi e diserbanti e le migliorate caratteristiche degli agrofarmaci in seguito all'entrata in vigore di normative progressivamente più restrittive riguardanti l'autorizzazione al loro impiego hanno avuto effetti positivi sulla fauna.

L'aumento dell'avifauna acquatica è stato consistente e dimostra anche l'incremento delle popolazioni di pesci e anfibi.

Meno immediata è la percezione degli effetti che l'evoluzione delle pratiche colturali ha avuto su altre specie. La meccanizzazione ha comportato la rapida esecuzione dell'aratura e la precoce eliminazione delle stoppie dei cereali. Questa situazione è stata ritenuta essere la causa principale della diminuzione delle popolazioni di starni in Europa.

L'abbondanza di questo fasianide nelle campagne europee è ben documentato dalle opere di vari pittori (Alexandre-Francois Desportes, 1661-1743: Cane a guardia della cacciagione, Parigi Museo del Louvre; Alexandre-Francois Desportes, 1661-1743: Tane, pointer di Luigi XIV, Sèvres, Museo municipale).

Altra specie caratteristica delle zone coltivate è la presenza della lepre. Le nuove strategie di difesa delle colture e in particolare l'attenzione nella lotta contro la flora infestante ha comportato un considerevole aumento delle popolazioni di lepri proprio ove l'agricoltura viene praticata con maggiore intensità (Trocchi e Riga, 2005; Trocchi, 2007).

L'introduzione accidentale di specie da altri continenti è un fenomeno grave, continuamente in atto.

Oltre alle già citate specie di insetti, si segnalano alcuni gamberi di acqua dolce quali il gambero rosso della Luisiana (*Procambarus clarkii*) e il gambero americano (*Orconectes limosus*), abbondantissimi nei corsi d'acqua di alcune zone dell'Emilia e della Lombardia (fig. 1) (Nicoli et al., 2008), e la nutria (fig. 2), che è in



Figura 1. Esemplare di gambero della Luisiana in un canale di irrigazione dell'Oltrepo mantovano.

Figure 1. Specimen of a red swamp crayfish in a irrigation canal of "Oltrepo mantovano".

continua espansione in numerose regioni italiane (Cocchi, 2007).

I danni arrecati dalle nutrie sono sia quelli direttamente provocati alle colture sia quelli derivati dalla riduzione della stabilità delle sponde dei corsi d'acqua in cui vengono scavate le tane (Auricchio et al., 1999).

L'aumento della fauna selvatica comporta difficili rapporti con l'agricoltura e frequenti contrasti con il mondo venatorio.

Alcune colture sono particolarmente danneggiate dalla fauna selvatica oggetto di caccia e frequenti sono le polemiche tra agricoltori, cacciatori e ambientalisti su come attuare gli eventuali interventi di gestione delle popolazioni.



Figura 2. Nutria.

Figure 2. Nutria.

Le aree collinari e montane

All'intensificazione colturale di alcune zone si contrappone il sostanziale abbandono di altre che in precedenza erano coltivate con molta cura. Si è verificata una variazione progressiva del paesaggio, attualmente ancora in atto, e un degrado delle pendici delle aree collinari e montane. I campi fino a qualche anno fa coltivati vengono abbandonati e tendono a essere assorbiti dal bosco. Si è infatti invertita la tendenza che fino all'immediato dopoguerra portava a strappare al bosco superficie coltivabile. Lo spopolamento e la riduzione delle attività agricole ha favorito l'insediamento di specie prima sconosciute. La presenza del cinghiale è sempre più diffusa e le segnalazioni di danni (fig. 3) sono frequenti anche in aree di pianura e in vicinanza alle città (Massei e Toso, 1993; Auricchio et al., 1999). Più recente è l'espansione delle aree di distribuzione del capriolo e già iniziano ad essere segnalati i primi danni. Ma oltre ai danni provocati alle coltivazioni da cinghiali e caprioli sono in preoc-



Figura 3. Danno prodotto da cinghiali a grappoli d'uva in maturazione.

Figure 3. Vinegrape damages by wild boars.

cupante aumento anche gli incidenti stradali da essi provocati (Carnevali e Riga, 2007).

Recenti segnalazioni della presenza di lupi sull'Appennino settentrionale costituiscono una prova sicura di quanto l'ambiente sia cambiato (fig. 4).

Nuove forme di agricoltura

La riduzione degli addetti in agricoltura è stata accompagnata da una progressiva urbanizzazione delle campagne.

Nuovi insediamenti abitativi, attività artigianali e commerciali, aree industriali, rete viaria stanno invadendo le campagne. In molti casi si ha anche la sottrazione di importanti superfici di rilevante interesse agricolo con un grave danno alle produzioni e una banalizzazione del paesaggio. Contemporaneamente si ha anche l'aumento di agricoltori "dilettanti" che su piccole superfici praticano un'agricoltura amatoriale.

L'innalzamento delle temperature degli ulti-



Figura 4. Esemplare di lupo rinvenuto nei boschi dell'Appennino piacentino nel 2009.

Figure 4. Wolf specimen discovered in a wood of the "Appennino piacentino" in 2009.

mi anni ha inoltre reso possibile l'espansione dell'areale di alcune colture. L'esempio è dato dalla diffusione dell'olivo in varie aree collinari dell'Appennino settentrionale.

Considerazioni conclusive

I mutamenti di varia natura che hanno interessato l'agricoltura hanno avuto conseguenze a cui è stata attribuita insufficiente attenzione.

L'attuale attenzione agli effetti dei cambiamenti climatici è doverosa e trova motivazione nella necessità di individuare sistemi per prevenire conseguenze ambientali negative; non va dimenticato però che le variazioni ambientali sono provocate da molteplici altre cause sulle quali è altrettanto importante porre l'attenzione evitando facili colpevolizzazioni di un settore che è già spesso visto in modo non corretto dall'opinione pubblica.

Bibliografia

- Auricchio M.R., Cravedi P., Mazzoni E. 1999. Fauna selvatica e attività agricola. Provincia di Piacenza, 48 pp.
- Brussino G., Bosio G., Baudino M., Giordano R., Ramello F., Melika G. 2002. Pericoloso insetto esotico per il castagno europeo. *Informatore Agrario*, 58, 37:59-61.
- Carnevali L., Riga F. 2007. Come risolvere il problema dei danni da ungulati selvatici. *L'Informatore agrario*, 63, 37:85-88.
- Cocchi R. 2007. I danni da nutria si limitano con prevenzione e abbattimenti. *L'Informatore agrario* 63,37:89-91.
- Cravedi P., Mazzoni E., Cervato P. 1993. Osservazioni sulla biologia di *Scaphoideus titanus* Ball. (Homoptera: Cicadellidae). *Redia*, 76,1:57-70.
- Hérard F., Ciampitti M., Maspero M., Krehan H., Benker U., Boegel C., Schrage R., Bouhot-Delduc L., Bialookial P. 2006. *Anoplophora* species in Europe: infestations and management processes. *EPPO Bull.*, 36:470-74.
- Longo S., Colazza S., Cacciola S.A., Magnano di San Lio G. 2008. Il caso delle palme. *I Georgofili – Quaderni* 2007, 6:65-104.
- Massei G., Toso S. 1993. Biologia e gestione del cinghiale. Istituto nazionale per la Fauna selvatica. Documenti tecnici, 5:1-72.
- Mazzoni E., Battilani P. 2007. La piralide favorisce i funghi che producono micotossine. *L'Informatore agrario*, 63, 8:51-54.
- Mazzoni E., Alma A., Michelatti G., Conti M., Cravedi P. 2008. Il caso della diabrotica del mais. *I Georgofili – Quaderni* 2007, 6:105-122.
- Nicoli Aldini R., Bernini M., Gabbiani S. 2008. Sulla presenza del gambero rosso della Luisiana, *Procambarus clarkii* (Girard, 1852), nel Mantovano (Lombardia, N Italia) Crustacea decapoda, Cambaridae. *Atti Soc. it. Sci. Nat. Museo civ. Stor. Nat. Milano*, 149:145-150.
- Trocchi R. 2007. Prevenzione e risarcimenti per contrastare i danni da lepre. *L'Informatore agrario* 63, 37:82-84.
- Trocchi V., Riga F. 2005. I Lagomorfi in Italia. Linee guida per la conservazione e la gestione. Min. Politiche Agricole e Forestali. Ist. Naz. Fauna selvatica. Documenti tecnici, 25:1-128.
- Viggiani G., Filella F., Delrio G., Ramassini W., Foxi C. 2009. *Tuta absoluta*, nuovo lepidottero segnalato anche in Italia. *L'informatore Agrario*, 65, 2:66-68.

Insetti e cambiamento climatico: stato dell'arte e prospettive

Andrea Battisti*

*Dipartimento di Agronomia Ambientale e Produzioni Vegetali, Università degli Studi di Padova
Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro (Padova)*

Società Entomologica Italiana, Sezione Entomologia Agraria

Riassunto

Il cambiamento climatico agisce in modo diretto e indiretto nei confronti degli insetti. L'azione diretta consiste nel causare l'espansione dell'areale in latitudine e in altitudine, in particolare per le specie delle zone temperate dell'emisfero settentrionale, e nell'indurre cambiamenti fenologici. Tali effetti possono avere conseguenze rilevanti nella dinamica di popolazione e nei danni economici che questi insetti possono causare. L'aumento della temperatura ha causato l'innalzamento delle zone colpite da specie termofile e l'aumento del numero di generazioni in specie polivoltine. Gli effetti indiretti consistono principalmente nell'alterazione della qualità nutritiva dell'ospite, che si ripercuote a livello di organismi antagonisti, competitori e mutualisti.

Parole chiave: cambiamento climatico, insetti, espansione dell'areale, velocità di sviluppo.

Summary

INSECTS AND CLIMATE CHANGE: STATE OF THE ART AND PERSPECTIVES

The climate change may affect insects directly and indirectly. Climate change has been claimed to be responsible of the range expansion northward and upward of several insect species of northern temperate regions, as well as of changes in the seasonal phenology. Several papers have dealt with the prediction of the most likely consequences of the climate change on the phytophagous insects, including some of the most important pests. The temperature is affecting either the survival of the insects which are active during the cold period, such as the pine processionary moth, or the synchronization mechanism between the host and the herbivores, as in the case of the winter moth. An increase of temperature may alter the mechanism by which the insects adjust their cycles to the local climate (diapause), resulting in faster development and higher feeding rate. Indirect effects of climate change have also to be considered, such as those mediated by plants, natural enemies, competitors, and mutualists.

Key-words: climate change, insects, range expansion, performance.

Introduzione

Gli effetti del cambiamento climatico sugli esseri viventi sono riconosciuti dal livello individuale a quello di comunità, consistendo principalmente in variazioni degli areali dipendenti principalmente dalla temperatura (Walther et al., 2002; Root et al., 2003; Hickling et al., 2006). Essendo il numero di insetti per unità di superficie inversamente proporzionale alla latitu-

dine e alla quota (Speight et al., 2008), è possibile concludere che l'aumento della temperatura provochi un'espansione latitudinale e altitudinale di molte specie, in particolare di quelle con ampio areale che comprendono numerosi parassiti delle piante. Questa ipotesi è suffragata da prove fossili relative a risposte a cambiamenti climatici avvenuti in un lontano passato: le impronte di attività trofiche di fitofagi sono significativamente aumentate nella transizione

* Autore corrispondente: tel.: +39 049 8272804; fax: +39 049 8272810. Indirizzo e-mail: andrea.battisti@unipd.it

Paleocene-Eocene, caratterizzata da un aumento della temperatura (Wilf e Labandeira, 1999).

Secondo le previsioni attuali di aumento della temperatura (Solomon et al., 2007) si possono aspettare profondi cambiamenti a livello della biosfera. Per quanto riguarda gli insetti, ci sono vari modi di risposta al cambiamento climatico (Williams e Liebhold, 1995; Ayres e Lombardero, 2000; Harrington et al., 2001; Bale et al., 2002; Parmesan, 2006). In primo luogo ci si aspetta un aumento della velocità di sviluppo, seppure nei limiti vitali di ciascuna specie, associato a una crescita del numero di generazioni e all'alterazione dei piani di sviluppo basati su meccanismi di diapausa prolungata. Le specie che possono meglio cogliere tale occasione sono quelle caratterizzate da elevato potenziale di crescita, polivoltinismo e assenza di diapausa prolungata. La riduzione del periodo di tempo passato come larva o pupa comporta un aumento della sopravvivenza per una minore esposizione ai fattori di mortalità (Bernays, 1997). La crescita demografica a sua volta può comportare un'ulteriore espansione dell'areale, con la possibilità di incontrare nuove piante ospiti per le specie polifaghe (Harrington et al., 2001; Stastny et al., 2006).

Le specie che dipendono da una sincronizzazione favorevole con le fasi di sviluppo della pianta ospite, come ad esempio *Operophtera brumata* (L.) (Lepidoptera, Geometridae), possono subire un effetto diretto del clima e uno indiretto attraverso la pianta ospite (Buse e Good, 1996). Altri effetti indiretti sono causati dagli antagonisti naturali, che rispondono ovviamente sia al clima sia alla disponibilità di vittime. Questo è il caso di un parassitoide di *O. brumata*, che risulta essere efficace a bassa quota e del tutto assente al margine superiore dell'areale (Kerslake et al., 1996). Anche l'aumento del biossido di carbonio può indurre effetti indiretti, alterando la qualità della pianta e di conseguenza lo sviluppo degli erbivori e dei loro antagonisti (Hunter, 2001).

Espansione dell'areale e nuovi ospiti

Le anomalie climatiche sono eventi che, come visto, possono determinare colonizzazioni di nuove aree o nuovi ospiti, come osservato nel caso della processionaria del pino *Traumatocampa pityocampa* Denis e Schiffermüller (Lepidoptera, Notodontidae) (Battisti et al., 2005; Battisti e Faccoli, 2007). Un processo del tutto analogo si osserva nel caso del coleottero scoli-tide *Tomicus destruens* (Wollaston) (Coleoptera, Curculionidae), noto e comune parassita di pini mediterranei. Il riscaldamento globale sta infatti determinando un'espansione altitudinale dell'insetto, portandolo a contatto con specie continentali di pini, finora non annoverati fra le sue piante ospiti. Esperimenti preliminari hanno dimostrato che *T. destruens* è in grado di colonizzare anche specie continentali di pino, quali il pino nero (*Pinus nigra* Arnold) e il pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.). Nonostante gli adulti ne colonizzino le cortecce, il pino silvestre non sembra tuttavia essere un ospite adatto a garantire la schiusa delle uova e il completo sviluppo delle larve. In termini di fecondità delle femmine, lunghezza del tempo di sviluppo e longevità degli adulti neo-formati, il pino nero mostra invece risultati simili a quelli ottenuti da allevamenti condotti con pini mediterranei (Faccoli, 2007). Osservazioni di campo condotte in vari paesi mediterranei hanno già evidenziato casi di popolazioni di *T. destruens* che hanno ampliato il loro areale fino ad entrare in formazioni costituite da specie continentali di pino dove trovano nei pini neri nuovi ospiti idonei al loro sviluppo.

Per una specie di rilevante interesse agrario, la mosca dell'olivo (*Olea europaea* L.) *Bactroceraleae* (Gmelin) (Diptera, Tephritidae), è stato sviluppato un modello fisiologico di risposta al cambiamento climatico, applicato sia in Nordamerica (Arizona e California) e in Italia con tre scenari di aumento della temperatura (Gutierrez et al., 2009). Siccome la mosca dell'olivo è al momento limitata dalla temperatura elevata nella parte meridionale dell'areale e dal freddo a settentrione, si prevede una riduzione degli attacchi a sud e un aumento al nord (Ponti et al., 2009).

Performance e mortalità

Il cambiamento climatico può avere effetti diretti importanti anche agendo per esempio sulla sopravvivenza di alcuni stadi di sviluppo degli insetti forestali. Recenti studi condotti sulle Alpi orientali hanno al riguardo dimostrato che la mortalità invernale delle popolazioni del bostrico tipografo (*Ips typographus* (L.)) (Coleoptera, Curculionidae) è strettamente dipendente

dalle temperature minime invernali ma anche dallo stadio di sviluppo considerato. In particolare è emerso che nel corso dell'inverno le popolazioni campionate hanno subito una mortalità media pari a circa il 50% degli individui; tuttavia tale mortalità si è concentrata principalmente sulle forme pre-immaginali – per lo più larve di vari stadi – derivate dall'avvio di una seconda generazione interrotta prima del suo completamento dall'arrivo dell'inverno (Faccoli, 2009). In questo caso, il riscaldamento globale può agire sulle popolazioni degli insetti sia attenuando le minime invernali, e quindi la mortalità, sia accelerando i ritmi estivi di sviluppo della seconda generazione, permettendo così alla specie di affrontare l'inverno in uno stadio più resistente, quello di adulto.

Fenologia e sviluppo

Un recente studio dell'andamento climatico sulle Alpi orientali associato all'analisi dei principali parametri bio-ecologici delle locali popolazioni di *I. typographus* ha dimostrato l'esistenza di una serie di chiari effetti di temperatura e precipitazione, e delle loro variazioni temporali, sulla fenologia e dannosità di questo pericoloso parassita dell'abete rosso (Faccoli, 2009). In particolare, dal 1922 al 2007 le precipitazioni primaverili del periodo marzo-luglio, epoca di massima attività fisiologica della pianta ospite e dell'insetto, sono diminuite di circa 200 mm (-22%), mentre dal 1962 al 2007 le temperature medie degli stessi mesi sono aumentate di circa 2 °C (+13%). I danni causati da *I. typographus* sono risultati essere inversamente correlati con le precipitazioni di marzo-luglio dell'anno precedente, ma non con le temperature. Aumenti della temperatura primaverile hanno tuttavia determinato variazioni della fenologia dell'insetto, anticipando lo sfarfallamento degli svernanti – e quindi l'avvio della prima generazione – di circa 20 giorni in 12 anni. Questo ha inoltre indotto un più precoce avvio della seconda generazione e quindi, come visto, una probabile minore mortalità invernale.

Funzionamento degli ecosistemi

Recenti estati particolarmente calde e siccitose hanno determinato l'avvio di gravi infestazioni

di insetti forestali, ed in particolare di coleotteri scolitidi, a carico di conifere. Tutto ciò ha causato la scomparsa o comunque l'alterazione di estese superfici forestali in molte regioni delle Alpi meridionali. Fra gli ecosistemi più colpiti vi sono indubbiamente le formazioni di pino silvestre, diffusamente colpite da pullulazioni dello scolitide *Ips acuminatus* (Gyllenhal) (Coleoptera, Curculionidae) (Faccoli et al., 2007). Nella maggior parte dei casi le infestazioni di *I. acuminatus* segnalate sul territorio nazionale interessano pinete con prevalente funzione protettiva e paesaggistica; si tratta infatti di boschi situati in aree ad alta frequentazione turistica estiva e invernale. La loro presenza costituisce dunque un elemento insostituibile del paesaggio alpino che può venire gravemente compromesso dalla presenza di nuclei di piante morte in piedi visibili anche a chilometri di distanza. Inoltre le pinete di pino silvestre rappresentano spesso formazioni pioniere edificate su ghiaioni di sfaldamento di rocce carbonatiche, ambienti difficili e instabili che non consentono un'agevole evoluzione di suoli e soprassuoli e che sarebbero difficilmente colonizzabili occupabili da altre specie arboree. Si tratta di colonizzazioni spontanee di pendii franosi lasciate crescere senza cure particolari, e che ora si trovano frequentemente esposte ad avversità di natura parassitaria indotte dalle difficili condizioni stagionali e dalla compromessa vigoria degli alberi. In tale sfavorevole situazione vegetativa, i cambiamenti climatici – fra cui il variato ritmo delle precipitazioni, la sempre più breve e sottile copertura nevosa e le crescenti temperature estive (Solomon et al., 2007) – possono contribuire ad innescare gravi processi di deperimento. Le recenti anomalie climatiche sembrano infatti avere un ruolo determinante negli equilibri fra piante ospiti e fitofagi (Rouault et al., 2006), indebolendo i primi a vantaggio dei secondi o influenzandone profondamente la diffusione, come osservato nel caso di altri parassiti forestali (Battisti et al., 2005 e 2006).

Conclusioni

Il problema delle intense pullulazioni di insetti forestali presenta anche forti risvolti di natura

sociale. Vi sono infatti nuove esigenze di protezione dei boschi dettate ad esempio da fini estetico-paesaggistici o ricreativi, come nel caso delle estese defogliazioni che spesso modificano l'aspetto di ampi versanti, creando allarme nell'opinione pubblica, o dagli intensi attacchi di scolitidi in pinete litoranee o alpine di località turistiche. Nel quadro biocenotico non sono inoltre da trascurare le conseguenze dell'aumentata disponibilità di prede animali a favore di uccelli e mammiferi insettivori. Ciò riveste un particolare interesse per quanto riguarda la qualità degli habitat di specie a rischio, individuate nell'ambito delle reti di protezione della natura.

Ringraziamenti

Gli autori sono riconoscenti alla Regione del Veneto, Servizi Fitosanitari e Servizi Forestali, per il sostegno al presente lavoro nell'ambito del progetto "Monitoraggio fitosanitario delle foreste".

Bibliografia

- Ayres M.P., Lombardero M.J. 2000. Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Sci. Tot. Environm.*, 262:263-286.
- Bale J.S., Masters G.J., Hodkinson I.D., Awmack C., Bezemer T.M., Brown V.K., Butterfield J., Coulson J.C., Farrar J., Good J.G., Harrington R., Hartley S.E., Jones T.H., Lindroth R.L., Press M.C., Symnioudis I., Watt A.D., Whittaker J.B. 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob. Ch. Biol.*, 8:1-16.
- Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A., Larsson S. 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecol. Appl.*, 15:2084-2096.
- Battisti A., Stastny M., Buffo E., Larsson S. 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Glob. Ch. Biol.*, 12:662-671.
- Battisti A., Faccoli M. 2007. Gli insetti forestali nel quadro del cambiamento climatico. *Atti Acc. Naz. It. Entomol.*, 55:49-51.
- Bernays E.A. 1997. Feeding by lepidopteran larvae is dangerous. *Ecol. Entomol.*, 22:121-123.
- Buse A., Good J.E.G. 1996. Synchronization of larval emergence in winter moth (*Operophtera brumata* L.) and budburst in pedunculate oak (*Quercus robur* L.) under simulated climate change. *Ecol. Entomol.*, 21:335-343.
- Faccoli M. 2007. Breeding performance and longevity of *Tomiscus destruens* on Mediterranean and continental pine species. *Entomol. Exp. Appl.*, 123:263-269.
- Faccoli M., Colombari F., Finozzi V., Dal Pont C., Battisti A. 2007. Natural enemy occurrence and *Ips acuminatus* outbreaks in Southern Alps. *Proc. IUFRO "Natural enemies and other multi-scale influences on forest insects"*, 9th-14th September 2007, Vienna, Austria.
- Faccoli M. 2009. Effect of weather on *Ips typographus* (Coleoptera Curculionidae) phenology, voltinism, and associated spruce mortality in the South-Eastern Alps. *Env. Entomol.*, 38:307-316.
- Gutierrez A.P., Ponti L., Cossu Q.A. 2009. Effects of climate warming on Olive and olive fly [*Bactrocera oleae* (Gmelin)] in California and Italy. *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-008-9528-4.
- Harrington R., Fleming R.A., Woiwod I.P. 2001. Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted? *Agr. For. Entomol.*, 3:233-240.
- Hickling R., Roy B.R., Hill J.K., Fox R., Thomas C.T. 2006. The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Glob. Ch. Biol.*, 12:450-455.
- Hunter M.D. 2001. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on insect-plant interactions. *Agr. For. Entomol.*, 3:153-159.
- Kerslake J.E., Kruuk L.E.B., Hartley S.E., Woodin S.J. 1996. Winter moth *Operophtera brumata* (Lepidoptera: Geometridae) outbreaks on Scottish heather moorlands: effects of host plant and parasitoids on larval survival and development. *Bull. Entomol. Res.*, 86:155-164.
- Parmesan C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37:637-639.
- Ponti L., Cossu Q.A., Gutierrez A.P. 2009. Climate warming effects on the *Olea europaea*-*Bactrocera oleae* system in Mediterranean islands: Sardinia as an example. *Glob. Ch. Biol.*, 15:2874-2884.
- Root T.L., Price J.T., Hall K.R., Schneider S.H., Rosenzweig C., Pounds J.A. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421:57-60.
- Rouault G., Candau J.N., Lieuter F., Nageleisen L.M., Martin J.C., Warzée N. 2006. Effects of drought and heat on forest insects populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.*, 63:613-624.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Alley R.B., Berntsen T., Bindoff N.L., Chen Z., Chidthaisong A., Gregory J.M., Hegerl G.C., Heimann M., Hewitson B., Hoskins B.J., Joos F., Jouzel J., Kattsov V., Lohmann U., Matsumoto T., Molina M., Nicholls N., Overpeck J., Raga R., Ramaswamy V., Ren J., Rusticucci M., Somerville

- le R., Stocker T.F., Whetton P., Wood R.A., Wratt D. 2007. Technical Summary. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Speight M.R., Hunter M.D., Watt A.D. 2008. Ecology of insects: concepts and applications. Blackwell Science, Oxford, UK.
- Stastny M., Battisti A., Petrucco Toffolo E., Schlyter F., Larsson S. 2006. Host plant use in the range expansion of the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa*. Ecol. Entomol., 31:481-490.
- Walther G-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. 2002. Ecological responses to recent climate change. Nature, 416:389-395.
- Wilf P., Labandeira C.C. 1999. Response of plant-insect associations to Paleocene-Eocene warming. Science, 284:2153-2156.
- Williams D.W., Liebhold A.M. 1995. Herbivorous insects and global change – potential changes in the spatial-distribution of forest defoliator outbreaks. J. Biogeogr., 22:665-671.

Opzioni e strategie operative nella gestione delle malerbe per la mitigazione del rischio di contaminazione delle acque superficiali da ruscellamento e deriva

Aldo Ferrero^{*1}, Roberta Masin², Marco Milan, Stefan Otto³,
Francesco Vidotto¹, Giuseppe Zanin²

¹Dipartimento di Agronomia, Selvicoltura e Gestione del Territorio, Università di Torino
Via Leonardo da Vinci 44, 10095 Grugliasco (TO)

²Dipartimento di Agronomia Ambientale e Produzioni Vegetali, Università di Padova
Agripolis – Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro (PD)

³CNR, Istituto di Biologia Agro-ambientale e Forestale
Agripolis – Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro (PD)

Società Italiana per la Ricerca sulla Flora Infestante (SIRFI)

Riassunto

L'importanza della qualità delle acque superficiali è riconosciuta da tempo dalla società civile e la loro salvaguardia è sancita da numerosi provvedimenti legislativi a livello comunitario, che definiscono una politica di uso razionale e sostenibile delle risorse idriche, ottenibile anche ricorrendo a strategie di difesa delle colture maggiormente rispettose dell'ambiente. Il sistema delle acque superficiali e altri comparti sensibili possono essere soggetti al rischio di contaminazione da parte di prodotti fitosanitari impiegati in agricoltura, principalmente a causa di fenomeni di ruscellamento e deriva. L'interposizione fra campo coltivato e area sensibile da proteggere di un'area non trattata (area di rispetto) costituisce una valida tecnica per mitigare gli effetti di ruscellamento e deriva. Possono essere adottate varie tipologie di aree di rispetto, caratterizzate da diverse modalità di realizzazione e gestione, spazio occupato ed efficacia ottenibile. I risultati di numerose ricerche italiane e internazionali consentono di fornire indicazioni per un corretto impiego delle aree di rispetto e di altre misure di mitigazione, nonché sulla possibilità di combinare tra loro diverse misure. Queste informazioni sono da considerarsi essenziali per una corretta adozione delle recenti normative europee, ed in particolare della Direttiva sull'uso sostenibile dei pesticidi (Dir. 2009/128/CE).

Parole chiave: Fasce tampone, diserbanti, apparecchiature distribuzione prodotti fitosanitari, mitigazione.

Summary

WEED MANAGEMENT OPTIONS AND STRATEGIES FOR MITIGATION OF CONTAMINATION RISK OF SUPERFICIAL WATERS FROM PESTICIDE RUNOFF AND DRIFT

The importance of the quality of superficial waters is largely recognized by the public opinion and by EU legislative acts aimed at increasing the sustainability of water resources exploitation. The use of pesticides in agriculture may represent a source of contamination for superficial waters and other sensitive environmental compartments. Main processes involved are runoff and particle drift. The inclusion of untreated areas (no spray zones, buffer zones, etc.) between the field and the area to be protected from contamination is an efficient system to mitigate the effects of both runoff and drift. Several types of untreated areas may be adopted, each showing different characteristics, management, spatial requirements and mitigation degree. Results from several studies give the basis for a correct adoption of untreated areas and other mitigation measures and suggest the possibility to combine different mitigation measures together, in order to obtain a stronger effect. This information is crucial for a correct implementation of the most recent EU legislation, as in the case of the Directive on sustainable use of pesticides (Dir. 2009/128/CE).

Key-words: buffer strips, herbicides, sprayers, mitigation.

* Autore corrispondente: tel.: +39 011 6708780; fax: +39 011 6708798. Indirizzo e-mail: aldo.ferrero@unito.it

L'analisi degli articoli più citati sulla rivista *Agronomy for sustainable development* ha evidenziato gli argomenti di maggiore interesse negli ultimi 10 anni (Lichtfouse et al., 2010). I primi tre sono: piante transgeniche, biocarburanti e gestione agronomica alternativa. In questo contesto si inseriscono varie tecnologie, tra le quali anche le zone di rispetto per ridurre la contaminazione delle acque superficiali.

L'esigenza di salvaguardare le acque superficiali è il risultato di una accresciuta sensibilità della società civile verso l'ambiente e, più in generale, verso la qualità delle produzioni, sempre più intesa non solo come qualità organolettica e igienico sanitaria ma anche come qualità e sostenibilità del processo produttivo. Del resto l'attuale PAC basata sulla "condizionalità" prevede aiuti svincolati dalla produzione e legati al rispetto di criteri di sostenibilità ambientale e sociale dell'attività agricola (De Castro, 2010), e l'aiuto che l'agricoltore riceve serve per compensare i comportamenti utili alla società. In questo rinnovato contesto l'agronomia non deve ridursi a scienza che studia come aumentare le rese ma anche dare risposte alla società perché l'agricoltura è il nostro oggi e il nostro domani. Gli agronomi devono allora ripensare il loro ruolo nella società.

I prodotti fitosanitari sono per il momento difficilmente sostituibili e il loro impiego è divenuto, rispetto al passato, più razionale ed attento. Nonostante gli indubbi miglioramenti a livello di conoscenze, di modalità di impiego e di molecole a disposizione, il problema ambientale legato al loro uso è tuttora presente, in par-

ticolare per l'acqua, sia profonda, sia superficiale.

Obiettivo del presente lavoro è illustrare i metodi che permettono di ridurre la contaminazione delle acque superficiali da ruscellamento e deriva. La UE ha evidenziato la necessità di affrontare questo aspetto e lo ha reso centrale nell'ambito della Strategia Tematica sull'Uso Sostenibile dei Pesticidi.

Misure di mitigazione del ruscellamento superficiale nei terreni di pianura

Le misure per mitigare le conseguenze ambientali del trasporto per ruscellamento superficiale dei prodotti fitosanitari sono numerose e possono essere classificate in *dirette* e *indirette*, le prime si devono attuare al di fuori del campo coltivato, cioè nell'ecotono tra campo coltivato e corpo idrico, oppure esternamente all'ecotono (è il caso delle *wetlands*), le seconde all'interno del campo coltivato. In questo quadro, il solco può essere visto sia come misura diretta che indiretta (fig. 1).

Definizioni

In letteratura, soprattutto in quella americana, esistono vari termini (*no spray zone, buffer zone, buffer strips, vegetative buffer strips, conservation buffer strips, etc.*) per indicare l'interposizione di un'area di terreno non trattata tra il campo trattato con una certa sostanza e il corso d'acqua o un'area sensibile da proteggere da quella sostanza.

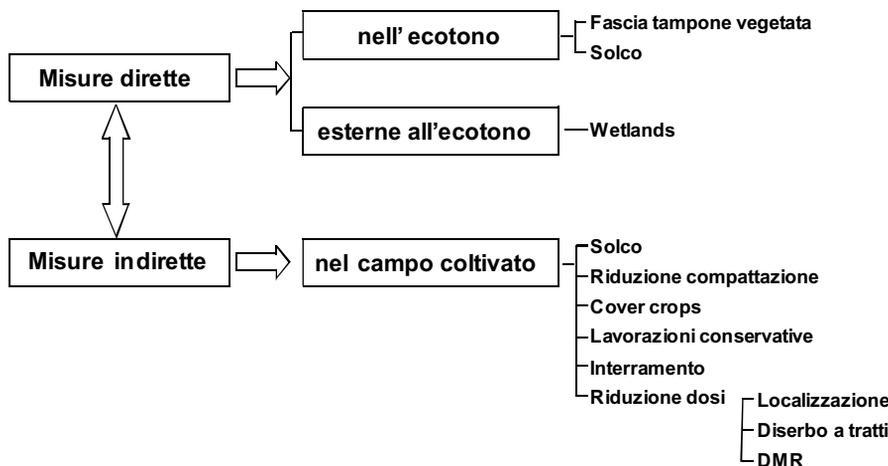


Figura 1. Misure dirette e indirette di mitigazione del ruscellamento superficiale.

Figure 1: Direct and indirect measures of runoff mitigation.

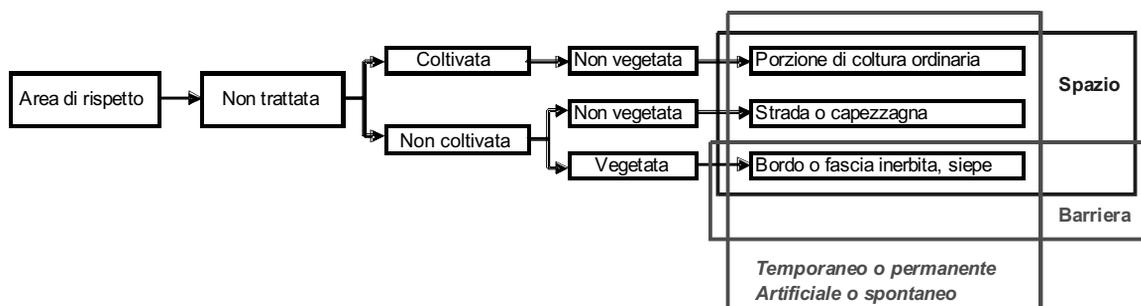


Figura 2. Tipi di aree di rispetto in relazione a localizzazione, struttura, durata e origine.

Figure 2. Classification of buffer strips in relation to localisation, structure, duration and origin.

Per la finalità specifica del presente lavoro si è ritenuto di utilizzare unicamente il termine di *aree di rispetto*, sufficientemente generale da includere tutte le aree con capacità di mitigare la deriva e il ruscellamento superficiale.

Sono possibili molti tipi di aree di rispetto, classificabili utilizzando quattro chiavi di classificazione: coltivata (sì/no), vegetata (sì/no), durata (permanente/temporanea), origine (artificiale/spontanea). Escludendo i casi impossibili e senza valore, la condizione necessaria e sufficiente perché un'area sia di rispetto è che essa sia *non trattata*. Un'area di rispetto è tale perché mette *sempre* "spazio" tra la sorgente inquinante (la barra o l'atomizzatore) e l'oggetto da proteggere (es. il corpo idrico); se in tale spazio si introduce *anche* una "barriera" si incrementa la capacità mitigatrice (fig. 2).

Un'area di rispetto è quindi "una porzione di biotopo agricolo che separa fisicamente l'area trattata da un corpo idrico o da un'area sensibile da proteggere". Essa svolge più funzioni, con efficacia differenziata in relazione alla loro tipologia e localizzazione all'interno del biotopo agricolo.

Se l'area di rispetto è ricavata all'*interno dell'area coltivata* l'efficacia antideriva è antiruscellamento è buona, ancora migliore nel caso della coltura sviluppata.

Se invece l'area di rispetto è ricavata in un'*area non coltivata e non vegetata* essa può ancora svolgere appieno la funzione antideriva ed anche quella antiruscellamento, seppure in misura minore perché il terreno è di solito compatto e con ormaie; in tali condizioni è ridotta l'infiltrazione e favorito lo scorrimento canalizzato dell'acqua di ruscellamento. Come regola generale è particolarmente importante che

quest'area di rispetto sia correttamente posizionata in relazione alla direzione di scorrimento delle acque.

Se l'area di rispetto è costituita da un'*area non coltivata ma vegetata (fascia tampone vegetata)* allora la funzione antideriva permane buona, ma aumenta molto l'efficacia antiruscellamento, grazie alla presenza della vegetazione (in particolare se è densa e permanente), che è in grado di trattenere e rimuovere sedimenti, sostanza organica e altri contaminanti dall'acqua di ruscellamento. Il termine "tampone" introduce il concetto di mitigazione attiva operata dall'azione combinata delle comunità batteriche dei suoli e della vegetazione. La vegetazione agisce sia direttamente (assorbimento dei contaminanti e rallentamento del flusso) sia indirettamente grazie ad alcune modifiche indotte al terreno (aumento della porosità e della sostanza organica) che favoriscono l'infiltrazione e l'adsorbimento dei contaminanti ai colloidi. Il termine *fascia* lascia intendere che si tratta solitamente, almeno nei terreni di pianura, di aree lunghe e strette poste al bordo del campo coltivato, anche se, talvolta, queste possono assumere conformazioni diverse; per tale ragione in Francia si preferisce parlare di "area tampone" (CORPEN, 2007). La vegetazione può essere spontanea o artificiale, erbacea o erbacea e arbustiva; in quest'ultimo caso si parla anche di *fascie tampone boscate*, considerate molto efficaci anche contro la deriva. Particolarmente interessante è la *fascia tampone riparia*, dove il termine riparia indica che la fascia è permanente e occupa un'area generalmente a disposizione del corpo idrico e non interessata, se non parzialmente, dall'esercizio agricolo.

Efficacia delle misure di mitigazione a livello di ecotono: risultati della ricerca internazionale

Come detto, le fasce tampone sono misure efficaci per contrastare la contaminazione delle acque superficiali via ruscellamento (Melcher e Skagen, 2005; Reichenberger et al., 2007).

Un'importante sintesi dei dati disponibili a livello mondiale è presentata nel rapporto dello studio FOOTPRINT (www.eu-footprint.org; Reichenberger et al., 2006), in cui vengono riportati i dati relativi a 277 singole combinazioni (agrofarmaco – larghezza della buffer), raggruppati anche in funzione del K_{OC} del prodotto fitosanitario considerato. La larghezza della fascia considerata in questo *dataset* varia da 2 a 21 metri.

Considerando tutti i prodotti fitosanitari esaminati, la percentuale di riduzione mediana è risultata compresa tra il 65% circa, con una fascia di 2 metri, e il 95%, con fascia di 21 metri. Il 25% dei valori sperimentali tuttavia si trova tra il 50% ed il 10% di riduzione.

Le differenze tra prodotti con K_{OC} maggiore o minore di 1000 L/kg si osservano a partire da fasce di larghezza superiore a 6 metri: con fasce ampie l'effetto di mitigazione nei riguardi di agrofarmaci con $K_{OC} > 1000$ L/kg è più alto di quasi il 15-20%; con prodotti molto adsorbiti si riduce inoltre l'incidenza dei casi con un'efficacia inferiore al 40%. Secondo una valutazione condotta da Arora et al. (2010) l'effetto

del K_{OC} sulla mitigazione delle buffer strips sarebbe leggermente più elevato (45% di riduzione della contaminazione nelle molecole con K_{OC} basso contro il 75% di quelle con K_{OC} alto).

In un'altra rassegna, Garratt e Kennedy (2006) evidenziano come il valore mediano e medio della riduzione delle concentrazioni nei casi peggiori sia del 65 e 62,4% rispettivamente, mentre il valore mediano e medio per le riduzioni nei casi più favorevoli è risultato rispettivamente pari all'83,3% e all'81,4%.

Molti dei dati utilizzati nelle due precedenti sintesi provengono anche da Paesi non europei con condizioni climatiche, pedologiche ed agronomiche molto differenti tra loro. Per questo motivo il gruppo FOCUS (2007) ha costruito un *dataset* con i soli dati provenienti dall'Europa (tab. 1).

Le fasce tampone funzionano leggermente meglio per la riduzione degli agrofarmaci trasportati dai sedimenti.

In Germania si usano valori di riferimento (*benchmark*) che sostanzialmente rispecchiano il modello EXPOSIT (Winkler, 2001), che si basa su un'equazione empirica per calcolare l'efficacia di riduzione (RE) in presenza di *buffer strips* di diversa larghezza (FOCUS, 2007).

$$RE (\%) = 100 - 10^{(-0,083 \cdot \text{larghezza buffer} + 2,00)} \quad (\text{Eq. 1})$$

Il modello SWAT (*The Soil and Water Assessment Tool*) (Arnold et al., 1998) propone in-

Tabella 1. Sintesi dei dati europei sull'efficacia della rimozione dei prodotti fitosanitari dalla fase acquosa e dai sedimenti dell'acqua di ruscellamento in presenza di fasce tampone di diversa larghezza (FOCUS, 2007).

Table 1. Synthesis of the European data on efficacy of removal of pesticides from water and sediments of runoff water in presence of buffer strips of different width (FOCUS, 2007).

Larghezza fascia (m)	Fase acquosa				Sedimenti			
	n.	Min.	Max.	Media	n.	Min.	Max.	Media
1	4	44,00	75,50	61,50	2	48,50	76,50	62,50
2	2	28,57	33,33	30,95				5
4	4	46,00	69,00	61,38	2	64,00	89,50	76,75
5	8	9,95	97,73	62,07	18	11,34	97,73	65,82
6	13	44,00	100,00	84,28	9	72,00	100,00	91,82
7	10	35,00	100,00	77,00	7	-27,00	100,00	64,53
10	23	1,89	99,99	77,21	10	85,62	99,17	95,12
12	13	60,00	100,00	91,71	9	94,00	100,00	98,87
15	13	33,00	100,00	88,25	6	43,00	100,00	88,88
18	7	97,00	100,00	99,15	3	99,90	100,00	99,97
20	10	14,12	98,34	86,06	8	93,21	100,00	97,16
Media				74,51				79,31
Minimo		1,89				-27,00		
Massimo			100,00				100,00	

vece un'altra equazione per stimare l'efficienza di abbattimento ($trap_{ef}$) di sedimenti, nutrienti e agrofarmaci della fascia tampone:

$$trap_{ef} = 0,367 * (larghezza\ buffer)^{0,2967} \quad (Eq. 2)$$

A conclusione di una recente e vasta rassegna di valori, anche Zhang *et al.* (2010) stabiliscono che l'efficacia di rimozione degli agrofarmaci è una funzione esponenziale della larghezza della buffer:

$$RE (\%) = 93,2 * (1 - e^{-0,22 * larghezza\ buffer}) \quad (Eq. 3)$$

dove il fattore 93,2 rappresenta la capacità limite pratica e il fattore 0,22 sintetizza le condizioni micro topografiche e la velocità del ru-

scellamento. Merita osservare che le tre equazioni portano comunque a risultati simili.

Efficacia delle misure di mitigazione a livello di ecotono: alcuni risultati della ricerca italiana

I risultati ottenuti a Padova su terreni in piano con una pendenza attorno all'1% e a Torino, su terreno sciolto sistemato a spianata con una pendenza dello 0,5%, rientrano pienamente nei ranges sopra presentati, come evidenziato nelle tabelle 2 e 3.

Sulla base delle diverse esperienze europee e italiane, si possono quindi definire le possibili riduzioni percentuali di contaminazione dei corpi idrici derivanti dall'utilizzo di fasce tampone, per appezzamenti di pianura. In tabella 4 è riportato il confronto tra l'efficacia di ridu-

Tabella 2. Risultati della sperimentazione di Padova.

Table 2. Results of the experimentation at Padova.

Erbicida	Ampiezza fascia (m)	Volume ruscellamento	Riduzione % Concentrazione	Massa ¹	Anno
Metolacoloro	6	68	45	86	2000
	6	10	47	93	2001
Terbutilazina	6	68	88	92	2000
Isoproturon	6	91	96	98	2001
Terbutilazina	3	80	36	74	2002-03
	6	87	98	99	2002-03
	6	72	57	81	2002-03
Metolacoloro	3	80	65	81	2002-03
	6	87	96	99	2002-03
	6	72	45	84	2002-03
Medie	3	80	51	78	2002-03
	6	69	72	92	2002-03

¹: in g/ha. Da Vianello et al. (2005) e da Otto et al. (2007).

Tabella 3. Risultati della sperimentazione di Torino.

Table 3. Results of the experimentation at Torino.

Erbicida (vedi fig. 1)	Riduzione % ¹	Tipo fascia	Tipo di area di rispetto
Metolacoloro	> 99	6 m, mais non diserbato	Porzione coltura ordinaria
Metolacoloro	> 99	6 m, <i>Festuca arundinacea</i> seminata in contemporanea con mais	Area non coltivata vegetata
Terbutilazina	97-99	6 m, mais non diserbato	Porzione coltura ordinaria
Terbutilazina	98-99	6 m, <i>Festuca arundinacea</i> seminata in contemporanea con mais	Area non coltivata vegetata
Desetil-terbutilazina	94	6 m, mais non diserbato	Porzione coltura ordinaria
Desetil-terbutilazina	93	6 m, <i>Festuca arundinacea</i> seminata in contemporanea con mais	Area non coltivata vegetata

¹: rispetto alla concentrazione (µg/L) dell'acqua conferita al corpo idrico dalla tesi senza fascia tampone. Da Milan et al., 2008.

Tabella 4. Riduzioni percentuali di contaminazione in funzione dell'ampiezza della fascia tampone.

Table 4. Percent reduction of contamination as function of the buffer strip width.

Larghezza fascia (m)	Riduzione (%)			
	Soluzione eq. (1)	Soluzione Eq. (2)	Soluzione eq. (3)	Proposta ¹
0	0	0	0	0
3	43,6	51	45	45
5	61,5	59	62	55
6	68,2	62,5	68	65
10	85,2	73	83	85
15	94,3	82	90	90
20	97,8	89	92	98

¹: del Gruppo *ad hoc* della Commissione Consultiva per i Prodotti Fitosanitari, Ministero Salute (CCPF, 2009).

zione con fasce di diversa ampiezza ottenuta con le varie equazioni, e quella stabilita dalla Commissione Consultiva per i Prodotti Fitosanitari del Ministero della Salute sulla base dei risultati disponibili a livello italiano (CCPF, 2009). Come è evidente dal confronto con le tabelle 2 e 3, si tratta di una proposta cautelativa.

Merita al riguardo osservare che le percentuali di abbattimento della contaminazione si riferiscono a fasce tampone vegetate in buono stato di manutenzione, quindi permanenti. I corpi idrici in sostanza dovranno essere protetti da fasce tampone di diversa dimensione in funzione della tossicità dei prodotti fitosanitari verso gli organismi non bersaglio.

L'inserimento nel territorio di fasce tampone vegetate si configura come un intervento di gestione del territorio, organizzato e sostenuto anche finanziariamente da Enti, in particolare quelli territoriali. In questa logica al centro dell'attenzione non è da porre tanto il prodotto fitosanitario, quanto il corso d'acqua, che richiede in linea di principio una fascia di protezione permanente da tutte le sostanze tossiche.

Vale la pena infine di ricordare che la sperimentazione eseguita in Italia sui terreni di pianura ha evidenziato una perdita di erbicidi molto bassa e dell'ordine di pochi g/ha (il range di valori nei terreni senza fascia è compreso tra 0,69 e 25 g/ha, con valore mediano di 3,27 g/ha, per prodotti usati alle dosi di 2100-1000 g/ha). Le perdite più elevate si sono riscontrate in concomitanza di elevate precipitazioni, verificatesi nei giorni immediatamente successivi alla distribuzione dell'erbicida e con terreno già umi-

do. Se queste condizioni non si verificano, le perdite per ruscellamento superficiale sono praticamente nulle (Cardinali et al., 2008).

Il *German Federal Office for Environmental Protection* (UBA) stima che l'1-2% delle quantità di agrofarmaci utilizzati in agricoltura entri nei corpi idrici con il ruscellamento superficiale (Berezen et al., 2005). Vianello et al. (2005) e Otto et al. (2007) evidenziano mediamente una perdita inferiore allo 0,5 % con un picco massimo di 1,4%; tali valori sono leggermente inferiori a quelli individuati dall'UBA, in quanto sono da porre in relazione a terreni in piano.

Va altresì osservato che dall'analisi dei risultati della letteratura internazionale appare una enorme variabilità dei dati in funzione dell'ampiezza della fascia (Lacas et al., 2005).

Un'altra misura diretta per la mitigazione del ruscellamento superficiale è il *lagunaggio*, che consente all'acqua di sostare per un certo periodo (almeno un giorno) e ridurre il proprio carico di contaminanti grazie alla deposizione dei sedimenti ed all'azione della vegetazione presente, in particolare delle macrofite (Schulz e Peall, 2001; Rogers e Stringfellow, 2009). Questo aspetto è stato affrontato all'interno del progetto EU-LIFE, ArtWET (Gregoire et al., 2009), con la conclusione che la perdita di agrofarmaci può essere ridotta del 50-80% se il flusso all'interno della *wetland* viene ottimizzato e se si riesce ad aumentare di 10 volte il tempo di ritenzione dell'acqua al suo interno. Si tratta quindi di una tecnica molto interessante di cui andrebbero approfonditi gli aspetti operativi (dimensionamento, rapporto area della *wetland*/area di conferimento, macrofite da usare...).

Efficacia delle misure di mitigazione a livello di campo coltivato

Le misure indirette per limitare la contaminazione via ruscellamento delle acque superficiali da prodotti fitosanitari, in particolare da erbicidi, sono numerose.

Apertura di un solco

L'apertura di un solco tra l'ultima fila seminata e il corpo idrico, se esso è parallelo alla direzione di semina, oppure in testata del campo, se questa è perpendicolare alla direzione di semi-

na, è una avvertenza semplice che può dare buoni risultati a livello di mitigazione. La corretta localizzazione del solco è decisiva per la sua funzionalità e in ogni caso deve essere ortogonale al flusso di ruscellamento. Deve essere aperto prima o subito dopo il trattamento, avere una profondità di almeno 40 cm ed essere mantenuto in efficienza almeno per un periodo doppio del tempo di dimezzamento medio dell'agrofarmaco. Se viene abbinato alla fascia tampone deve essere posto tra il campo e la fascia stessa in modo che l'acqua di ruscellamento investa la fascia con flusso laminare, lento e verosimilmente meno concentrato; può garantire una mitigazione discreta degli eventi più intensi e molto buona di quelli medio-piccoli. Nella sperimentazione di Padova si è potuto osservare che per eventi non particolarmente importanti basta a volte un piccolo avvallamento per ridurre fortemente il ruscellamento nel corpo idrico.

Lavorazioni conservative

Rappresentano un insieme di tecniche di coltivazione che lasciano la superficie del terreno coperta per almeno il 30% dai residui della coltura precedente.

Non ancora molto diffuse in Italia, sono in ogni caso utilizzate in particolare nei cereali autunno-vernini e nella soia di secondo raccolto.

FOCUS, 2007 (vol. 2, p. 72) indica per il trasporto dei volumi di ruscellamento nel caso di utilizzo del *conservation tillage* delle riduzioni comprese tra 0 e 50% per i prodotti fitosanitari poco adsorbiti ai colloidali (basso K_{OC}) e tra 40 e 75% per quelli fortemente adsorbiti.

Merita tuttavia sottolineare che anche se con le lavorazioni conservative si riduce il volume di ruscellamento, in certe sperimentazioni condotte su erbicidi, la concentrazione della molecola è risultata aumentata rispetto alle lavorazioni tradizionali; ciò è stato attribuito all'iniziale intercettazione dell'erbicida da parte dei residui colturali alla superficie del terreno e alla successiva rimozione poco tempo dopo (*washoff*) (Mickelson et al., 2001). Questo risultato è stato ottenuto in particolare nelle sperimentazioni che prevedevano piogge simulate, quasi sempre di forte intensità e in prossimità della distribuzione dell'erbicida (Alletto et al., 2010).

Interramento

L'incorporamento degli erbicidi con una fresatura leggera o con un intervento irriguo per asperzione di 5-10 mm può essere un intervento utile per ridurre le perdite per ruscellamento (Baker e Laflen 1979; Hall et al., 1984). Questa tecnica, non molto usata e poco gradita dagli agricoltori, è comunque possibile, in particolare nel settore orticolo.

FOCUS (2007) indica per il trasporto dei volumi di ruscellamento nel caso di utilizzo del *soil incorporation* delle riduzioni comprese tra 25 e 50% per principi attivi poco adsorbiti ai colloidali e tra 35 e 70% per quelli fortemente adsorbiti. Considerando che l'interramento distribuisce su circa 10 cm di profondità il prodotto, e che il ruscellamento interagisce con i primi 1-2 cm di terreno, si può ritenere che questa tecnica possa ridurre la contaminazione anche del 70% riducendo la quantità di erbicida nella *surface mixing zone*.

Riduzione della dose

L'applicazione per unità di superficie di una dose inferiore a quella indicata in etichetta comporta certamente una riduzione della contaminazione delle acque superficiali. Sulla base del rapporto SAMCO si può ritenere che la percentuale di abbattimento sia pari alla percentuale di riduzione. Nel caso degli erbicidi, uno dei modi per ottenere una riduzione importante della dose di impiego è la *localizzazione* lungo la fila nei trattamenti di pre-emergenza, che comporta una riduzione della dose dal 50% al 70% in relazione alla distanza tra le file della coltura. Questa tecnica richiede un'integrazione efficace tra mezzo chimico e mezzo meccanico, quale la sarchiatura tra le file, e ovviamente non è applicabile nelle colture a interfila stretta. A prescindere dalla localizzazione, la riduzione delle dosi degli erbicidi si può ottenere anche per i trattamenti di post-emergenza a patto che 1) venga eseguito un monitoraggio (*scouting*) efficace della flora infestante, 2) sia garantita la tempestività di intervento su malerbe allo stadio cotiledonare o di poche foglie vere, 3) si sfrutti la sinergia di erbicidi in miscela. Queste indicazioni sono alla base della tecnica delle "Dosi Molto Ridotte (DMR)" (Zanin e Catizo-

ne, 2003). In prospettiva anche l'applicazione del *diserbo a tratti*, secondo i principi dell'agricoltura di precisione può dare un contributo alla riduzione delle dosi di impiego.

Questa tecnica, molto valida ai fini di mitigazione, tuttavia è applicabile dove esiste una buona conoscenza delle caratteristiche dell'infestazione (tipo di malerbe, dinamica delle emergenze...) e una buona organizzazione aziendale.

Colture di copertura

Limitatamente alla funzione di protezione dei corpi idrici, le colture di copertura possono essere definite come colture erbacee seminate all'interno della coltura da reddito e che con essa convivono per un periodo più o meno lungo prima di essere eliminate, chimicamente o meccanicamente. La loro funzione è quella di rallentare lo scorrimento superficiale dell'acqua, favorendo l'infiltrazione e l'adsorbimento ai colloidali grazie ai residui colturali presenti alla superficie del terreno ed alla maggiore porosità del terreno creata dagli apparati radicali. In questa logica la coltura da reddito di solito viene seminata su sodo. In una accezione più ampia si possono considerare anche le colture di copertura seminate durante il periodo di intercoltura tra due colture da reddito.

Questa misura è tecnicamente complessa e costosa e viene usata soprattutto nei terreni in pendio, in particolare nei vigneti. Nei terreni di pianura viene usata con poca convinzione, pertanto non si ritiene utile proporla in pianura come misura di mitigazione, salvo casi specifici

Riduzione della compattazione

Evitare la compattazione del terreno significa non solo migliorare le condizioni di vita per le piante coltivate e i microrganismi del terreno, ma anche ridurre il ruscellamento, in quanto si riduce la velocità di scorrimento dell'acqua e si aumenta la velocità di infiltrazione. La riduzione della compattazione del terreno si può ottenere con l'aumento della sostanza organica, con il traffico controllato e con il ricorso alle lavorazioni conservative (Li et al., 2007), in sostanza con l'impiego di una tecnica agronomica razionale e sostenibile.

Efficacia di mitigazione della contaminazione per ruscellamento superficiale con l'impiego di più misure

La mitigazione risulta molto efficace nel caso in cui si combinano insieme più misure di mitigazione; tale strategia ha il grande vantaggio di ridurre fortemente gli eventi di ruscellamento di minore importanza e di attenuare quelli più rilevanti.

Per calcolare l'efficacia complessiva di più misure di mitigazione sono possibili due tipi di calcolo: additivo o moltiplicativo. In generale è importante specificare a che cosa si riferiscono le singole percentuali di mitigazione: se si riferiscono tutte al ruscellamento iniziale, allora il calcolo è di tipo additivo e l'efficacia complessiva è data dalla somma delle singole efficacie. Se invece sono riferite alla sola frazione di ruscellamento pervenuta in ciascuna, allora va applicato un metodo moltiplicativo, più cautelativo rispetto all'additivo perché calcola una mitigazione complessiva minore. Nella tabella 5 sono indicate le misure ritenute più facilmente integrabili nella normale pratica agronomica e la loro efficacia complessiva calcolata con i due metodi.

La domanda da porsi è la seguente "nella realtà l'effetto della combinazione delle diverse misure è additivo o moltiplicativo?"

Premesso che non ci sono sperimentazioni specifiche sull'azione combinata di più misure di mitigazione, secondo Reichenberger et al. (2007) se le varie misure di mitigazione hanno un'efficacia indipendente le une dalle altre, e se sono coinvolti *pathways* differenti (es. buffer strip e biobed) l'efficacia è additiva; se coinvolgono invece lo stesso *pathway* (es. dose ridotta e buffer strip) allora l'efficacia è di tipo moltiplicativo. In ogni caso l'efficacia complessiva non dipende dall'ordine delle mitigazioni (es. a partire dal campo riduzione delle dosi, solco, fascia).

Se invece esiste una interazione tra le varie misure di mitigazione, l'efficacia complessiva va determinata espressamente, ad esempio con una sperimentazione specifica. È verosimile che l'efficacia complessiva dipenda dall'ordine con cui le misure di mitigazione sono poste in successione. Potrebbe essere conveniente collocare la misura con efficacia e stabilità minore a valle di altre misure che si sono dimostrate più efficaci

Tabella 5. Ipotesi di mitigazione in presenza di fasce tampone di diversa larghezza e di misure di mitigazione aggiuntive, considerando l'effetto additivo o moltiplicativo.

Table 5. Hypotesis of mitigation with buffer strips of different width and additional mitigation measures, considering the additive or multiplicative effect.

Larghezza (m)	Mitigazione % ¹				
	Inserimento fascia tampone	Inserimento Solco ²	Riduzione dose ³	Mitigazione complessiva	
				additiva	moltiplicativa
0	0	20	25	45	40
3	45	20	25	90	67
5	55	20	25	100	73
6	65	20	25	100	79
10	90	20	25	100	94
15	95	20	25	100	97
20	98	20	25	100	99

¹: rispetto al testimone senza alcuna misura di mitigazione, ²: valore proposto per i terreni di piano, ³: valore cautelativo, da considerare anche se la riduzione della dose in campo è percentualmente superiore.

nei confronti degli eventi di ruscellamento più importanti.

Restando nel caso di misure con efficacia indipendente, è molto importante ai fini pratici capire se l'efficacia complessiva di più misure diverse è additiva o moltiplicativa, perché nel primo caso sarebbe molto più facile raggiungere i risultati voluti con un utilizzo di fasce di rispetto relativamente strette (sotto i 5-6 metri), le uniche adatte al contesto italiano.

Resta infine da sottolineare che la fascia tampone, eventualmente con l'aggiunta del solco, è l'ultima linea di difesa contro la contaminazione via ruscellamento; perché la sua efficacia risulti massima deve essere ben costruita, ben posizionata, ben mantenuta e ben abbinata alle "buone pratiche agricole" di gestione del terreno e dei prodotti fitosanitari all'interno del campo. Nel primo caso si tratta di evitare la compattazione, di utilizzare le lavorazioni conservative quando possibile, di migliorare la porosità e la struttura del terreno e di prevenire la formazione della crosta. La gestione dei prodotti fitosanitari si basa invece sulla riduzione delle dosi applicate, sulla selezione dei principi attivi in funzione del contesto pedoclimatico e sulla scelta preferenziale di modalità ed epoche di trattamento in grado di ridurre il rischio di trasporto per ruscellamento (nel caso del diserbo, ad esempio, preferendo i trattamenti di post-emergenza quando possibile e vantaggioso). È importante ricordare che la presenza di una fascia tampone non esime l'agricoltore dal mettere in atto sistemi integrati di difesa, unica stra-

tegia che consente di razionalizzare e soprattutto contenere stabilmente nel tempo l'uso del mezzo chimico.

Misure di mitigazione del ruscellamento superficiale nei terreni declivi

In ambienti collinari o comunque caratterizzati da forte pendenza, il problema della regimazione delle acque assume una particolare rilevanza. In questi contesti diviene più complesso distinguere tra fenomeni di semplice ruscellamento ed erosione. Appare tuttavia evidente come i fenomeni erosivi manifestino un carattere più accentuato in occasione di eventi meteorici di particolare intensità, al contrario del ruscellamento, che avviene solitamente anche in presenza di precipitazioni moderate.

Particolari conformazioni del pendio abbinata a certe pratiche colturali possono in molti casi estremizzare l'uno o l'altro dei due fenomeni. I flussi erosivi e di ruscellamento che si originano da aree coltivate possono rappresentare un potenziale rischio per i corpi idrici, poiché insieme alle acque di deflusso sono trasportati anche materiali organici, nutrienti, sedimenti ed agrofarmaci. Il contrasto dei fenomeni erosivi e di ruscellamento da zone agricole richiede l'adozione di alcune buone pratiche agricole non disgiunte dalle più tradizionali tecniche di regimazione delle acque.

Il controllo dei fenomeni erosivi e di ruscellamento nei terreni in pendio rappresenta una

pratica nella quale l'Italia vanta una lunga tradizione. Le peculiari caratteristiche orografiche di buona parte del territorio italiano hanno infatti determinato lo sviluppo e l'adozione di numerose sistemazioni idraulico agrarie. Queste sistemazioni hanno permesso di contrastare efficacemente i fenomeni erosivi, permettendo la coltivazione di aree marginali altrimenti inaccessibili.

In generale è necessario ricorrere alle sistemazioni tipiche dei terreni in pendio quando la pendenza supera il 5%; al di sotto di tale pendenza si può infatti fare riferimento alle sistemazioni dei terreni di piano (Giardini, 2002). Le sistemazioni dei terreni in pendio rappresentano già di per sé delle significative misure di mitigazione, grazie alla disposizione sapiente di fossi, strade, siepi, terrazze, bande intra-appezzamento ai bordi delle vie di circolazione e collettori.

Tra le diverse sistemazioni idraulico-agrarie ancora presenti nel nostro paese, quella a "cavalcapoggio" e quella a "girapoggio" vantano ancora una discreta diffusione. La prima ancora adottata nel Monferrato, nel Pesarese e nell'Appennino Tosco-Emiliano, adatta a pendenze anche del 30%, è caratterizzata da appezzamenti regolari con scoline disposte a cavalcapoggio. Ciascun filare è solitamente delimitato a valle da un muretto a secco e presenta un distanza da quello successivo variabile tra gli 8 ed i 16 m. La sistemazione a "girapoggio" idonea per pendici regolari, prevede la realizzazione di scoline dotate di una pendenza dell'1-2% e con andamento elicoidale, in modo da delimitare fasce di terreno coltivato, in genere di 4-5m di larghezza (Giardini, 2002).

Queste due sistemazioni permettono un efficace contrasto dei fenomeni erosivi ed anche di ruscellamento, soprattutto se abbinate a misure di mitigazione collaterali, quali ad esempio fasce inerbite in prossimità delle aree di compluvio tra unità colturali adiacenti.

Tra i numerosi fattori che governano il ruscellamento e l'erosione, la pendenza del terreno rappresenta nelle zone declivi il fattore preponderante. Analizzando i risultati di numerosi studi condotti in proposito, è possibile evidenziare come la pendenza sia uno dei fattori maggiormente in grado di influenzare le perdite di prodotti fitosanitari e di diserbanti, in particolare per ruscellamento (ed erosione) (Campa-

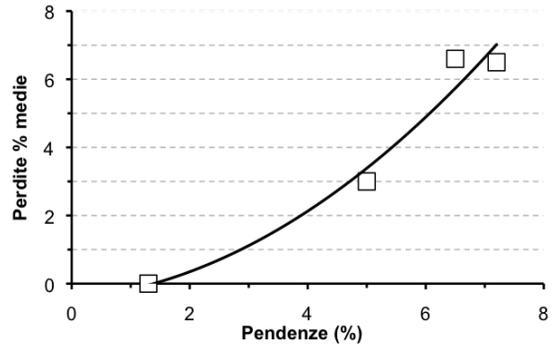


Figura 3. Perdite percentuali medie di atrazina a diverse pendenze (da Campanini et al., 1992).

Figure 3. Average percent losses of atrazine as a function of land slope (from Campanini et al., 1992).

nini et al., 1992). Esiste di fatto una relazione diretta tra pendenza del suolo e quantità di prodotto fitosanitario riscontrata nelle acque di ruscellamento (fig. 3).

In queste condizioni, si rende necessario adottare fasce di rispetto di larghezza tanto maggiore quanto più elevata è la pendenza. Nelle linee guida proposte dalla Iowa State University, per pendenze comprese tra il 10 ed il 20%, si propongono ad esempio fasce di rispetto di almeno 6 m (Smith, 1999) (tab. 6).

Il ruolo della pendenza è complesso e appare spesso molto contraddittorio nella definizione della ampiezza delle fasce di protezione. Occorre infatti tenere presente che le forti pendenze oltre a determinare un aumento della velocità di ruscellamento portano alla comparsa del ruscellamento per saturazione, favorendo lo scorrimento sottosuperficiale, migliorando così il contatto dell'acqua col substrato. Tuttavia a maggiori pendenze corrisponderanno maggiori velocità di scorrimento superficiale e quindi i processi di adsorbimento saranno meno importanti.

Tabella 6. Ampiezza della fascia tampone in funzione della pendenza del terreno (da Smith, 1999).

Table 6. Buffer strip width as a function of the land slope (from Smith, 1999).

Pendenza del terreno (%)	Larghezza minima (m)
0-10	4,5
10-20	6,1
20-30	7,6

Nella determinazione della larghezza della fascia di rispetto si dovrebbe tener conto anche dell'ampiezza della superficie a monte della fascia stessa. Tale approccio, proposto da Bren (1998) in Australia, può tuttavia non trovare una valida applicazione in altre aree geografiche, dalle diverse e peculiari caratteristiche orografiche. Appaiono quindi più vicine alla realtà italiana le indicazioni, generali ed empiriche, proposte in Francia dal CORPEN (Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement).

Nel caso di pendii di lunghezza superiore ai 100 m, questo organismo propone una fascia tampone di ampiezza pari a 20 m, mentre per lunghezze inferiori ai 100 m la larghezza suggerita è di 10 m. Nel caso in cui il ruscellamento risultasse concentrato in corrispondenza di un angolo del campo, allora l'ampiezza della fascia dovrebbe essere compresa tra i 10 ed i 20 m (CORPEN, 2007). Nel nostro paese la maggior parte delle esperienze volte a valutare l'efficacia di misure di mitigazione dei fenomeni di ruscellamento nei terreni in pendio, sono state svolte nelle regioni del centro-sud. Gli studi svolti dall'Università di Bologna (Vicari e Catizone, 2007) hanno permesso di osservare che la presenza di una copertura vegetale è in grado di ridurre le perdite di suolo limitando in maniera importante il fenomeno del ruscellamento. La riduzione dei fenomeni erosivi ottenuta con l'adozione delle lavorazioni conservative

non si traduce sempre in un corrispondente contenimento dei prodotti fitosanitari (tab. 7).

Diversi studi riportano con le tecniche di minima lavorazione o di no-tillage solo un limitato contenimento delle perdite di prodotti fitosanitari. Orsini et al. (2008) in uno studio di lungo termine condotto nell'Italia centrale relativo alle perdite di nitrati per ruscellamento, hanno fatto rilevare che la presenza di una copertura del suolo, così come la diversificazione colturale a livello di superficie aziendale, sono i fattori che più sono in grado di influenzare l'entità dei fenomeni di ruscellamento.

La tecnica dell'inerbimento dell'interfila ha trovato negli ultimi anni il favore degli agricoltori, spesso anche di quelli originariamente diffidenti nei confronti di questa pratica innovativa. La presenza di un cotico erboso tra i filari dei frutteti o dei vigneti assolve contemporaneamente a molteplici funzioni. Tra queste, fondamentali sono la creazione di un habitat per l'entomofauna utile e l'apporto periodico di sostanza organica al suolo a seguito degli sfalci. Funzione altrettanto importante è quella di rappresentare un ostacolo fisico ai fenomeni erosivi e di ruscellamento, con ovvi riflessi positivi in termini di quantità di sedimenti, nutrienti ed agrofarmaci allontanati (Costacurta et al., 2004). Uno studio pluriennale condotto negli anni novanta nelle Marche ha fatto rilevare come in corrispondenza di eventi piovosi anche intensi, la copertura del suolo offerta dall'inerbimento

Tabella 7. Mitigazione tramite l'inserimento delle cover crops ed il tipo di lavorazione delle perdite di erbicidi (da Vicari e Catizone, 2007).

Table 7. Mitigation of herbicide losses as a result of the cover crop introduction and of the type of tillage.

Pendenza del terreno / Anni di sperimentazione	Misura di mitigazione	Risultati
15% 1991-1994	Cover crop di orzo nel mais vs Assenza di cover crop	Riduzione del 70% acqua ruscellata e del 99% del sedimento. Riduzione perdita erbicidi compresa tra 98-99% per la quota in soluzione e tra il 95-98% per quella nel sedimento. Gli erbicidi studiati erano metolacoloro, atrazina, terbutilazina.
15% 1995-1998	Minima lavorazione (ML) vs Lavorazione convenzionale (LC)	La riduzione per le perdite di sedimento è stata del 98% nel grano e del 23% nel mais e per l'acqua rispettivamente del 60 e del 24%. Le riduzioni delle perdite di erbicidi sono risultate comprese, nell'anno più piovoso e quindi indicativo (1996), tra il 20 ed il 33%. Solo la DIA, metabolita dell'atrazina, ha avuto perdite superiori nelle parcelle in ML.

sia in grado di contrastare i fenomeni erosivi molto più di un suolo coltivato a girasole (Balestra et al., 1996). Anche il ricorso alle colture di copertura nel periodo intercolturale, rientra nelle strategie di controllo del ruscellamento e dell'erosione. Questa pratica diviene importante soprattutto in quei periodi dell'anno nei quali il suolo non è occupato dalla coltura ed è quindi maggiormente suscettibile ai fenomeni di ruscellamento ed erosione. Nel caso di prodotti fitosanitari ad elevata persistenza od anche di elementi nutritivi quali azoto e fosforo, nel periodo autunno-vernino possono essere allontanate grandi quantità di prodotto. In queste condizioni le azioni di mitigazione hanno una validità che supera l'arco stagionale.

Una interessante soluzione alternativa, utilizzabile anche nei nostri ambienti, è quella adottata in Francia nella zona dello Champagne. Viene utilizzata la rete viaria che innerva le colline vitate come sistema di convogliamento delle acque di ruscellamento in bacini di temporanea decantazione. All'interno di questi bacini le acque sostano brevemente prima di confluire nei corpi idrici superficiali. Tale sistema permette un significativo abbattimento del carico inquinante delle acque durante circa 10-15 ore, attraverso la sedimentazione e la presenza di macrofite specifiche. Questo sistema di mitigazione rientra nell'ambito del processo noto come "bi attenuazione".

Nelle zone vitivinicole del centro-sud italiano, il clima tipicamente mediterraneo determina un particolare cadenzamento delle precipitazioni che vede i fenomeni di ruscellamento concentrati durante i mesi autunnali ed invernali. In tali regioni, le condizioni di siccità estive rendono la presenza di un cotico erboso spesso incompatibile con la buona riuscita produttiva della coltura. In effetti, la copertura vegetale determinerebbe una forte competizione per l'acqua nei mesi più caldi, con ovvi riflessi negativi sulla produzione. È quindi pratica diffusa mantenere pulito dalle infestanti il terreno attraverso l'impiego di diserbanti ad azione totale. È chiaro tuttavia che la copertura vegetale assicurerebbe nei mesi più piovosi un favorevole contrasto ai fenomeni erosivi e di ruscellamento. Un studio condotto presso l'Università di Reggio Calabria, ha evidenziato come somministrazioni di dosi anche molto contenute di diserbante (glifosate) sono in grado di assicura-

re un efficace controllo della vegetazione infestante, a condizione che l'intervento venga effettuato nella seconda decade di marzo. Con questa modalità di intervento è assicurata una copertura vegetale nei mesi più piovosi dell'anno e garantita anche l'efficacia del diserbante applicato a dosi ridotte (Bombino et al., 2007).

Un aspetto di non trascurabile importanza è rappresentato dalla localizzazione delle fasce tampone. Nel caso particolare dei terreni in pendio i fenomeni di ruscellamento ed erosione devono essere affrontati parallelamente e pertanto le soluzioni proposte devono risultare valide per entrambi gli aspetti. Non è infatti possibile immaginare strategie di intervento distinte, ma interventi mirati ad evitare o limitare in contemporanea i due fenomeni. La realizzazione di barriere vegetate trasversali ai flussi di ruscellamento, rappresenta una tecnica efficace per contrastare il ruscellamento. Le barriere vegetate tuttavia non hanno sempre una larghezza tale da consentire un significativo abbattimento del carico inquinante. Occorre quindi ipotizzare, laddove anche le condizioni orografiche e di frazionamento aziendale lo consentono, la messa in opera di misure che integrino le barriere vegetate e le fasce tampone. In sostanza le barriere vegetate sono un valido strumento solo se inserite in un contesto di buone pratiche agricole finalizzate da un lato, alla salvaguardia della qualità delle acque superficiali e dall'altro alla riduzione della perdita di suolo dalle zone collinari. Nei terreni di piano, il ruscellamento avviene generalmente per mezzo di una lama d'acqua che si sposta uniformemente lungo il profilo del suolo. In ambienti declivi però, i flussi di ruscellamento tendono spesso a concentrarsi in rivoli più o meno intensi, e ad interessare quindi una superficie limitata di terreno. Il concentramento dei flussi di ruscellamento può rendere, in certe condizioni, inutile la presenza delle fasce di rispetto (CORPEN, 2007). I flussi concentrati sono secondo l'USDA la nemica della capacità di trattenuta delle fasce tampone. Inoltre in caso di precipitazioni intense i flussi di ruscellamento possono causare profonde incisioni del suolo, determinando la comparsa di fenomeni erosivi. In queste condizioni, fasce di rispetto ripariali boscate o inerbite prossime al corso d'acqua possono non espletare completamente la loro funzione tampone (Reichenberger et al., 2007).

In presenza di flussi di ruscellamento concentrati appare quindi utile realizzare un sistema che associ fasce di rispetto di modesta larghezza lungo il corpo idrico a fasce di maggiore ampiezza lungo i versanti, in modo da intercettare e ridistribuire i flussi concentrati. In sostanza nei terreni in pendio ai cui piedi si trovano dei corpi idrici da proteggere non si dovrebbe parlare di fascia tampone unica, ma di un “sistema di fasce vegetate di versante” per rallentare ed intercettare a vari livelli i flussi di ruscellamento.

È importante ricordare che le fasce di rispetto non dovrebbero essere considerate come capezzagne o aree di manovra per le macchine aziendali, questo aspetto è particolarmente importante nelle aree declivi. L'inerbimento delle strade di accesso ai terreni coltivati nelle zone collinari, evita che grandi quantità di suolo e con esso anche di prodotti fitosanitari, raggiungano il fondo dei pendii e così i corsi d'acqua. Il continuato transito dei mezzi agricoli, tuttavia comporta la formazione di zone di compattamento le quali ostacolano la crescita della vegetazione e divengono canali preferenziali di scorrimento delle acque. In proposito è possibile interrompere questi flussi realizzando fasce taglia-acqua (piccoli avvallamenti trasversali alla direzione della strada) in grado di convogliare le acque nelle zone laterali della strada, ridistribuendo il flusso verso zone a maggiore capacità assorbente. In alternativa, laddove possibile, è ipotizzabile preferire strade di accesso ai campi coltivati con orientamento non ortogonale alle linee di massima pendenza. Nei terreni in pendio è quindi essenziale un approccio integrato al problema del ruscellamento e dell'erosione basato sull'adozione di un insieme di misure di contrasto in grado di garantire un efficace abbattimento dei rischi di inquinamento dei corpi idrici e di perdita di suolo. Tali misure dovranno però presentare carattere comprensoriale e non essere perciò limitate al singolo appezzamento (CORPEN, 2007).

Misure di mitigazione della deriva

Nella accezione comune, con il termine *deriva* ci si riferisce al fenomeno di trasporto di una parte delle gocce che costituiscono il getto irrorato e che determina il loro depositarsi lon-

tano dal bersaglio. Questo fenomeno si verifica in genere durante l'irrorazione, o immediatamente dopo, e riguarda le gocce che sono state appena prodotte dagli organi delle macchine irroratrici nei quali avviene la polverizzazione della miscela fitoiatrica (ugelli) e che non si sono ancora depositate al suolo o sulla vegetazione.

La presenza di deriva determina il rischio che una parte del prodotto fitosanitario vada a depositarsi su una zona diversa da quella verso la quale è intenzionalmente rivolto il trattamento, con conseguenze negative sia sotto l'aspetto agronomico, sia sotto l'aspetto ambientale.

Dal punto di vista *agronomico*, la deriva può determinare la riduzione dell'efficacia del trattamento, poiché il bersaglio viene raggiunto da una quantità di prodotto fitosanitario inferiore rispetto alla dose prevista. Parimenti, il prodotto fitosanitario che non raggiunge il bersaglio può depositarsi su una coltura sensibile allo stesso e potenzialmente causare fenomeni di fitotossicità.

Dal punto di vista *ambientale*, con la deriva può verificarsi il deposito di prodotto fitosanitario su aree sensibili (es. corpi idrici superficiali) o su aree ad esse adiacenti. Mentre nel primo caso si verifica un inquinamento diretto dell'area colpita, nel secondo caso si creano le condizioni affinché ulteriori fenomeni di trasporto (ruscellamento, in particolare) determinino un inquinamento “differito” dell'area sensibile.

Rispetto alle perdite per ruscellamento o per lisciviazione, il rischio di contaminazione delle acque superficiali a causa della deriva appare generalmente più limitato, soprattutto nel caso di trattamenti effettuati su colture erbacee nei quali il getto viene diretto verso il basso (Huber et al., 2000). Tuttavia, a livello europeo, ed in particolare nei paesi del centro-nord, l'attenzione nei confronti della deriva da parte degli organi competenti in materia di impiego di agrofarmaci ha avuto uno sviluppo maggiore, probabilmente per la maggiore “visibilità” del fenomeno, che può determinare, rispetto al ruscellamento e alla lisciviazione, una esposizione per i corpi idrici più intensa, anche se di più breve durata (Reichenberger et al., 2006). Il fenomeno è più frequente nei trattamenti rivolti alle colture arboree, dove può interessare quantità pari al 30-35% del prodotto distribuito (Ganzelmeier e Rautmann, 2000).

Definizioni

Nel termine *deriva* non viene normalmente compreso il trasporto dell'agrofarmaco attraverso l'atmosfera in forma gassosa, definito generalmente come *volatilizzazione*, né l'allontanamento ad opera del vento di particelle di suolo contenenti il prodotto stesso. Anche il termine anglosassone *drift* viene a volte utilizzato in letteratura per definire la deposizione delle gocce trasportate al di fuori dei bersagli voluti. Tuttavia, in molti casi il termine *drift* viene utilizzato per definire il trasporto dell'agrofarmaco sia in forma di gocce di miscela distribuita, sia in forma di gas, anche perché i due fenomeni possono verificarsi contemporaneamente: durante l'irrorazione una parte dell'agrofarmaco può passare nella fase gassosa a seguito della evaporazione delle gocce.

Per distinguere il trasporto delle gocce e quello in forma gassosa si definiscono una *particle drift* (*application drift, droplet drift, spray drift, primary drift*) ed una *vapor drift* (*dry deposition, evaporation, secondary drift*) (Asman et al., 2003; Wolf, 2000; Wolf e Cessna, 2004; Carlsen et al., 2006a, 2006b; ISO, 2005). Nella nostra lingua si propone di utilizzare i termini *deriva primaria* e *deriva secondaria*. Se non altrimenti specificato, con *deriva* si deve intendere la sola deriva primaria.

Fattori determinanti

La comparsa della deriva e l'entità del fenomeno dipendono da numerosi fattori. Tra i più importanti vi sono le *dimensioni delle gocce* prodotte e le *condizioni climatiche locali* al momento del trattamento (es. umidità dell'aria,

presenza di vento, inversione termica). Le gocce di piccole dimensioni anche se il più importante è rappresentato dalle dimensioni iniziali delle gocce. Quelle più piccole cadono a terra lentamente e sono più soggette al trasporto laterale a seguito del movimento dell'aria. Le gocce con un diametro inferiore ai 100 µm sono maggiormente soggette ai fenomeni di deriva in quanto il loro movimento nell'atmosfera è influenzato più dalla turbolenza dell'aria che dall'azione della gravità (Hobson et al., 1993).

Dopo la fuoriuscita dall'ugello, le gocce perdono progressivamente energia cinetica e raggiungono una velocità di caduta teoricamente stabile (velocità di sedimentazione), risultante dall'azione opposta della forza di gravità e della resistenza dell'aria. La goccia raggiunge la velocità di sedimentazione a una distanza dall'ugello direttamente proporzionale alla dimensione della goccia stessa. Gocce con diametro di 100 µm, ad esempio, raggiungono la velocità di sedimentazione già a 20 cm dall'ugello. In tabella 8 si riportano la velocità di sedimentazione, il tempo di caduta e la distanza di impatto della goccia rispetto alla verticale dell'ugello, per un ugello posto a 50 cm dal suolo e in presenza di un vento di 5 m/s.

Tali valori teorici calcolati per le diverse classi dimensionali delle gocce possono discostarsi molto dai valori reali a causa di numerosi fattori, tra i quali i più importanti sono il vento, l'umidità atmosferica (che condiziona la velocità di evaporazione delle gocce e quindi, indirettamente, le dimensioni delle stesse), la turbolenza dell'aria, la stabilità dell'atmosfera.

Durante il trattamento, aspetti fluidodinamici e aerodinamici concorrono a determinare l'in-

Tabella 8 Relazione tra dimensione della goccia e potenziale di deriva (da Asman et al., 2003, modificata).

Table 8. Relationship between droplet size and drift potential (from Asman et al., 2003, modified).

Diametro gocce [µm]	Velocità di sedimentazione [m/s]	Tempo di caduta (fra uscita goccia e impatto al suolo - ugello a 50 cm dal suolo)* [s]	Distanza di impatto al suolo** [m]
10	0.0030	166.67	231.5
20	0.012	41.67	57.9
50	0.072	6.94	9.6
100	0.25	2.00	2.8
200	0.70	0.71	1.0
500	2.0	0.25	0.3

*: si ipotizza che la velocità di sedimentazione venga raggiunta già all'uscita dall'ugello. **: si ipotizza che le gocce abbiano la stessa velocità di spostamento laterale data dal vento. Si ipotizza che le gocce mantengano le proprie dimensioni durante la caduta (assenza di evaporazione).

sorgenza della deriva, secondo modalità che possono variare molto a seconda della tipologia di macchina irroratrice impiegata (es. barra irroratrice, irroratrice per colture arboree, ecc.) Ad esempio, durante il trattamento con barre irroratrici (come nel caso del diserbo) la massa di gocce in movimento determina la formazione di una corrente d'aria che si sposta parallelamente al getto irrorato e nella stessa direzione. La formazione di questa corrente d'aria parallela al getto genera una depressione che, nel caso di trattamenti diretti verso il suolo con barra irroratrice è parzialmente compensata dall'aria incontrata durante l'avanzamento della macchina. Nel fronte opposto all'avanzamento, tuttavia, la depressione determina il richiamo di aria dalle zone adiacenti, con formazione di turbolenza. Quest'ultima può modificare la traiettoria di caduta delle gocce, in particolare di quelle di più piccole dimensioni, che possono essere addirittura trasportate ad una quota superiore a quella dell'ugello (fig. 4).

In tali condizioni, le gocce possono permanere anche a lungo tempo nell'atmosfera ed essere trasportate lontano dal bersaglio dal vento. Paradossalmente, anche condizioni di aria

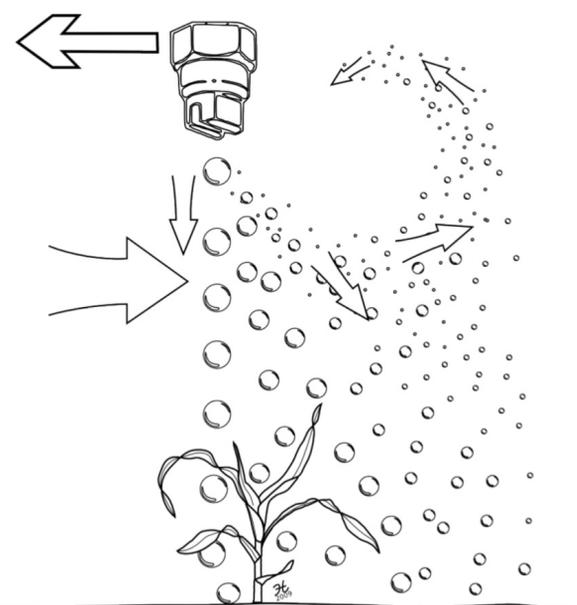


Figura 4. Movimento delle gocce rispetto alla direzione di avanzamento dell'ugello in una barra irroratrice (da Asman et al., 2003, modificata).

Figure 4. Droplet drift in relation of the nozzle movement in a boom sprayer (from Asman et al., 2003, modified).

estremamente calma possono favorire la deriva, in quanto associate spesso a fenomeni di inversione termica. Se l'inversione si manifesta alla quota corrispondente a quella cui si trova la barra irroratrice o la massa di aria turbolenta prima descritta, le gocce possono rimanere sospese a lungo nell'aria ed essere trasportate sottovento per notevoli distanze anche in presenza di venti molto deboli (Wolf, 2000; Klein e Ogg, 2007).

Mitigazione della deriva

Le misure di mitigazione della deriva primaria possono essere di diverso tipo a seconda che siano finalizzate a ridurre la formazione della deriva o che siano volte ad impedirne gli effetti negativi (fig. 5).

Considerando i fattori implicati nell'insorgenza della deriva e nelle sue conseguenze, gli interventi di mitigazione possono essere attuati considerando tre ambiti principali, che possono anche essere visti come tre momenti successivi del fenomeno:

1. *Produzione delle gocce*: intervenendo sulle caratteristiche del getto irrorato e considerando gli aspetti fluidodinamici e aerodinamici connessi (in particolare dimensioni delle gocce e loro velocità);
2. *Trasporto delle gocce*: scegliendo le modalità e il momento di esecuzione del trattamento tenendo in considerazione le caratteristiche degli elementi climatici nell'atmosfera presente fra il punto di irrorazione e il bersaglio (es. temperatura, umidità relativa dell'aria, presenza di vento, turbolenze, inversione termica);
3. *Intercettazione della deriva*: rientrano in questo ambito le pratiche finalizzate a minimizzare l'entità del deposito di gocce alla deriva nell'atmosfera su superfici non bersaglio (es. colture adiacenti, acque di superficie, ecc.).

Produzione delle gocce

Gli interventi possibili si riconducono essenzialmente all'aumento della *dimensione delle gocce* prodotte durante il trattamento e alla modifica delle *condizioni aerodinamiche* nell'intorno del getto irrorato.

Nel primo caso, l'obiettivo da raggiungere è quello di ridurre il più possibile la popolazione di gocce con diametro inferiore a 100 μm . In questo senso, risultati significativi possono esse-



Figura 5. Schema di alcuni possibili interventi per la riduzione della formazione della deriva e del contatto con le superfici da proteggere.

Figure 5. Scheme of several possible measures to reduce drift formation and contact with areas to be protected.

re ottenuti regolando opportunamente la pressione di esercizio: all'aumento della pressione corrisponde, infatti, una riduzione della dimensione delle gocce. Tuttavia, risultati migliori possono essere ottenuti impiegando ugelli specificamente sviluppati per ridurre il rischio di deriva. Nel caso delle barre irroratrici, tra le tipologie più diffuse si ricordano gli ugelli *low drift* (dotati di pre-camera), quelli a specchio a bassa pressione (es. *Turbo TeeJet*) e quelli ad iniezione di aria. Questi ultimi, in particolare, rappresentano attualmente la tipologia forse più diffusa. Tutti gli ugelli antideriva producono un getto nel quale la frazione di gocce di piccole dimensioni è più contenuta rispetto ad un ugello convenzionale. Le dimensioni medie delle gocce prodotte da ugelli di tipo convenzionale, definite attraverso il valore VMD (Diametro Mediano Volumetrico), sono comprese comunemente tra 150 e 300 μm , mentre per gli antideriva il range è compreso tra 400 e 600 μm . Diverse prove (Ganzelmeier e Rautmann, 2000; Marucco e Tamagnone, 2002; Van de Zande et al., 2002), hanno evidenziato come grazie al-

l'impiego di tali ugelli sia possibile ridurre la deriva fino all'80%.

Prendendo come riferimento la deriva potenziale che si osserva nel caso di impiego di ugelli convenzionali in condizioni operative controllate (in galleria del vento, con corrente d'aria di 3,8 m/s, con ugelli posti a 75 cm di altezza e pressione di 3 bar), con gli ugelli antideriva si possono ottenere riduzioni del fenomeno dell'ordine del 40% (*low drift*), del 30% (a specchio a bassa pressione) e fino a oltre l'80% (iniezione d'aria) (Marucco e Tamagnone, 2002).

Un altro aspetto che può condizionare le dimensioni delle gocce e per il quale è crescente l'interesse da parte della ricerca è rappresentato dalle caratteristiche fisico-chimiche della miscela fitoiatrica. In questo senso, gli effetti più marcati sono conseguenti alle particolarità del formulato impiegato, mentre le caratteristiche chemiodinamiche dei principi attivi impiegati sarebbero scarsamente correlate con le dimensioni delle gocce. Additivi diversi possono avere un effetto differente sulle dimensioni delle gocce e l'interazione col tipo di ugello può ri-

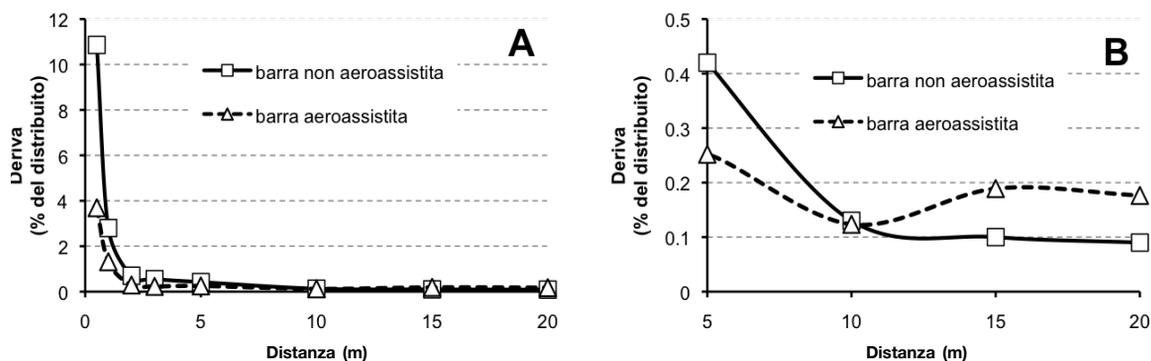


Figura 6. Entità della deriva in un trattamento su prato di *Lolium perenne* (altezza vegetazione 12 cm), utilizzando barra irroratrice dotata di dispositivo di aeroassistenza attivato o disattivato, misurata dal punto di erogazione sino a 20 m di distanza (A). In (B) è indicato il dettaglio relativo a distanze comprese fra 5 e 20 m (da De Schampheleire et al., 2008).

Figure 6. Drift extent measured to up to 20 m distance from the spraying point (A) in a treatment on *Lolium perenne* stand (vegetation height 12 cm) by using a boom sprayer with activated or deactivated air assistance device. In (B) are indicated drift values in the distance range 5 to 20 m (from De Schampheleire et al., 2008).

sultare anche piuttosto complessa (Chapple et al., 1993). In esperienze condotte in Italia, Meriggi et al. (2007) hanno osservato una significativa riduzione della deriva, in particolare alla distanza di 3 e 5 metri dal punto di irrorazione, impiegando un additivo a base di lecitina di soia (Gondor). Oltre a condizionare in modo più o meno marcato la formazione di deriva, i coadiuvanti presenti nel formulato, o aggiunti in modo estemporaneo al momento della preparazione della miscela fitoiatrica, possono indirettamente modificare anche le perdite per evaporazione, rimbalzo e dilavamento delle gocce depositate sul bersaglio e consentire in alcuni casi di ridurre complessivamente le dosi di applicazione (Kudsk e Mathiassen, 2007; Rapparini et al., 2009).

Modificando le caratteristiche aerodinamiche nell'intorno del getto si possono ridurre i fenomeni di turbolenza ed ottenere maggiori velocità delle gocce verso il suolo, riducendo così il loro tempo di permanenza in atmosfera e il rischio che si verifichi deriva.

Tra le soluzioni sviluppate secondo questo tipo di approccio, merita segnalare l'impiego di barre irroratrici aeroassistite, dotate di manica d'aria. Queste macchine sono provviste di un ventilatore assiale che genera un flusso d'aria, il quale viene convogliato lungo un tubo flessibile (detto manica) che decorre lungo la barra, poco al di sopra degli ugelli. Attraverso oppor-

tune aperture, l'aria viene espulsa verso il basso generando un flusso laminare che investe il getto di gocce creato dagli ugelli. In questo modo viene notevolmente ridotto il rischio che si sviluppino moti turbolenti durante l'avanzamento dell'irroratrice e le gocce mantengono elevata la loro velocità di transito dall'ugello al bersaglio. Secondo Van de Zande et al. (2002) tale soluzione consente di ridurre la deriva del 70-80%.

In studi condotti in Belgio operando su un prato di *Lolium perenne*, De Schampheleire et al. (2008) hanno evidenziato una significativa riduzione della deriva con l'utilizzo una barra irroratrice con dispositivo di aeroassistenza attivato rispetto alla stessa barra con il dispositivo disattivato per distanze sino a 5 m dal punto di erogazione. A partire da una distanza di 10 m, tale riduzione non si verifica e si ha addirittura un aumento della deriva per distanze di 15 e 20 m (fig. 6). Sebbene le ragioni di questo comportamento non siano ben chiare, gli autori suggeriscono che il fenomeno si sia verificato poiché si è operato su prato (mantenuto ad una altezza di 10-12 cm), mentre non dovrebbe riscontrarsi su colture con vegetazione maggiormente sviluppata in altezza.

Un ulteriore accorgimento impiegato nelle barre irroratrici per limitare le turbolenze, facilitare la penetrazione delle gocce nella vegetazione e ridurre la deriva consiste nell'orientare

gli ugelli con un angolo diverso da 90° rispetto al suolo. L'utilizzo di ugelli di fine barra con getto asimmetrico crea delle condizioni aerodinamiche sfavorevoli alla formazione di deriva lungo la direzione parallela alla barra, oltre a consentire una maggiore precisione del trattamento in corrispondenza del margine di campo trattato.

Nel caso delle barre irroratrici, con la riduzione dell'altezza della barra aumenta la probabilità che le gocce giungano all'obiettivo (suolo o pianta) prima che la loro perdita di velocità sia tale da determinare la comparsa di deriva. L'abbassamento della barra richiede necessariamente l'uso di ugelli ad ampio angolo di spruzzo. In queste condizioni è però essenziale mantenere il più possibile costante la distanza dal bersaglio durante l'avanzamento per assicurare una copertura di distribuzione uniforme. Questo accorgimento consente riduzioni della deriva anche considerevoli. Prove condotte dal DEIAFA dell'Università di Torino indicano, ad esempio, una riduzione della deriva del 45% a seguito di una relativamente modesta riduzione dell'altezza della barra (da 80 a 60 cm; Balsari e Marucco, 2009).

Ulteriori interventi in questo ambito si basano sul principio di isolare in uno spazio limitato il sistema ugello-atmosfera-bersaglio. Rientrano in questa categoria, ad esempio, i dispositivi dotati di ugelli schermati. Questa tecnica consente di abbattere la deriva quasi a zero ma è applicabile efficacemente solo in alcune condizioni, come ad esempio nel diserbo localizzato.

Trasporto delle gocce

Sebbene possano rientrare in parte in questo ambito di intervento anche le misure intese a modificare la distanza fra punto di irrorazione e bersaglio, sono da considerarsi in questa sezione i fattori che influenzano il movimento delle gocce una volta che esse hanno mancato il bersaglio. Tra i più importanti, vi sono tutte le *variabili climatiche* in grado di condizionare la longevità delle gocce e la loro permanenza in sospensione nell'atmosfera.

Tra le variabili climatiche il *vento* è certamente il fattore più critico per quanto riguarda il rischio di deriva in quanto maggiore è la sua velocità e maggiore è l'allontanamento delle gocce dal bersaglio. Nelle normali condizioni operative è sempre opportuno trattare con velocità del vento inferiore a 5 m/s (cioè 18 km/h).

In relazione al rischio di esposizione di aree sensibili (colture su cui il prodotto distribuito può risultare dannoso, corsi d'acqua, ecc.), particolare importanza assume anche la direzione del vento che non deve favorire il trasporto delle gocce irrorate verso tali aree.

Anche il movimento dell'aria in senso verticale può contribuire notevolmente alla deriva; questo aspetto è spesso trascurato o considerato di importanza secondaria. Questo fenomeno è normalmente più accentuato in assenza di vento, quando la temperatura dell'aria vicino al suolo è più bassa di quella negli strati superiori (inversione termica).

L'umidità bassa e la temperatura elevata favoriscono l'evaporazione riducendo la dimensione delle gocce ed aumentando la deriva potenziale. In tal senso, come regola generale, è opportuno trattare quando l'umidità dell'aria è superiore al 70% (Klein e Ogg, 2007).

Intercettazione della deriva

Gli interventi effettuati allo scopo di consentire il deposito (*intercettazione*) delle gocce su di una superficie interposta tra il terreno trattato ed una zona da proteggere (altra coltura, corso d'acqua, ecc.) sono le uniche misure di mitigazione disponibili una volta che le gocce hanno mancato il bersaglio e sono in movimento nell'atmosfera. I metodi a disposizione sono sostanzialmente riconducibili all'impiego di *aree di rispetto*, dotate o meno di barriere (vedi fig. 2). Per la descrizione delle varie tipologie di aree di rispetto si rimanda alla parte iniziale del presente lavoro. L'efficacia delle aree di rispetto nei confronti della deriva è legata alla progressiva riduzione del deposito di gocce che si verifica all'aumentare della distanza dall'area trattata. In generale, nel caso di trattamenti con barre irroratrici, la percentuale della dose applicata rilevata con captatori orizzontali posti a livello del suolo segue un andamento descrivibile con una potenza della distanza. Rautmann et al. (2001, citato da Carlsen et al., 2006), analizzando i risultati di circa 120 sperimentazioni su colture erbacee e in frutteti, propongono la seguente equazione:

$$y = 2/775x^{-0.9787} \quad r^2 = 0.9873 \quad (\text{Eq. 4})$$

dove y è il deposito a terra di agrofarmaco in % della dose distribuita e x è la distanza in me-

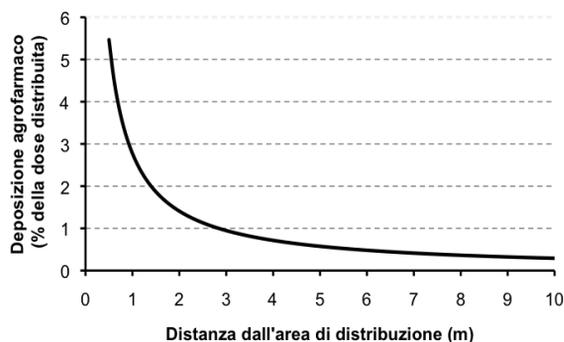


Figura 7. Relazione fra distanza dall'area trattata e deposizione del prodotto fitosanitario (ottenuta utilizzando la formula proposta da Rautmann et al., 2001).

Figure 7. Relationship between distance from treated area and pesticide deposition (obtained from the equation proposed by Rautmann et al., 2001).

tri dall'area trattata. Si noti l'analogia con l'equazione proposta dal modello SWAT (Eq. 2). Sebbene in questa equazione siano inclusi anche i risultati di prove condotte su frutteti, dove presumibilmente sono stati impiegati atomizzatori, i valori che si ottengono sono molto simili a quelli proposti da Ganzelmeier et al. (1995) per le colture erbacee. Questa formula calcola una forte riduzione della deposizione di prodotto fitosanitario già nei primi metri dall'area trattata e oltre i 3 metri la quantità che si deposita è inferiore all'1% della dose distribuita (fig. 7).

Livelli di abbattimento della deriva sino al 90% possono essere ottenuti con barriere a sviluppo verticale all'interno delle aree di rispetto, rappresentate da vegetazione arbustiva e arborea (Van de Zande et al., 2000).

Una caratteristica particolarmente importante della barriera vegetata è rappresentata dalla sua porosità ottica, che condiziona la capacità "filtrante" della barriera nei confronti della deriva (Otto et al., 2009). Valori ottimali di porosità si collocano tra il 40 e il 50%. Una barriera eccessivamente fitta (poco porosa), qualora investita da vento in direzione perpendicolare alla stessa, può deviare il flusso d'aria verso l'alto e determinare la formazione di turbolenze a valle, limitando così l'efficacia nel contenimento della deriva. In letteratura viene indicata una maggiore efficacia di barriere formate da più file di alberi, anche se studi recenti di Lazzaro et al. (2008) indicherebbero che l'efficacia sia da porre in relazione soprattutto

alla porosità ottica totale della barriera. Si ritiene che livelli di porosità ottica del 40-50% costituiscano il range ottimale per l'intercettazione della deriva (Dorr et al., 1998).

Integrazione fra metodi di mitigazione della deriva

Un'efficace gestione della deriva, analogamente a quanto osservato a proposito del ruscellamento, prevede che diversi approcci, metodologie e tecniche di contenimento del fenomeno vengano combinati in un sistema integrato. Poiché alcuni dei metodi descritti possono avere un effetto parzialmente additivo, è possibile ipotizzare di intervenire soprattutto sui metodi relativamente meno costosi. In questo senso, ad esempio, è ragionevole puntare sulla riduzione della formazione della deriva, investendo sugli aspetti tecnologici dei sistemi di distribuzione, al fine di poter ridurre le dimensioni delle aree di rispetto.

In questo senso, ad esempio, l'inglese LERAP (Local Environmental Risk Assessment for Pesticides) propone la possibilità di definire aree di rispetto di dimensioni diverse a seconda della tipologia di ugello impiegata e dell'importanza del corso d'acqua adiacente al campo che si intende proteggere (DEFRA, 2001). Il LERAP classifica gli ugelli in tipologie standard (livello di deriva > 0.75) e low drift (in tre categorie, con livelli di deriva da 0.75 a < 0.25) e i corsi d'acqua in tre classi di larghezza da < 3 m a > 6 m. A seconda delle possibili combinazioni, e anche considerando la dose di impiego, l'area di rispetto può variare da 1 m a 5 m (tab. 9). Ricorrendo quindi ad una *drift reducing technique* (Reichenberger et al., 2006) quale l'uso di ugelli antideriva, la fascia di rispetto può essere contenuta entro 1-2 m di larghezza.

In Italia, risultati significativi si riferiscono agli studi realizzati in Piemonte (Balsari e Marucco, 2009). In questi lavori, è stato individuato un criterio che ha consentito di classificare 27 diverse configurazioni della barra in 10 diverse categorie di rischio in funzione della deriva. Come riferimento si è adottata la configurazione ritenuta più ampiamente utilizzata nella pratica corrente (barra portata da 10 m equipaggiata con ugelli a fessura convenzionali e impiegata ad un'altezza di lavoro di 80 cm). Sulla base delle corrispondenti curve della deriva reale, ottenute applicando la metodologia ISO

Tabella 9. Larghezze minime dell'area di rispetto (in metri) proposte dal LERAP in funzione delle dimensioni del corso d'acqua, del tipo di ugello e della dose di impiego rispetto alla dose indicata in etichetta (da Matthews, 2006).

Table 9. Minimum width of buffer strips (in metres) proposed by LERAP as a function of the watercourse size, type of nozzle and application rate in comparison with the label rate (from Matthews, 2006).

Larghezza del corso d'acqua	Dose piena			Mezza dose				
	ugello standard	low drift ☆	low drift ☆☆	low drift ☆☆☆	ugello standard	low drift ☆	low drift ☆☆	low drift ☆☆☆
< 3 m	5	4	2	1	2	1	1	1
3-6 m	3	2	1	1	1	1	1	1
> 6 m	2	1	1	1	1	1	1	1

Ugello standard: ugello 11003 a 3 bar, altezza barra 50 cm; low drift ☆: livello deriva tra 0.75 e 0.5; low drift ☆☆: livello deriva tra 0.5 e 0.25; low drift ☆☆☆: livello deriva inferiore a 0.25.

22866 (ISO, 2005) con velocità del vento dell'ordine di 5 m/s, a ciascuna categoria è quindi stata attribuita una larghezza della fascia di rispetto, ipotizzando diversi limiti di accettabilità per il deposito di deriva a terra (rispettivamente 5%, 3% oppure 1% del volume distribuito). Con limiti di accettabilità dell'1% ed impiegando barre in grado di ridurre la deriva potenziale di circa il 75% rispetto alla barra ordinaria di riferimento, è possibile ottenere riduzioni dell'ordine del 65% della larghezza dell'area di rispetto.

Bibliografia

Alletto L., Coquet Y., Benoit P., Heddadj D., Barriuso E. 2010. Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review. *Agron. Sust. Devel.*, 30:367-400.

Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modelling and assessment part I: Model development. *J. Am. Water Resour. As.*, 34:73-89.

Arora K., Mickelson S.K., Helmers M.J., Baker J.L. 2010. Review of pesticide retention processes occurring in buffer strips receiving agricultural runoff. *J. Am. Water Resour. As.*, 46:618-647.

Asman W., Jørgensen A., Jensen P.K. 2003. Pesticide Research n. 66. Dry deposition and spray drift of pesticides to nearby water bodies. Danish Environmental Protection Agency, København K.

Baker J.L., Laflen J.M. 1979. Runoff losses of surface-applied herbicides as affected by wheel tracks and incorporation. *J. Environ. Qual.*, 8:602-607.

Balestra L., Roggero P.P., Rastelli R., Rossi N. 1996. Presence of herbicides in drainage water from agricultural fields treated with different agronomic inputs. In: *Proceeding of the X Symposium on pesticide chemistry*, 30 September-2 October 1996, Piacenza, Italy, 465-472.

Balsari P., Marucco P. 2009. Il ruolo delle macchine irroratrici nel contenimento della deriva. In: Vidotto F., Ferrero A. (eds.): *Protezione dei corpi idrici superfi-*

ciali dall'inquinamento da agrofarmaci. *Atti del XVII convegno SIRFI*, 19 maggio 2009, Bologna, Italy, 87-103.

Berenzen N., Lentzen-Godding A., Probst M., Schulz H., Schulz R., Liess M. 2005. A comparison of predicted and measured levels of runoff - related pesticide concentrations in small lowland streams on a landscape level. *Chemosphere*, 58:683-691.

Bombino G., Tamburino V., Zimbone S.M. 2007. Indicazioni per il controllo del ruscellamento ed erosione nei vigneti in ambiente mediterraneo. In: *Prospettive di innovazione per il potenziamento del comparto vitivinicolo calabrese*, 13 dicembre 2007, Lametia Terme, 217-229.

Bren L.J. 1998. The geometry of a constant buffer-loading design method for humid watersheds. *Forest Ecol. Manag.*, 110:113-125.

Campanini L., Rossi Pisa P., Catizone P. 1992. La presenza di erbicidi nelle acque di ruscellamento superficiale e nel terreno eroso da zone declivi. In: *Atti del convegno "Controllo delle piante infestanti"*, 21-22 gennaio 1992, Bologna, Italy, 189-214.

Cardinali A., Loddo D., Marotta E., Otto S., Zanin G. 2008. Monitoring of three maize herbicides in water runoff using liquid chromatography-mass spectrometry. In: *Chemicals and their residues in food and water. New scenarios of the modern sustainable agricultural production. Proceedings Book of the Annual Conference of the Mediterranean Group of Pesticide Residue*, 13-14 November, Piacenza, Italy, 61-62.

Carlsen S.C.K., Spliid N.H., Svensmark B. 2006a. Drift of 10 herbicides after tractor spray application. 1. Secondary drift (evaporation). *Chemosphere*, 64:787-794.

Carlsen S.C.K., Spliid N.H., Svensmark B. 2006b. Drift of 10 herbicides after tractor spray application. 2. Primary drift (droplet drift). *Chemosphere*, 64:778-786.

CCPF 2009. *Prodotti fitosanitari - Misure di mitigazione del rischio per la riduzione della contaminazione dei corpi idrici superficiali da deriva e ruscellamento*. Gruppo di lavoro *ad hoc* della Commissione consultiva per i prodotti fitosanitari, luglio 2009, 27 pp. Disponibile presso http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_publicazioni_1147_ulterioriallegati_ulteriore-allegato_2_alleg.pdf (ultima consultazione 02 marzo 2010).

- Chapple A.C., Downer R.A., Hall F.R. 1993. Effects of spray adjuvants on swath patterns and droplet spectra for a flat-fan hydraulic nozzle. *Crop Prot.*, 12:579-590.
- CORPEN 2007. Les fonctions environnementales des zones tampons. Iere Edition. www.developpement-durable.gouv.fr.
- Costacurta A., Lavezzi A., Tomasi D., Giorgessi F., Sancassani G., Antoniazzi P. 2004. Guida per il Viticoltore. Veneto Agricoltura – Azienda regionale per i settori agricolo, forestale e agro-alimentare.
- De Castro P. 2010. L'agricoltura europea e le nuove sfide globali. Donzelli Editore, Pomezia (Roma).
- DEFRA 2001. Local Environment Risk Assessment for Pesticides (LERAP). Horizontal boom sprayers. A step by step guide to reducing aquatic buffer zones in the arable sector. UK.
- De Schampheleire M., Baetens K., Nuyttens D., Spanoghe P. 2008. Spray drift measurements to evaluate the Belgian drift mitigation measures in field crops. *Crop Prot.*, 27:577-589.
- Dorr G., Woods N., Craig I. 1998. Buffer zones for reducing drift from the application of pesticides. Paper No. SEAg 98/008. International Conference on Engineering in Agriculture, Perth, Australia.
- FOCUS 2007. Landscape and mitigation factors in aquatic risk assessment. Detailed Technical Reviews Report of the FOCUS Working Group on Landscape and Mitigation Factors in Ecological Risk Assessment, EC Document Reference SANCO/10422/2005v2.0., vol 2.
- Ganzelmeier H., Rautmann D. 2000. Drift, drift reducing sprayers and sprayer testing. *Aspects appl. Biol.*, 57:1-10.
- Ganzelmeier H., Rautmann D., Spangenberg R., Streloke M., Hermann M., Wenzelburger H.J., Walter H.F. 1995. Studies on the spray drift of plant protection products. Results of a test program carried out throughout the Federal Republic of Germany. Herausgegeben von der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem; H305 (ISBN: 3-8263-3039-2).
- Garratt J., Kennedy A. 2006. Use of models to assess the reduction in contamination of water body by agricultural pesticides through the implementation of policy instruments: a case study of the Voluntary Initiative in the UK. *Pest Manag. Sci.*, 62:1138-1149.
- Giardini L. 2002. Agronomia generale, ambientale e aziendale. Patron, Bologna.
- Gregoire C., Elsaesser D., Huguenot D., Lange J., Lebeau T., Merli A., Mose R., Passeport E., Payraudeau S., Schutz T., Schulz R., Tapia-Padilla G., Tourné J., Trevisan M., Wamko A. 2009. Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems. *Environ. Chem. Lett.*, 7:205-231.
- Hall J.K., Hartwig N.L., Hoffman L.D. 1984. Cyanazine losses in runoff from no-till corn in "living" and dead mulches vs. unmulched, conventional tillage. *J. Environ. Qual.*, 13:105-110.
- Hobson P.A., Miller P.C.H., Walklate P.J., Tuck C.R., Western N.M. 1993. Spray drift from hydraulic spray nozzles: the use of a computer simulation model to examine factors influencing drift. *J. Agr. Eng. Res.*, 54:293-305.
- Huber A., Bach M., Frede H.G. 2000. Pollution of surface waters with pesticides in Germany: modeling non-point source inputs. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 80:191-204.
- ISO 2005. Equipment for crop protection – Methods for field measurement of spray drift. International Standard 22866.
- Klein R.N., Ogg C.L. 2007. Spray drift of pesticides. NebGuide, University of Nebraska, Lincoln. Document G1773.
- Kudsk P., Mathiassen S.K. 2007. Analysis of adjuvant effects and their interactions with variable application parameters. *Crop Prot.*, 26:328-334.
- Lacas J.G., Voltz M., Gouy V., Carluer N., Gril J.J. 2005. Using grassed strips to limit pesticides transfer to surface water: a review. *Agron. Sust. Devel.*, 25:253-266.
- Lazzaro L., Otto S., Zanin G. 2008. Role of hedgerows in intercepting spray drift: Evaluation and modelling of the effects. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 123:317-327.
- Li Y.X., Tullberg J.N., Freebairn D.M. 2007. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. *Soil Tillage Res.*, 97:282-292.
- Lichtfouse E., Hamelin M., Navarrette M., Debaeke P., Henri A. 2010. Emerging agrosience. *Agron. Sust. Devel.*, 30:1-10.
- Marucco P., Tamagnone M. 2002. L'impiego degli ugelli antideriva sulle barre irroratrici. In: Atti Giornate Fitopatologiche 2002, Vol. 2.
- Matthews G.A. 2006. Pesticides: health, safety, and the environment. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Melcher C.P., Skagen S.K. 2005. Grass buffers for playas in agricultural landscapes: A literature synthesis. U.S Geological Survey, Biological Resources Discipline, Open-File Report 2005-1220.
- Meriggi P., Wohlhauser R., Anderau V., Marchetti C. 2007. Studio sulla deriva da trattamenti in post-emergenza del mais. Effetti di alcune misure di mitigazione (velocità di avanzamento combinato al tipo di ugelli, manica d'aria e additivo a base di lecitina di soia) nel contenimento del fenomeno della deriva. Anno 2007. www.gemmagrofarmaci.org
- Mickelson S.K., Boyd P., Baker J.L., Ahmed S.I. 2001. Tillage and herbicide incorporation effects on residue cover, runoff, erosion, and herbicide loss. *Soil Tillage Res.*, 60:55-66.
- Milan M., Vidotto F., Tesio F., Negre M., Ferrero A. 2008. Buffer strip effect on terbuthylazine runoff in light level soil. In: Proceedings of 5th Meeting International Weed Science Congress, 23-27 June, Vancouver, Canada, 236.
- Orsini R., De Sanctis G., Perugini M., Toderi M., Rog-

- gero P.P. 2008. Nitrate Concentration of Runoff in Two Rural Micro-catchments of Central Italy: Results From a Ten-Years Survey. *Italian J. Agron.*, 3, 3suppl.:59-60.
- Otto S., Lazzaro L., Finizio A., Zanin G. 2009. Estimating effects of pesticide drift on nontarget arthropods in field hedgerows. *Environ. Toxicol. Chem.*, 28:853-863.
- Otto S., Vianello M., Infantino A., Zanin G., Di Guardo A. 2007. Effect of a full-grown vegetative filter strip on herbicide runoff: Maintaining of filter capacity over time. *Chemosphere*, 71:74-82.
- Rapparini G., Geminiani E., Romagnoli S. 2009. Applicazioni di coadiuvanti per la riduzione della dose degli erbicidi su frumento e mais: ricerche nel nord Italia. In: Vidotto F., Ferrero A. (eds.): *Protezione dei corpi idrici superficiali dall'inquinamento da agrofarmaci*. Atti del XVII Convegno SIRFI, 19 Maggio 2009, Bologna, Italy, 143-159.
- Rautmann D., Strelake M., Winkler R. 2001. New basic drift values in the authorization procedure for plant protection products. In: Forster R., Strelake M. (eds.) *Workshop on Risk Assessment and Risk Mitigation Measures in the Context of Authorization of Plant Protection (WORMM)*: 27-29 September 1999. Berlin, Parey. *Mitt. Biol. Bundesanst. Land-Forstwirtschaft.*, vol. 383, 133-141.
- Reichenberger S., Bach M., Skitschak A., Frede H.G. 2006. State of the art review on mitigation strategies and their effectiveness. Report DL#7 of the FP6 EU-funded FOOTPRINT project (www.eu-footprint.org).
- Reichenberger S., Bach M., Skitschak A., Frede H.G. 2007. Mitigation strategies to reduce pesticide inputs into ground-and surface water and their effectiveness; a review. *Sci. Total Environ.*, 384:1-35.
- Rogers M.R., Stringfellow W.T. 2009. Partitioning of chlorpyrifos to soil and plants in vegetated agricultural drainage ditches. *Chemosphere*, 75:109-114.
- Schulz R., Peall S. 2001. Effectiveness of a constructed wetland for retention of non point-source pesticide pollution in the Lourens River catchment, South Africa. *Environ. Sci. Technol.*, 35:422-426.
- Smith M. 1999. Vegetative filter strip for improved water quality. Iowa State University, University Extension, 2-4.
- Van de Zande J., Michielsen J., Stallinga H., Porskamp H., Holterman H., Huijsmans J. 2002. Environmental risk control. *Aspects appl. Biol.*, 66:165-176.
- Van de Zande J.C., Michielsen J.M.G.P., Stallinga H., De Jong A. 2000. The effect of windbreak height and air assistance on exposure of surface water via spray drift. In: *Proceedings of the British Crop Protection Conference-Pests and Diseases 2000*, Brighton, UK, 91-96.
- Vianello M., Vischetti C., Scarponi L., Zanin G. 2005. Herbicide losses in runoff events from a field with a low slope: role of a vegetative filter strip. *Chemosphere*, 61:717-725.
- Vicari A., Catizone P. 2007. Studi di lungo periodo sull'inquinamento diffuso da diserbanti. In: Ferrero A., Saglia A.A., Vidotto F. (eds.): *Usa sostenibile degli agrofarmaci: la nuova direttiva comunitaria, problematiche applicative e ruolo della ricerca*. Atti del XVI convegno SIRFI, 5 aprile 2007, Bologna, Italy, 145-157.
- Winkler R. 2001. Konzept zur Bewertung des Eintrags von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächen- und Grundwasser unter besonderer Berücksichtigung des Oberflächenabflusses (Dokumentation zum Modell EXPOSIT). Umweltbundesamt, Berlin, Germany, 27 September 2001.
- Wolf R. 2000. Strategies to reduce spray drift. Kansas State University. Document MF-2444.
- Wolf T.M., Cessna A.J. 2004. Protecting aquatic and riparian areas from pesticide drift. In: *Proceedings of International conference on pesticide application for drift management*, 27-29 October 2004, Waikoloa, Hawaii, 59-71.
- Zanin G., Catizone P. 2003. La Malerbologia. In: *Giornata di studio "Evoluzione dei mezzi di difesa fitosanitaria"*. I Geografili – Quaderni – 2003, 195-269.
- Zhang X., Liu X., Zhang M., Dahlgren R.A., Eitzel M. 2010. A review of vegetated buffers and a meta-analysis of their mitigation efficacy in reducing non-point source pollution. *J. Environ. Qual.*, 39:76-84.

Nuovi approcci per il miglioramento dell'efficienza d'uso dei nutrienti nelle piante: il caso dello zolfo

Gian Attilio Sacchi*¹, Fabio Francesco Nocito, Clarissa Lancilli

Dipartimento di Produzione Vegetale, Università degli Studi di Milano
Via Celoria 2, 20133 Milano

Società Italiana di Chimica Agraria

Riassunto

L'efficienza con cui le piante usano un nutriente minerale (*Nutrient Use Efficiency*, NUE), definita come l'incremento di produzione determinato da un aumento del livello dell'elemento in seguito ad una sua somministrazione al suolo, è un tratto agronomico controllato da diversi geni e dalla loro interazione con l'ambiente. Approcci genetici in specie modello quali *Arabidopsis thaliana* e *Oryza sativa* hanno permesso di identificare geni o gruppi di geni strettamente associati al carattere NUE relativamente a macronutrienti quali N, P e K, ed utilizzabili come marcatori molecolari in programmi di selezione assistita. Nel caso dello zolfo, invece, esistono solo informazioni frammentarie. Attraverso approcci diversi sono stati identificati e caratterizzati in *Arabidopsis* geni e promotori coinvolti nelle risposte precoci della pianta a variazioni dello stato nutrizionale solfatico. Viene discussa la possibilità di utilizzare tali elementi per la costituzione di un bioindicatore transgenico in grado di segnalare rapidamente e in modo sito-specifico le necessità di zolfo della coltura, così da poter programmare interventi adeguati di fertilizzazione. La definizione della dose corretta e delle variabili spazio-temporali delle fertilizzazioni sono infatti elementi determinanti nel miglioramento dell'efficienza d'uso dei nutrienti minerali.

Parole chiave: bioindicatori, efficienza d'uso dei nutrienti, nutrizione minerale, zolfo.

Summary

NOVEL APPROACHES TO IMPROVE PLANT NUTRIENT USE EFFICIENCY: THE SULFUR CASE

Plant nutrient use efficiency (NUE), i.e. yield increase per unit of nutrient input to the soil with fertilization, is an agronomic trait under genetic and environmental influence. Omics and quantitative trait loci analyses were able to identify some molecular bases of NUE concerning the most important macronutrient (N, P and K) constituting tools for marker assisted selection for higher NUE. In the case of sulfur only bitty information exist. More recently, genes and regulative sequences involved in earlier plant responses to sulfur starvation have been identified in *A. thaliana*. Taking into account these new knowledge, in this review we analyze and discuss the challenge to utilize such genic elements for constituting a transgenic bioindicator for monitoring early, specifically, continuously and quantitatively the sulfur needs of plants. The input of nutrient doses commensurate with plant actual needs, together with a correct timing and the highest possible site-specificity of fertilizer application, are desired elements to improve agronomic NUE and thus reduce economic and environmental impacts of fertilisation.

Key-words: bioindicators, mineral nutrition, nutrient use efficiency, sulfur.

* Autore corrispondente: tel.: +39 02 50316525; fax: +39 02 50316521. Indirizzo e-mail: gianattilio.sacchi@unimi.it

Efficienza d'uso dei nutrienti

Gli impatti ambientali di un uso eccessivo di fertilizzanti e le continue fluttuazioni del loro prezzo, comunque in crescita nel lungo periodo, rendono evidente la necessità di disporre di piante coltivate in grado di garantire livelli produttivi competitivi con input ridotti di nutrienti (Good et al., 2004). Il raggiungimento di questo obiettivo è quasi irrinunciabile per l'agricoltura delle aree povere del pianeta dove una bassa fertilità dei suoli è accompagnata da una possibilità di disporre di fertilizzanti alquanto limitata (Sanchez, 2002). Diversi modelli previsionali concordano nel ritenere che nei prossimi trent'anni per far fronte alla richiesta di cibo della crescente popolazione mondiale, potendo contare solo su un limitato incremento delle superfici agricole fertili ed irrigue, sarà necessario incrementare la produttività per unità di superficie (Vance, 2001). In tale prospettiva saranno necessarie, salvo interventi migliorativi dell'efficienza con cui le piante utilizzano i nutrienti, quantità di fertilizzanti drasticamente superiori a quelle oggi utilizzate. Si calcola (Vance, 2001) che le richieste mondiali di N passeranno dagli attuali 88 Mt a 120 Mt (+36%) e quelle di P da 40 Mt a 60 Mt circa (+50%). L'insostenibilità economica e ambientale di questi livelli di input in agricoltura evidenzia come sia necessario porre soluzione al problema della piuttosto bassa efficienza con cui le colture recuperano i nutrienti forniti al suolo con le fertilizzazioni e li convertono in incrementi produttivi (White e Brown, 2010).

La frazione percentuale del nutriente fornito con la fertilizzazione che è rimossa dalla coltura definisce il cosiddetto recupero apparente (*AR*, *Apparent Recovery*) dal suolo ed è calcolabile con l'equazione

$$AR = 100 (N_F - N_{nF})/F$$

dove: N_F è la quantità totale di nutriente prelevato dalla coltura, N_{nF} è invece quella assorbita dalla dotazione naturale del suolo, e F è la dose di nutriente apportata con il fertilizzante (Craswell e Godwin, 1984). Nel caso delle principali colture, sono riscontrabili valori di *AR* piuttosto bassi: 35% per l'N (Raun e Johnson, 1999), tra il 10 e il 30% per il P (Malhi et al., 2002) e quasi mai superiore al 50% per il K.

Queste basse capacità di rimozione riflettono inefficienze nella gestione delle tecniche di fertilizzazione, l'effetto di fattori ambientali – primi fra tutti quelli ascrivibili alle proprietà chimico-fisiche e biologiche dei suoli – nonché un insieme di limiti biologici intrinseci delle singole specie coltivate.

Il parametro *AR* assume soprattutto una valenza economico-ambientale e solo indirettamente tiene conto di aspetti produttivi, non essendo in grado di esprimere come l'assorbimento del nutriente si traduca nella crescita della pianta. Tale aspetto è invece considerato nel parametro "efficienza d'uso agronomica del fertilizzante" (*AE*, *Agronomic Efficiency*) definito dalla derivata dY/dF della funzione che esprime la dipendenza della produzione (Y , *Yield*) dalla quantità di nutriente (F , *Fertilizer*) apportato con la fertilizzazione. A sua volta *AE* risulta dal prodotto tra l'efficienza di rimozione della coltura (*RE*, *Removal Efficiency*), definita dal rapporto dU/dF , dove U è la quota di nutriente assorbito dalla coltura, e l'efficienza fisiologica (*PE*, *Physiologic Efficiency*) definita dal rapporto dY/dU :

$$AE = RE \cdot PE = dU/dF \cdot dY/dU = dY/dF$$

La rappresentazione grafica della funzione che descrive la dipendenza della produzione di una coltura dagli apporti di un particolare nutriente è riportata in Figura 1. Lungo la curva sono distinguibili tre zone: a) la zona di carenza nell'ambito della quale esiste una proporzionalità diretta tra l'apporto di nutriente e la produzione; b) una zona subottimale, dove tra le due variabili la relazione è meno che proporzionale; c) un'ultima zona, di lusso, nell'ambito della quale qualsiasi ulteriore apporto di nutriente non si traduce in un aumento di produzione. Per molti elementi nutritivi, oltre la zona di lusso si stabilisce una zona di tossicità nella quale l'eccessiva disponibilità del nutriente determina decrementi di produzione. Il punto di passaggio tra la zona subottimale e quella di lusso definisce la cosiddetta "dose critica", ovvero la quantità minima di nutriente in grado di garantire, in assenza di altri fattori limitanti, la produzione massima teorica. Esprimendo la produzione in funzione del contenuto percentuale in peso del nutriente nei tessuti della pianta si ottiene una curva del tutto analoga nella

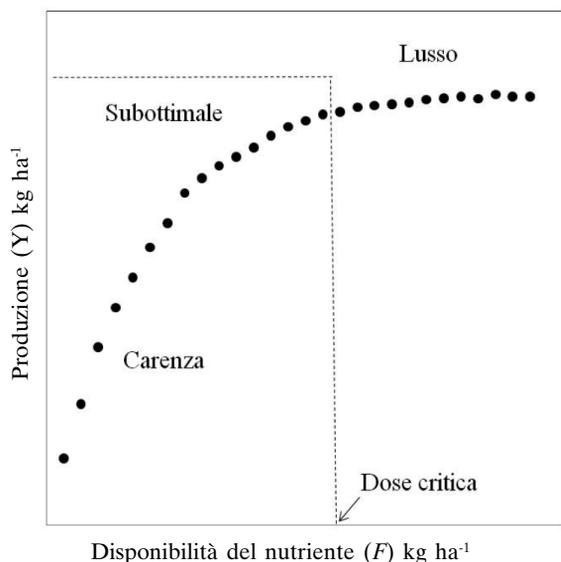


Figura 1. Dipendenza della produzione di una coltura dagli apporti di un particolare nutriente.

Figure 1. Crop production as a function of the input of a specific nutrient.

quale è definibile la “concentrazione critica”, ovvero il livello di nutriente nella pianta al di sopra del quale ulteriori apporti al suolo determinerebbero incrementi di assorbimento che non si traducono in aumenti significativi di produzione. Nelle diverse fasi fenologiche la concentrazione critica può variare. L'insieme dei punti che definiscono le concentrazioni critiche di uno specifico nutriente nelle diverse fasi di crescita costituisce la cosiddetta curva critica

per il nutriente (fig. 2). L'andamento della curva può essere diverso per le diverse specie coltivate, ma in ogni caso lo stato nutrizionale della coltura può essere semplicemente descritto da due coordinate, la concentrazione di nutriente e la produzione, che determineranno la sua posizione nel piano al di sopra (consumo di lusso) o al di sotto (carenza) della curva di concentrazione critica.

Dall'analisi della funzione $Y = f(F)$ risulta evidente (Figura 1) come l'efficienza d'uso di un nutriente (dY/dF) sia diversa nelle tre zone della curva. Nella zona di carenza l'efficienza d'uso è massima e quasi costante; nella zona subottimale via via diminuisce all'aumentare di F , nella zona di lusso è praticamente nulla. Da queste osservazioni appare evidente come nel caso di suoli poco fertili per dotazione limitata di nutrienti (carenza) la coltura utilizzi con efficienza massima gli apporti di fertilizzanti; contrariamente, nel caso di suoli con dotazioni naturali già relativamente alte l'efficienza d'uso è tendenzialmente più bassa. Quest'ultima osservazione deve essere tenuta in debita considerazione per orientare i programmi di selezione per il miglioramento dell'efficienza d'uso dei nutrienti in funzione delle differenti realtà agricole.

Basi genetiche dell'efficienza d'uso dei nutrienti

Come precedentemente discusso, sia RE sia PE dipendono, oltre che da fattori ambientali e ge-

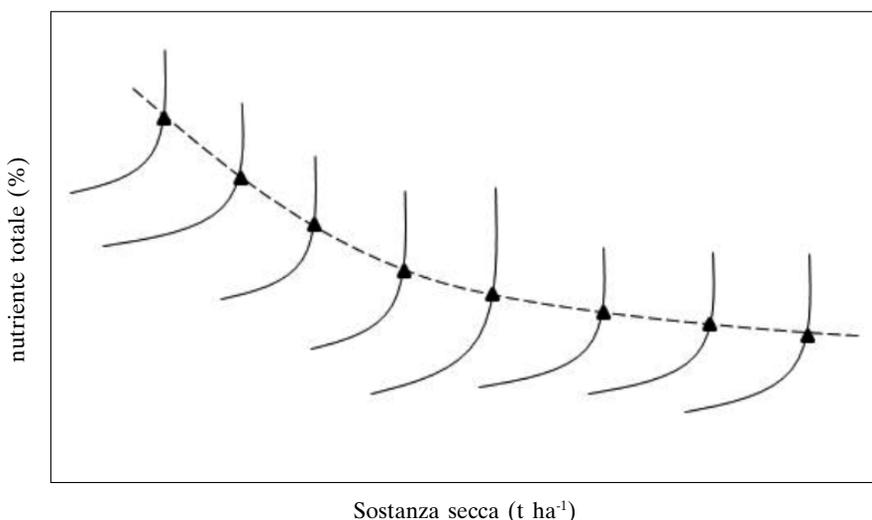


Figura 2. Curva critica per un nutriente.

Figure 2. Critic curve for a nutrient.

stionali, da fattori intrinseci delle piante in coltura. Tra questi si annoverano le caratteristiche a base genetica dei sistemi che garantiscono l'assorbimento del nutriente dal suolo, l'assimilazione, la traslocazione ai diversi organi, e l'immagazzinamento.

La maggior parte delle conoscenze disponibili sulle basi genetiche dell'efficienza d'uso dei nutrienti in alcune specie modello e in alcune specie coltivate è stata ottenuta ricorrendo a due diversi metodi d'indagine. Il primo prevede l'analisi delle risposte delle piante alla carenza di uno specifico nutriente sino ad identificarne, attraverso studi di trascrittomica, proteomica e metabolomica (*system biology*), le basi molecolari. In questo modo sono stati identificati alcuni degli elementi (fattori di trascrizione, sequenze geniche espresse, motivi genici di regolazione e, in alcuni casi, microRNA) che costituiscono i complessi networks genici e biochimici attraverso i quali le piante percepiscono il loro stato nutrizionale e traducono questa percezione in risposte adattative che ottimizzano la crescita anche in condizioni di bassa disponibilità del nutriente (Hirai et al., 2004; Schachtman e Shin, 2007). Un crescente numero di informazioni in tal senso è stato ottenuto per i più importanti macronutrienti, quali N (Little et al., 2005; Remans et al., 2006), P (Hammond et al., 2003; Misson et al., 2005), K (Armengaud et al., 2004; Gierth et al., 2005), S (Hirai et al., 2003) e Fe (Thimm et al., 2001; Li et al., 2009). Il secondo approccio sfrutta la variabilità esistente, o indotta, nell'ambito di una specie per il carattere NUE, affidandosi ad analisi *QTL* (*Quantitative Trait Loci*) in popolazioni segreganti, linee quasi isogeniche o linee ricombinanti ottenute a partire dall'incrocio di accessioni con efficienza estrema (minima e massima). Attraverso questi approcci è stato possibile definire in diverse specie coltivate loci genici utilizzabili come marcatori molecolari per la selezione di genotipi ad elevata efficienza d'uso per alcuni nutrienti (Hirel et al., 2007; Vinod, 2007; Liang et al., 2010; White et al., 2010).

Indici diagnostici dello stato nutrizionale della coltura

Una elevata efficienza d'uso agronomica dei fertilizzanti si ottiene anche dimensionando nel

modo più adeguato possibile le dosi di nutriente apportate alle effettive esigenze della coltura, spesso variabili nelle diverse fasi fenologiche, evitando il più possibile carenze o eccessi. Per avvicinarsi a questa condizione teorica ottimale bisognerebbe disporre lungo tutto il periodo di coltivazione di informazioni precise sullo stato nutrizionale della coltura.

I metodi classici adottati per valutare lo stato nutrizionale di una coltura si basano su un insieme di indici diagnostici, talvolta empirici, che forniscono informazioni parziali e non sempre univoche. Spesso si ricorre all'esame di sintomi macroscopici visibili (clorosi, necrosi o imbrunimenti) che, oltre a manifestarsi quando ormai lo stress indotto dalla carenza nutrizionale è severo, possono talvolta fornire indicazioni fuorvianti (Barker e Pilbeam, 2007). Infatti, alcuni sintomi non sono sempre attribuibili con certezza alla carenza di uno specifico elemento essenziale e spesso sono del tutto simili a quelli provocati da altri stress di tipo abiotico o biotico.

L'analisi elementare delle foglie fornisce informazioni più attendibili sullo stato nutrizionale della pianta, che tuttavia devono essere interpretate con cautela (Barker e Pilbeam, 2007). Occorre infatti considerare che le concentrazioni dei nutrienti nel germoglio sono soggette a continue fluttuazioni nell'ambito della stessa giornata e possono essere significativamente differenti nelle diverse foglie di una singola pianta. L'analisi fogliare, inoltre, permette di evidenziare solo carenze severe e prolungate nel tempo in quanto le piante, attivando risposte adattative metabolicamente dispendiose, tendono il più possibile a mantenere l'omeostasi ionica dei loro tessuti (Rouached et al., 2010).

L'integrazione dei risultati ottenuti con tecniche high throughput di *system biology* ha permesso di delineare con buona sensibilità profili d'espressione genica, variazioni nei livelli di proteine, enzimi o metaboliti riconducibili inequivocabilmente alle risposte più precoci delle piante a condizioni di carenza di specifici nutrienti (Hirai et al., 2004). Carenze di azoto, ad esempio, tendono a diminuire nei germogli i livelli di particolari amminoacidi (alanina, arginina, ac. aspartico e ac. glutammico) e di specifici acidi organici (citrico, isocitrico, fumarico e malico) ed inducono aumenti di livello di alcuni carboidrati (arabinosio, fucosio, inositolo, sac-

carosio, trealosio e mannosio) e di alcuni metaboliti secondari (Urbanczyk-Wochniak e Fernie, 2005). Analogamente le carenze di zolfo si manifestano con un aumento dei livelli di *O*-acetilserina e con una diminuzione di quelli di cisteina e glutatione (Hirai et al., 2003; Nikiforova et al., 2005). Le analisi dei metaboliti risultano tuttavia alquanto costose e necessitano di strumentazioni complesse e di personale specializzato; per tali motivi non sono quindi proponibili per la conduzione di campagne di monitoraggio delle condizioni nutrizionali di una coltura, specie se questa insiste su superfici consistenti.

Una soluzione possibile per il monitoraggio continuo dello stato di una coltura in relazione a uno specifico nutriente potrebbe consistere nella costituzione di piante bioindicatrici che segnalino in modo semplice ed inequivocabile l'insorgere di processi adattativi in risposta a stati di carenza. Ad oggi sono stati sviluppati biosensori e bioindicatori per rilevare la presenza di alcuni xenobiotici nell'ambiente, ma non esistono esperienze in tal senso relativamente alle carenze nutrizionali.

Le piante sentinella: i bioindicatori vegetali

Con il termine generale di bioindicatore si intende un organismo che risponde a determinate condizioni ambientali con variazioni identificabili del suo stato. Generalmente la bioindicazione avviene attraverso l'analisi del tasso di mortalità, di crescita o di riproduzione della specie bioindicatrice. Più recentemente, utilizzando geni reporter eterologhi sono stati costituiti bioindicatori molecolari. Una delle prime applicazioni di bioindicatori vegetali transgenici è stata suggerita da Kovalchuk e collaboratori (1998) che hanno utilizzato due diversi sistemi per monitorare i due principali tipi di danni al DNA dovuti a inquinamento nucleare: la rottura dei filamenti e la ricombinazione omologa. Sono state infatti prodotte piante transgeniche di *Arabidopsis* per analizzare eventi di mutazione puntiforme (Kovalchuk et al., 2000) e ricombinazione omologa in un transgene in cui era inserito il gene reporter *GUS* (β -glucuronidasi di *E. coli*). Queste stesse piante sono state utilizzate con successo per monitorare gli effetti genotossici di metalli pesanti (Kovalchuk et al.,

2001), di alcuni erbicidi (Filkowski et al., 2003; Besplug et al., 2004), delle specie reattive dell'ossigeno (Kovalchuk et al., 2003), e dell'esposizione a stress salino (Boyko et al., 2006). Tuttavia, questo tipo di bioindicatore non manifesta caratteristiche di specificità e non può quindi essere utilizzato per il monitoraggio della presenza nell'ambiente di un particolare analita.

Diversamente, Krizek e collaboratori (2003) hanno sviluppato piante transgeniche in grado di monitorare in modo specifico la concentrazione biodisponibile di metalli nel suolo. Tali bioindicatori sono stati costituiti ponendo, in piante di *Arabidopsis*, l'espressione del gene reporter *GUS* sotto il controllo del promotore del gene *AHBI* (*Arabidopsis thaliana class 1 non-symbiotic Hemoglobin*), codificante per una emoglobina non simbiotica, la cui espressione è specificamente indotta dalla presenza di nichel nel mezzo di crescita, individuato attraverso l'utilizzo di microarray. Tali piante sono in grado di indicare non solo la presenza del metallo nel mezzo di crescita, ma forniscono un segnale la cui intensità è dipendente dal livello di contaminazione; i risultati ottenuti con questo approccio sono di certo incoraggianti, ma sono necessarie ulteriori prove, in condizioni più simili a quelle di campo, per valutare la reale applicabilità di queste linee.

Sono state prodotte anche piante transgeniche di *Arabidopsis* in grado di evidenziare la presenza di seleniato e cromato nel mezzo di crescita. In queste piante il gene reporter *GFP* che codifica per la proteina fluorescente *Green Fluorescent Protein* della medusa *Aequorea victoria* è sotto il controllo del promotore di *AtSultr1;2*, un trasportatore del solfato ad alta affinità; in particolare, l'aumento dei livelli di GFP nelle piante *PSULTR1;2::GFP* risulta dipendente dalla concentrazione di seleniato e cromato nel mezzo di crescita, suggerendo un loro possibile diretto utilizzo nella quantificazione della contaminazione ambientale da Se e Cr (Maruyama-Nakashita et al., 2007). Infine, un particolare esempio di bioindicatore vegetale è rappresentato da piante di *Arabidopsis* transgeniche in grado di evidenziare la presenza di mine di terra (Bolin, 1999).

A partire da queste esperienze è possibile sviluppare un'ipotesi di lavoro per la costituzione di un bioindicatore per il monitoraggio delle carenze nutrizionali. L'ipotesi, schematiz-



Figura 3. Rappresentazione schematica del costrutto utilizzabile per la costituzione di un bioindicatore dello stato nutrizionale.

Figure 3. Scheme of the genic construct useful to develop bioindicator of nutritional status.

zata in figura 3, prevede l'integrazione nel genoma di una pianta di un costrutto dove un gene reporter sia posto sotto il controllo di sequenze regolative coinvolte nel sensing o nelle prime risposte adattative della pianta ad una specifica carenza. L'efficacia del bioindicatore dipenderà dalla sensibilità e dalla precocità con cui rileva la carenza, dalla insensibilità delle sequenze regolatrici ad altre carenze nutrizionali o stress (specificità), dalla possibilità che si dissattivi nel caso di rapido ripristino della condizione ottimale (reversibilità). Se inoltre l'intensità del segnale emesso dal gene reporter fosse in qualche modo proporzionale alla severità della carenza che si instaura nella pianta, il bioindicatore assumerebbe anche una valenza quantitativa; in altri termini non solo segnalerebbe la necessità di un intervento di fertilizzazione, ma fornirebbe anche indicazioni quantitative sulle dosi da somministrare con l'intervento.

Il caso dello zolfo

Lo zolfo è un elemento essenziale per tutti gli organismi viventi, in quanto presente in numerose molecole (amminoacidi, oligopeptidi, cofattori, vitamine e un'ampia varietà di metaboliti secondari). Diversamente dagli animali che introducono amminoacidi solforati con la dieta, le piante utilizzano lo zolfo inorganico, assunto prevalentemente in forma di solfato dalla soluzione circolante del suolo; l'anione una volta assorbito viene ridotto e incorporato nella cisteina e nel tripeptide glutatione (GSH). I gruppi

tiolici della cisteina e del GSH partecipano a cicli ossido-riduttivi essenziali per il mantenimento dello stato red-ox cellulare e per il controllo degli stress ossidativi (Noctor e Foyer, 1998; Leustek e Saito, 1999; Leustek, 2002; Saito, 2004). Inoltre, l'estrema nucleofilicità del gruppo -SH presente nel GSH, rende questa molecola essenziale nei processi di detossificazione degli xenobiotici organici che prevedono reazioni di coniugazione catalizzate da una particolare classe di enzimi, nota come glutatione S-tranferasi.

L'essenzialità dello zolfo nella nutrizione minerale delle piante fa sì che in situazioni di sua limitata disponibilità si verifichino forti perdite di produzione di tipo diretto (riduzione della biomassa prodotta) e di tipo indiretto, ovvero riconducibili al ruolo dell'elemento nella sintesi di numerosi metaboliti (*Sulfur-containing Defence Compounds*, SDC) implicati nelle risposte fisiologiche a stress biotici ed abiotici (Zhao et al., 1999a, b, c; Blake-Kalff et al., 2000; Leustek et al., 2000). I principali sintomi della solfocarenza si manifestano con ritardi nella crescita delle piante e sviluppo di clorosi; tali sintomi non sono facilmente identificabili in campo perché per molte colture, in particolar modo i cereali, possono essere confusi con quelli causati da carenze di azoto. Talvolta si possono verificare perdite di produzione dovute a solfocarenza senza che si manifestino sintomi visibili (Zhao et al., 1996). Inoltre, in molti casi, limitate disponibilità di zolfo possono influenzare negativamente la qualità della produzione agraria, pur non riducendone la quantità. Nel frumento, per esempio, una

ridotta disponibilità di zolfo favorisce la sintesi e l'accumulo di proteine di riserva povere di zolfo come le ω -gliadine e glutenine a spese di proteine più ricche di tale elemento; questo cambiamento altera la qualità delle farine destinate alla panificazione e alla produzione di pasta (Moss et al., 1981; Fullington et al., 1987; Zhao et al., 1996). In carenza di zolfo l'efficienza d'uso dell'azoto da parte delle colture diminuisce; quote maggiori di nitrato possono lisciviare nei suoli raggiungendo così le falde. Infine, un basso contenuto in zolfo determina in patata e nelle farine di alcuni cereali un accumulo di asparagina. Nelle successive lavorazioni che prevedono trattamenti ad alta temperatura (> 160 °C per almeno 20') di questi prodotti, l'amminoacido reagisce con zuccheri solubili (reazione di Maillard) producendo acrilamide, molecola altamente cancerogena (Muttucumaru et al., 2006).

La riduzione delle immissioni di anidride solforosa nell'atmosfera unitamente all'impiego di fertilizzanti fosfatici ad alto titolo, in sostituzione dei superfosfati semplici contenenti livelli non trascurabili di solfato di calcio, hanno determinato una progressiva contrazione degli apporti di zolfo al suolo e quindi il manifestarsi di primi fenomeni di solfocarenza (Mc Grath et al., 1996). Se un tempo, infatti, le esigenze nutrizionali delle colture venivano pienamente soddisfatte da tali apporti, appare oggi chiara la necessità di interventi a sostegno della fertilità dei suoli, soprattutto in regioni pedoclimatiche particolarmente sensibili, quali alcune aree del Nord Europa, dove il problema ha assunto dimensioni preoccupanti (Mc Grath et al., 1996). I risultati ottenuti attraverso l'impiego di modelli predittivi e dalle prime ricerche in pieno campo indicano chiaramente un aumento delle aree a rischio di solfocarenza, la cui estensione è arrivata ad interessare anche il nostro paese (Mc Grath et al., 1996; Hawkesford, 2000).

Contrariamente a quanto accade per i principali nutrienti normalmente considerati nei piani di concimazione (N, P, K), nel caso dello zolfo esistono scarse indicazioni pratiche relative all'epoca di somministrazione dei fertilizzanti ed alla tipologia di questi da adottare a sostegno dei fabbisogni nutrizionali delle colture durante il loro ciclo produttivo, soprattutto in relazione alla persistenza ed alla reale disponibilità dello zolfo nel suolo (Hawkesford, 2000). La determinazione analitica della quantità di solfato presente nella soluzione circolante del suolo fornisc

sce indicazioni spesso fuorvianti e difficilmente relazionabili ai fabbisogni delle colture. La concentrazione dell'anione risulta infatti estremamente variabile nello spazio e nel tempo e non sempre è indice della reale biodisponibilità del nutriente, a causa della possibile presenza di fattori interferenti, quali ad esempio i seleniati, che possono dare luogo a fenomeni di competizione con l'assunzione radicale del solfato (Terry et al., 2000; Shibagaki et al., 2002). Inoltre, diversi studi indicano l'esistenza di una relazione tra disponibilità di zolfo nel suolo e livelli di SDC nelle piante, mostrando come la sintesi di quest'ultimi raggiunga la saturazione a livelli di zolfo disponibile superiori rispetto a quelli ritenuti ottimali per la crescita delle piante (Marschner, 1995; Bloem et al., 2005; Rausch e Wachter, 2005). Condizioni di stress biotico od abiotico inducono una massiva produzione di SDC determinando incrementi dei fabbisogni nutrizionali di zolfo, che si accompagnano ad alterazioni generalizzate delle vie di assimilazione riduttiva del solfato e di biosintesi della Cys e del GSH (Xiang e Oliver, 1998; Nocito et al., 2002; Mikkelsen et al., 2003; Mendoza-Cózatl et al., 2005; Rausch e Wachter, 2005). Tali risposte adattative, non prevedibili sulla base del computo delle normali asportazioni delle colture, potrebbero essere limitate anche in condizioni di disponibilità ottimale di solfato, con conseguenti perdite di produzione soprattutto in situazioni di stress (Rausch e Wachter, 2005). In tale contesto risulta quindi evidente la necessità di definire indici diagnostici che consentano il monitoraggio continuo dello stato nutrizionale delle piante durante le differenti fasi della loro crescita, allo scopo di programmare interventi di fertilizzazione specifici ed efficaci. Ad oggi, purtroppo, nessuno degli indici biochimici proposti (contenuto in solfato e in S ridotto, rapporti N/S e malato/solfato nei tessuti) si è rivelato del tutto soddisfacente, in quanto si limitano a fotografare situazioni statiche che si sono instaurate nel tempo a seguito della solfocarenza (Rasmussen et al., 1977; Scaife e Burns, 1986; Blake-Kalff et al., 2000).

Percezione e trasduzione del segnale di solfocarenza

Una profonda conoscenza dei meccanismi molecolari che controllano i flussi di zolfo nel si-

stema suolo-pianta e delle loro interazioni con l'ambiente potrebbe quindi fornire indicazioni essenziali per lo sviluppo di precoci e sensibili indici diagnostici biochimico-molecolari da impiegare per una corretta gestione delle fertilizzazioni solfatiche delle colture. Gli studi a tale proposito indicano l'esistenza di pool genici la cui espressione è finemente regolata in risposta allo stato della nutrizione solforata della pianta ed alla disponibilità di solfato nel mezzo esterno (Leustek e Saito, 1999; Hirai et al., 2003; Maruyama-Nakashita et al., 2003; Saito, 2004).

È stato evidenziato come molte risposte alla solfocarenza siano controllate prevalentemente a livello trascrizionale e risultino influenzate dall'applicazione esogena di inibitori delle protein fosfatasi o di molecole ad azione ormonale (Xiang e Oliver, 1998; Maruyama-Nakashita et al., 2003; Maruyama-Nakashita et al., 2004), suggerendo l'esistenza di complesso "network" di regolazione dell'espressione genica che scaturisce dall'interazione di segnali primari di differente natura. Le analisi dei promotori di alcuni geni di risposta alla solfocarenza hanno evidenziato la presenza di regioni regolative (cis-acting elements) coinvolte nella loro attivazione o repressione trascrizionale. Studi condotti su un trasportatore del solfato (SULTR1;1) e sulla nitrilasi NIT3 di *Arabidopsis thaliana*, nonché sulla subunità β della conglucina di soia, hanno consentito di isolare alcune regioni regolative, definite SURE (*Sulfur Responsive Elements*), nelle sequenze promotrici dei rispettivi geni. Tali regioni sono sufficienti per promuovere la risposta di questi geni alla solfocarenza (Awazuhara et al., 2002; Kutz et al., 2002; Maruyama-Nakashita et al., 2005).

Per quanto riguarda i fattori che agiscono in trans, in *Arabidopsis* è stato recentemente identificato un fattore di trascrizione coinvolto nella regolazione della via di assimilazione dello zolfo, SLIM1 (Maruyama-Nakashita et al., 2006). Tale fattore di trascrizione appartiene alla famiglia EIL (*Ethylene Insensitive Like*) e svolge un ruolo centrale nella regolazione trascrizionale in condizioni di solfocarenza, controllando sia l'acquisizione del solfato sia la degradazione dei glucosinolati (Maruyama-Nakashita et al., 2006). È stato inoltre ipotizzato un possibile coinvolgimento di due fattori nucleari isolati in embrioni di soia (SEFs, Soybean Embryo Factors), in grado di legarsi alla regione di

235 bp del promotore del gene codificante per la subunità β della conglucina (Allen et al., 1989); le sequenze nucleotidiche per il legame degli elementi SEF sono presenti anche nel promotore del gene della Ser acetiltransferasi di *Citrullus vulgaris* e di AT5G48850 di *Arabidopsis*, anch'essi in grado di rispondere allo zolfo (Saito et al., 1997).

La conoscenza di geni gerarchicamente regolati dallo stato nutrizionale della pianta e dalla disponibilità di solfato è quindi abbastanza estesa. Esistono quindi i prerequisiti necessari alla costituzione di promotori chimerici con sequenze regolatrici specifiche che fusi a geni reporter possano essere inseriti nel genoma di una pianta utilizzabile poi come bioindicatore molecolare del suo stato nutrizionale riferito allo zolfo. Il vantaggio relativo all'impiego di queste piante all'interno di una coltura è riconducibile al fatto di poter usufruire di informazioni sullo stato nutrizionale in qualsiasi momento del ciclo della coltura, così da poter programmare interventi mirati e localizzati di fertilizzazione, anche in ottiche di precision farming. Una opportuna taratura del bioindicatore potrebbe anche permettere di stimare la quota di nutriente da apportare al suolo per riallineare le piante sui valori critici di concentrazione per quel dato nutriente.

Bibliografia

- Allen R.D., Bernier F., Lessard P.A., Beachy R.N. 1989. Nuclear factors interact with a soybean β -conglucinin enhancer. *Plant Cell*, 1:623-631.
- Armengaud P., Breitling R., Amtmann A. 2004. The potassium-dependent transcriptome of *Arabidopsis* reveals a prominent role of jasmonic acid in nutrient signaling. *Plant Physiol.*, 136:2556-76.
- Awazuhara M., Kim H., Goto D.B., Matsui A., Hayashi H., Chino M., Kim S.G., Naito S., Fujiwara T. 2002. A 235-bp region from a nutritionally regulated soybean seed-specific gene promoter can confer its sulfur and nitrogen response to a constitutive promoter in aerial tissues of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Sci.*, 163:75-82.
- Barker A.V., Pilbeam D.J. 2007. *Handbook of Plant Nutrition*. CRC, Boca Raton, FL USA.
- Besplug J., Filkowski J., Burke P., Kovalchuk I., Kovalchuk O. 2004. Atrazine induces homologous recombination but not point mutation in the transgenic plant-based biomonitoring assay. *Arch. Environ. Contamin. Tox.*, 46:296-300.
- Blake-Kalff M.M.A., Hawkesford M.J., Zhao F.J., McGrath S.P. 2000. Diagnosing sulfur deficiency in field-grown oilseed rape (*Brassica napus* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Soil*, 225:95-107.
- Bloem E., Haneklaus S., Schnug E. 2005. Significance of

- sulfur compounds in the protection of plants against pests and diseases. *J. Plant Nutr.*, 28:763-784.
- Bolin F. 1999. Leveling land mines with biotechnology. *Nat. Biotechnol.*, 17:732.
- Boyko A., Hidson D., Bhomkar P., Kathiria P., Kovalchuk K.I. 2006. Increase of homologous recombination frequency in vascular tissue of *Arabidopsis* exposed to salt stress. *Plant Cell Physiol.*, 47:736-742.
- Craswell E.T., Godwin D.C. 1984. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals grown in different climates. In: Tinker P.B., Lauchli A. (eds.): *Advances in Plant Nutrition*, 1-55, Praeger Publishers.
- Filkowski J., Besplug J., Burke P., Kovalchuk I., Kovalchuk O. 2003. Genotoxicity of 2,4-D and dicamba revealed by transgenic *Arabidopsis thaliana* plants harbouring recombination and point mutation markers. *Mut. Res.*, 542:23-32.
- Fullington J.G., Miskelly D.M., Wrigley C.W., Kasarada D.D. 1987. Quality-related endosperm proteins in sulphur-deficient and normal wheat grain. *J. Cereal Sci.*, 5:233-245.
- Gierth M., Maser P., Schroeder J.I. 2005. The potassium transporter AtHAK5 functions in K⁺ deprivation-induced high-affinity K⁺ uptake and AKT1 K⁺ channel contribution to K⁺ uptake kinetics in *Arabidopsis* roots. *Plant Physiol.*, 137:1105-14.
- Good A.G., Shrawat A.K., Muench D.G. 2004. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends Plant Sci.*, 9:597-605.
- Hammond J.P., Bennett M.J., Bowen H.C., Broadley M.R., Eastwood D.C., May S.T., Rahn C., Swarup R., Woolaway K.E., White P.J. 2003. Changes in gene expression in *Arabidopsis* shoots during phosphate starvation and the potential for developing smart plants. *Plant Physiol.*, 132:578-96.
- Hawkesford M.J. 2000. Plant responses to sulfur deficiency and the genetic manipulation of sulphate transporter to improve S-utilisation efficiency. *J. Exp. Bot.*, 51:131-138.
- Hirai M.Y., Fujiwara T., Awazuhara M., Kimura T., Noji M., Saito K. 2003. Global expression profiling of sulfur-starved *Arabidopsis* by DNA microarray reveals the role of O-acetyl-serine as a general regulator of gene expression in response to sulfur nutrition. *Plant J.*, 33:651-663.
- Hirai M.Y., Yano M., Goodenowe D.B., Kanaya S., Kimura T., Awazuhara M., Arita M., Fujiwara T., Saito K. 2004. Integration of transcriptomics and metabolomics for understanding of global responses to nutritional stresses in *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 101:10205-10.
- Hirel B., Le Gouis J., Ney B., Gallais A. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *J. Exp. Bot.*, 58:2369-2387.
- Kovalchuk I., Kovalchuk O., Arkhipov A., Hohn B. 1998. Transgenic plants are sensitive bioindicators of nuclear pollution caused by the Chernobyl accident. *Nature Biotech.*, 16:1054-1059.
- Kovalchuk I., Kovalchuk O., Hohn B. 2000. Genome-wide variation of the somatic mutation frequency in transgenic plants. *EMBO J.*, 19:4431-4438.
- Kovalchuk O., Titov V., Hohn B., Kovalchuk I. 2001. A sensitive transgenic plant system to detect toxic inorganic compounds in the environment. *Nat. Biotechnol.*, 19:568-572.
- Kovalchuk I., Filkowski J., Smith K., Kovalchuk O. 2003. Reactive oxygen species stimulate homologous recombination in plants. *Plant Cell Environ.*, 26:1531-1539.
- Krizek B.K., Prost V., Joshi R.M., Stoming T., Glenn T.C. 2003. Developing transgenic *Arabidopsis* plants to be metal-specific bioindicators. *Environ. Tox. Chem.*, 22:175-181.
- Kutz A., Muller A., Hennig P., Kaiser W.M., Piotrowski M., Weiler E.W. 2002. A role for nitrilase 3 in the regulation of root morphology in sulphur-starving *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.*, 30:95-106.
- Leustek T. 2002. Sulfate Metabolism. In: Somerville C.R., Meyerowitz E.M. (eds.): *The Arabidopsis Book*. Rockville, MD: American Society of Plant Biologists, doi/10.1199/tab.0009, <http://www.aspb.org/publications/arabidopsis/>
- Leustek T., Martin M.N., Bick J.N., Davies J.P. 2000. Pathways and regulation of sulfur metabolism revealed through molecular and genetic studies. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 51:141-165.
- Leustek T., Saito K. 1999. Sulfate transport and assimilation in plants. *Plant Physiol.*, 120:637-643.
- Li J., Wu X.D., Hao S., Wang X., Ling H. 2009. Proteomic response to iron deficiency in tomato root. *Proteomics*, 8:2299-2311.
- Liang Q., Cheng X., Mei M., Yan X., Liao H. 2010. QTL analysis of root traits as related to phosphorus efficiency in soybean. *Ann. Bot.*, 106:223-234.
- Little D.Y., Rao H., Oliva S., Daniel-Vedele F., Krapp A., Malamy J.E. 2005. The putative high-affinity nitrate transporter NRT2.1 represses lateral root initiation in response to nutritional cues. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 102:13693-98.
- Malhi S.S., Haderlein L.K., Pauly D.G., Johnston A.M. 2002. Improving fertilizer phosphorus use efficiency. *Better Crop*, 86:8-9.
- Marschner H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, Academic Press, London.
- Maruyama-Nakashita A., Inoue E., Watanabe-Takahashi A., Yamaya T., Takahashi H. 2003. Transcriptome profiling of sulfur-responsive genes in *Arabidopsis* reveals global effects of sulfur nutrition on multiple metabolic pathways. *Plant Physiol.*, 132:597-605.
- Maruyama-Nakashita A., Nakamura Y., Watanabe-Takahashi A., Yamaya T., Takahashi H., 2004. Induction of SULTR1;1 sulfate transporter in *Arabidopsis* roots involves protein phosphorylation/ dephosphorylation circuit for transcriptional regulation. *Plant Cell Physiol.*, 45:340-345.
- Maruyama-Nakashita A., Nakamura Y., Watanabe-Takahashi A., Inoue E., Yamaya T., Takahashi H. 2005. Identification of a novel cis-acting element conferring sulfur deficiency response in *Arabidopsis* roots. *Plant J.*, 42:305-314.
- Maruyama-Nakashita A., Nakamura Y., Tohge T., Saito K., Takahashi H. 2006. *Arabidopsis* SLIM1 is a central transcriptional regulator of plant sulfur response and metabolism. *Plant Cell*, 18:3235-3251.
- Maruyama-Nakashita A., Inoue E., Saito K., Takahashi H.

2007. Sulfur-responsive promoter of sulfate transporter gene is potentially useful to detect and quantify selenate and chromate. *Plant Biotechnol.*, 24:261-263.
- McGrath S.P., Zhao F.J., Withers P.J.A. 1996. Development of sulphur deficiency in crops and its treatment. *Proc. Fert. Soc.*, No. 379. Peterborough, The Fertiliser Society.
- Mendoza-Cózatl D., Loza-Tavera H., Hernández-Navarro A., Moreno-Sánchez R. 2005. Sulfur assimilation and glutathione metabolism under cadmium stress in yeast, protists and plants. *FEMS Microb. Reviews*, 29:653-671.
- Mikkelsen M.D., Petersen B.L., Glawischnig E., Jensen A.B., Andreasson E., Halkier B.A. 2003. Modulation of *CYP79* genes and glucosinolate profiles in *Arabidopsis* by defense signaling pathways. *Plant Physiol.*, 131:298-308.
- Misson J., Raghothama K.G., Jain A., Jouhet J., Block M.A., Bligny R., Ortet P., Creff A., Somerville S., Rolland N., Dumas P., Nacry P., Herrera-Estrella L., Nussaume L., Thibaud M-C. 2005. A genome-wide transcriptional analysis using *Arabidopsis thaliana* Affymetrix gene chips determined plant responses to phosphate deprivation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 102:11934-11939.
- Moss H.J., Wrigley C.W., MacRitchie F., Randall P.J. 1981. Sulfur and nitrogen fertilizer effect on wheat. II. Influence on grain quality. *Aust. J. Agri. Res.*, 32:213-226.
- Muttucumaru N., Halford N.G., Elmore J.S., Dodson A.T., Parry M.A.J., Shewry P.R., Mottram D.S. 2006. The formation of high levels of acrylamide during the processing of flour derived from sulphate-deprived wheat. *J. Agric. Food Chem.*, 54:8951-8955.
- Nikiforova V.J., Kopka J., Tolstikov V., Fiehn O., Hopkins L., Hawkesford M.J., Hesse H., Hoefgen R. 2005. Systems rebalancing of metabolism in response to sulfur deprivation, as revealed by metabolome analysis of *Arabidopsis* plants. *Plant Physiol.*, 138:304-318.
- Nocito F.F., Provano L., Cocucci M., Sacchi G.A. 2002. Cadmium-induced sulfate transport in maize roots. *Plant Physiol.*, 129:1872-1879.
- Noctor G., Foyer C. 1998. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annu. Rev. Plant Phys.*, 49:249-279.
- Rasmussen P.E., Ramig R.E., Ekin L.G., Rohde C.R. 1977. Tissue analyses guidelines for diagnosing sulfur deficiency in white wheat. *Plant Soil*, 46:153-163.
- Raun W.R., Johnson G.V. 1999. Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agron J.*, 91:357-363.
- Rausch T., Wachter A. 2005. Sulfur metabolism: a versatile platform for launching defence operations. *Trends Plant Sci.*, 10:503-509.
- Remans T., Nacry P., Pervert M., Girin T., Tillard P., Lepetit M., Gojon A. 2006. A central role for the nitrate transporter NRT2.1 in the integrated morphological and physiological responses of the root system to nitrogen limitation in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.*, 140:909-921.
- Rouached H., Secco D., Arpat B.A. 2010. Regulation of ion homeostasis in plants. Current approaches and future challenges. *Plant Sign. Behavior*, 5:501-502.
- Saito K. 2004. Sulfur assimilatory metabolism. The long and smelling road. *Plant Physiol.*, 136:2443-2450.
- Saito K., Inoue K., Fukushima R., Noji M. 1997. Genomic structure and expression analyses of serine acetyltransferase gene in *Citrullus vulgaris* (watermelon). *Gene*, 189:57-63.
- Sanchez P. 2002. Soil fertility and hunger in Africa. *Science*, 295:2019-2020.
- Scaife A., Burns I.G. 1986. The sulphate-S/total S ratio in plants as an index of their sulphur status. *Plant Soil*, 91:61-71.
- Schachtman D.P., Shin R. 2007. Nutrient sensing and signaling: NPKS. *Ann. Rev. Plant Biol.*, 58:47-69.
- Shibagaki N., Rose A., McDermott J.P., Fujiwara T., Hayaishi H., Yoneyama T., Davies J.P. 2002. Selenate-resistant mutants of *Arabidopsis thaliana* identify *Sultr1;2*, a sulfate transporter required for efficient transport of sulfate into roots. *Plant J.*, 29:475-486.
- Terry N., Zayed A.M., de Souza M.P., Tarun A.S. 2000. Selenium in higher plants. *Annu. Re. Plant Phys.*, 51:401-432.
- Thimm O., Essigmann B., Kloska S., Altmann T., Buckhout T.J. 2001. Response of *Arabidopsis* to Iron Deficiency Stress as Revealed by Microarray Analysis. *Plant Physiol.*, 127:1030-1043.
- Urbanczyk-Wochniak E., Fernie A.R. 2005. Metabolic profiling reveals altered nitrogen nutrient regimes have diverse effects on the metabolism of hydroponically-grown tomato (*Solanum lycopersicum*) plants. *J. Exp. Bot.*, 56:309-321.
- Vance C.P. 2001. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorous acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant Physiol.*, 127:390-397.
- Vinod K.K. 2007. Marker assisted selection for nitrogen use efficiency in crop plants. In: Proceedings of the training programme on "Innovative tools in Crop Improvement", Tamil Nadu Agricultural University, Coimbatore, India. <http://kkvinod.webs.com>, 302-314.
- White P.J., Brown P.H. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals Bot.*, 105:1703-1710.
- White P.J., Hammond J.P., King G.J., Bowen H.C., Hayden R.M., Meacham M.C., Spracklen W.P., Broadley M.R. 2010. Genetic analysis of potassium use efficiency in *Brassica oleracea*. *Ann. Bot.*, 105:1199-1210.
- Xiang C., Oliver D.J. 1998. Glutathione metabolic genes coordinately respond to heavy metals and jasmonic acid in *Arabidopsis*. *Plant Cell*, 10:1539-1550.
- Zhao F.J., Hawkesford M.J., Warrilow A.G.S., McGrath S.P., Clarkson D.T. 1996. Responses of two wheat varieties to sulphur addition and diagnosis of sulphur deficiency. *Plant Soil*, 181:317-327.
- Zhao F.J., Hawkesford M.J., McGrath S.P., Clarkson D.T. 1999a. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *J. Cereal Sci.*, 30:1-17.
- Zhao F.J., Wood A.P., McGrath S.P. 1999b. Effects of sulphur nutrition on growth and nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil*, 212:209-219.
- Zhao F.J., Evans E.J., Bilsborrow P.E., Syers J.K. 1999c. Influence of sulphur and nitrogen on seed yield and quality of low glucosinolate oilseed rape. *J. Sci. Food Agr.*, 63:29-37.

I cambiamenti climatici e la gestione sostenibile delle risorse nel sistema frutteto

Cristos Xiloyannis*, Giuseppe Montanaro, Giuseppe Celano, Bartolomeo Dichio

Dipartimento di Scienze dei Sistemi Colturali, Forestali e dell'Ambiente, Università degli Studi della Basilicata

Viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza

Società di Ortoflorofruitticoltura

Riassunto

Le coltivazioni sono sensibili ai cambiamenti del clima che possono determinare variazioni dei regimi pluviometrici (intensità e distribuzione delle piogge) e delle temperature (sia durante il periodo di riposo invernale che durante la primavera-estate). Allo stesso tempo, il comparto agricolo è responsabile delle emissioni del 13% circa dei gas serra contribuendo all'aggravamento della distruzione del clima. Pertanto, il comparto agricolo deve confrontarsi sul versante dell'*adattamento* e della *mitigazione* dei cambiamenti climatici.

La presente nota focalizza i possibili interventi nel settore frutticolo per una gestione delle risorse acqua e suolo più sostenibile, orientata all'attenuazione dei possibili effetti negativi dei cambiamenti climatici. Si riportano e si discutono i risultati di prove pluriennali, condotte in ambiente semi-arido, su diverse specie arboree da frutto mettendo a confronto due sistemi di gestione (sostenibile e convenzionale).

Parole chiave: irrigazione, acque reflue, gestione suolo, carbonio del suolo, emissioni di CO₂.

Summary

CLIMATE CHANGES AND SUSTAINABLE MANAGEMENT OF ORCHARD RESOURCES

Crops are sensitive to climate changes (drought, frost season duration, flooding, rain intensity/frequency, atmospheric gases concentration). However, at the same time that the agricultural sector is impacted by climate change, agricultural activities are a significant source of greenhouse gases that aggravate climate disruption. Therefore, agriculture would face both *adaptation* and *mitigation* to changing climate.

This note focuses potential interventions for optimal soil and water use at fruit tree orchard scale. Specifically, the management of microirrigation method, the use of alternative water sources and the carbon fluxes between orchard and atmosphere are discussed.

Key-words: irrigation, urban wastewater, soil management, soil carbon, CO₂ soil emission.

Introduzione

Il legame fra agricoltura e clima è abbastanza netto in quanto le piante necessitano di acqua, nutrienti, CO₂, energia radiante e termica. L'effetto dei cambiamenti climatici sulla pianta dipende da numerosi parametri a cominciare dalla variabile climatica stessa che viene considerata.

Ad esempio, l'aumento della concentrazione di CO₂ nell'aria può incrementare il tasso fotosintetico (Gunderson e Wullschleger, 1994) e favorire così la produttività delle piante in termini di biomassa (Usuda e Shimogawara 1998; Thomas e Strain, 1991), mentre l'aumento di temperatura o la riduzione delle precipitazioni possono avere, invece, un effetto negativo sulla capacità fotosinte-

Il lavoro è da attribuirsi agli Autori in parti uguali.

* Autore corrispondente: Tel.: +39 329 3606262; fax: +39 0971 205378. Indirizzo e-mail: cristos.xiloyannis@unibas.it

tica delle colture (Angelopoulos et al., 1996; Montanaro et al., 2009).

Le coltivazioni sono sensibili alla variabilità climatica che determinano siccità, allagamenti, periodi di gelo, variazione dei regimi pluviometrici (intensità e distribuzione delle piogge), aumento della concentrazione di gas atmosferici ecc. Inevitabilmente, le forze che determinano tali variazioni influenzano la fisiologia delle piante e quindi i cicli di produzione in agricoltura anche se con effetti differenziati a seconda della singola stagione ed area geografica.

In molti areali, il clima che cambia, in particolare la temperatura e la riduzione delle precipitazioni, determina un aumento della domanda di acqua da parte delle colture a causa dell'incremento dell'evapotraspirazione ma anche a seguito dell'allungamento della stagione vegetativa (Bates et al., 2008). La riduzione delle precipitazioni ovviamente incide sulla totale disponibilità della risorsa idrica nel suolo, che si riduce anche in conseguenza della riduzione della capacità di ritenzione idrica del terreno. A livello di comprensorio agricolo la riduzione delle precipitazioni determina un minore accumulo di acqua negli invasi e pertanto una ridotta disponibilità di acqua per gli usi irrigui.

L'agricoltura è quindi fortemente minacciata dalle mutazioni del clima, ma allo stesso tempo è in qualche misura responsabile di tali mutazioni. Infatti, su scala globale, si stima che il settore agricolo contribuisca al 13% delle emissioni di gas serra (anidride carbonica, protossido di azoto, metano, gli idrofluorocarburi, perfluorocarburi ed esafluoruro di zolfo) ritenuti responsabili dei cambiamenti climatici (Rosegrant et al., 2008).

Pertanto, il comparto agricolo deve confrontarsi sul versante dell'*adattamento* e della *mitigazione* dei cambiamenti climatici, individuando e sfruttando le eventuali sinergie tra loro.

La presente nota focalizza i possibili interventi nel settore frutticolo per una gestione più sostenibile delle risorse acqua e suolo più sostenibile, orientata all'attenuazione dei possibili effetti negativi dei cambiamenti climatici.

Risorsa idrica

La consapevolezza della risorsa idrica come risorsa non rinnovabile, ha accentuato la compe-

tizione fra i settori agricolo, industriale ed urbano e contribuito ad innescare il dibattito sulla *questione irrigua*. I temi del risparmio idrico e dell'uso di corpi idrici non convenzionali (es. reflui urbani trattati) sono oggi di grande attualità. Inoltre, la limitazione di disponibilità idriche aumenta l'uso di acque di bassa qualità che in alcuni casi (es. acque salmastre) contribuendo all'aumento del rischio di salinizzazione e desertificazione (Costantini et al., 2007).

Gestione dell'irrigazione

L'avanzamento delle conoscenze nel settore irriguo ha permesso un notevole progresso della tecnica dell'irrigazione migliorando l'uniformità di distribuzione dell'acqua, la stima delle esigenze idriche e favorendo l'adozione di metodi ad elevata efficienza (localizzati, subirrigazione). In tale direzione hanno operato alcuni organismi politico-istituzionali. Ad esempio, in Basilicata va segnalata una importante iniziativa del governo regionale, intrapresa nel 2001 (D.G.R. n. 2359) che ha incentivato la riconversione di metodi irrigui a bassa efficienza (es. sovrachoma) in metodi ad alta efficienza (a goccia). Purtroppo, se da un lato vi sono delle iniziative meritevoli, volte all'ulteriore diffusione dei metodi irrigui più sostenibili, dall'altro vi sono interi areali agricoli del Paese (es. Veronese) che adottano ancora metodi con bassissima efficienza d'uso (es. a scorrimento) (Xiloyannis e Montanaro, 2007).

Per fronteggiare adeguatamente gli effetti dei cambiamenti del clima, riteniamo che la progettazione degli impianti irrigui in agricoltura debba essere guidata dalle acquisizioni tecnologiche esistenti ma anche e soprattutto dalla consapevolezza della limitazione della risorsa idrica stessa. In tal senso andrebbero riviste su scala nazionale le modalità di pagamento del canone irriguo da parte delle aziende agricole (attualmente molto diversificate fra le Regioni) secondo un criterio di penalità/premialità che ridurrebbe sicuramente i "consumi di lusso" ed uniformerebbe le modalità d'uso della risorsa idrica. In alcuni casi (es. Basilicata) il canone è in relazione esclusivamente alla superficie irrigata e non al consumo effettivo come invece avviene in altre realtà (es. Puglia). In molte aree agricole, è urgente un adeguamento infrastrut-

turale della rete irrigua che vada nella direzione di fornire l'acqua "a domanda" e non "a calendario", un presupposto essenziale per la corretta gestione dei metodi irrigui ad alta efficienza.

La gestione del metodo irriguo localizzato in frutticoltura presenta alcuni elementi critici per la definizione di volumi e turni di adacquamento appropriati. È necessario dimensionare il volume di suolo interessato dall'irrigazione, il cui contenuto idrico sarà gestito prevalentemente con la pratica irrigua. Tale volume unitamente alle caratteristiche idrologiche del suolo, determina la quantità di acqua disponibile che il frutticoltore deve gestire (Dichio et al., 2008).

In termini di risparmio della risorsa idrica, questo tipo di gestione consente di ottimizzare l'applicazione dello stress idrico controllato riducendo significativamente gli apporti idrici e mantenendo inalterate le rese. Ad esempio in un pescheto (cv Supercrimson) gestito in modo sostenibile (applicazioni di compost, trinciatura residui potatura, inerbimento) è stato possibile ridurre del 23% il volume irriguo stagionale normalmente impiegato dai peschicoltori, ottenendo così un risparmio idrico medio di 1.450 m³ ha⁻¹ (Dichio et al., 2010 in press)

La gestione sostenibile dell'irrigazione, attraverso la riduzione dei volumi irrigui, conseguentemente riduce anche la quantità di sali apportati che in alcuni casi possono risultare significativi. Si stima che in una stagione irrigua per un frutteto allevato al Sud Italia (volume irriguo di 5.000 m³ ha⁻¹) vengono apportati 180 kg ha⁻¹ di cloro, 360 di solfati, 350 di sodio, 400 di calcio, 975 di bicarbonato (Montanaro et al., 2008). Negli areali in cui i cambiamenti climatici hanno ridimensionato l'entità delle piogge ed aumentato la domanda evapotraspirativa, tale problematica assume maggior rilevanza in quanto si riduce l'effetto di dilavamento dei sali favorito proprio dalle piogge (Xiloyannis et al., 2006).

Risorse idriche alternative

Alla luce dei cambiamenti climatici, si prevede un aumento della competizione per la risorsa idrica fra i vari settori produttivi (agricolo, industriale, turistico) ed anche i centri urbani. Con

buona probabilità, sarà il comparto agricolo ad essere penalizzato, pertanto è necessaria l'individuazione di fonti di acqua alternative da destinare all'irrigazione. L'uso dei reflui urbani (opportunitamente trattati) per fini irrigui è da molto tempo una realtà in alcuni paesi del bacino del Mediterraneo (Israele, Cipro, Giordania, Tunisia) che soffrono una crisi idrica strutturale, mentre in Italia il riuso controllato dei reflui urbani ed industriali depurati per l'irrigazione è limitato ad alcune regioni (Emilia Romagna, Lombardia, Puglia, Sicilia e Sardegna) (Palese et al., 2008).

La legislazione italiana per l'uso di acque reflue nel comparto agricolo (DM n. 185 del 12 Giugno 2003) impone limiti più severi rispetto alle indicazioni della Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ostacolando così l'utilizzo di tale risorsa (Palese et al., 2008). I costi economici (elevati) per l'abbattimento della carica microbiologica entro i limiti di legge, sono con buona probabilità l'ostacolo principale ad una maggior diffusione dell'impiego dei reflui urbani in agricoltura.

L'attività di ricerca decennale condotta in Basilicata in deroga alla normativa corrente, ha dimostrato il grande potenziale socio-economico legato all'uso di reflui trattati in agricoltura. Infatti, nel caso di un oliveto normalmente in asciutto, l'uso di reflui trattati ha incrementato del 170% il valore della produzione di olive con un livello di contaminazione ampiamente al di sotto dei limiti di legge (Palese et al., 2008). L'impiego di tali acque ha permesso l'apporto di nutritivi (in particolare azoto) contribuendo alla riduzione degli input esterni ed all'aumento sia della biomassa prodotta e quindi anche del carbonio atmosferico immagazzinato nel suolo.

Risorsa suolo

Attualmente la tecnica colturale utilizzata ordinariamente dagli agricoltori non presta la sufficiente attenzione al recupero della fertilità dei suoli e quindi al contenuto di sostanza organica (carbonio). Oltre al miglioramento delle caratteristiche strettamente agronomiche (capacità di ritenzione idrica, disponibilità di nutritivi, riduzione erosione, ecc.) (Wilhelm et al., 1986) l'aumento del carbonio nel suolo va inte-

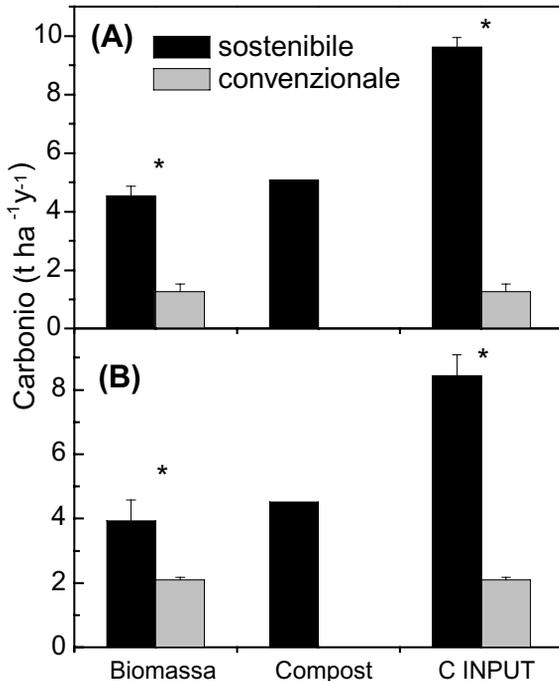


Figura 1. Carbonio apportato annualmente al suolo ($t\ ha^{-1}\ yr^{-1}$) (C INPUT) dall'inerbimento e residui di potatura (biomassa) e compost in (A) albicocco ed (B) actinidia gestiti in modo sostenibile e convenzionale. I dati sono la media di 4 anni \pm SE; confrontando i trattamenti nella stessa specie * indica una differenza significativa ($P < 0.05$, Student's *t*-test). (tratto da Montanaro et al., 2009).

Figure 1. Total annual carbon ($t\ ha^{-1}\ yr^{-1}$) (C INPUT) from above-ground weed and tree residues (biomass) and compost in (A) apricot and (B) kiwifruit orchard under sustainable and conventional management. Data are 4-year mean \pm SE; comparing treatments in the same specie * indicates a significant difference at $P < 0.05$ (Student's *t*-test).

so anche in termini di contributo al sequestro dell'anidride carbonica atmosferica (CO_2) ossia un possibile strumento per contribuire alla mitigazione dell'effetto serra.

In questa direzione andrebbero premiate le attività che promuovono l'accumulo di carbonio nel suolo (es. inerbimento, trinciatura dei residui colturali, apporto di ammendanti e compostati organici). In questo la tecnica colturale gioca un ruolo decisivo. In frutteti gestiti in modo sostenibile, gli apporti di carbonio al suolo possono raggiungere le $10\ t\ ha^{-1}$ (fig. 1).

Purtroppo, si assiste frequentemente alla bruciatura dei residui di potatura che oltre a significare un mancato apporto di sostanza organica al suolo determina emissioni di CO_2 dell'ordine di $3-4\ t\ ha^{-1}$ all'anno (Montanaro et al., 2008).

Numerosi sforzi sono tesi alla definizione delle emissioni di CO_2 dal suolo dei frutteti al fine di poter meglio valutare la sostenibilità delle tecniche di coltivazione nell'ottica di mitigazione delle emissioni dei gas serra. Risultati preliminari di indagini condotte in un albicocchetto, documentano la variabilità delle emissioni di CO_2 dal suolo in relazione ad esempio al punto di misurazione (fila, interfila) ed ovviamente al periodo dell'anno (fig. 2). È necessaria una caratterizzazione dettagliata delle emissioni di CO_2 dal suolo delle varie specie arboree e dei diversi metodi di gestione del suolo (es. inerbimento, lavorazione) in modo da chiarire la dinamica dei flussi di carbonio tra i sistemi arborei frutticoli e l'atmosfera.

L'inerbimento rappresenta anche un efficace strumento di controllo dei fenomeni erosivi caratterizzanti i suoli acclivi. È riportato che un cotico erboso in un suolo in pendenza possa contribuire al mantenimento di circa $70\ t\ ha^{-1}$ di terreno (FAO, 1993) che altrimenti andrebbero erose ogni anno con possibili altre conseguenze negative (es. l'interrimento degli invasi acquiferi). Inoltre l'inerbimento migliora la struttura del suolo, aumenta la capacità di infiltrazione. Da studi condotti in oliveti con differente ge-

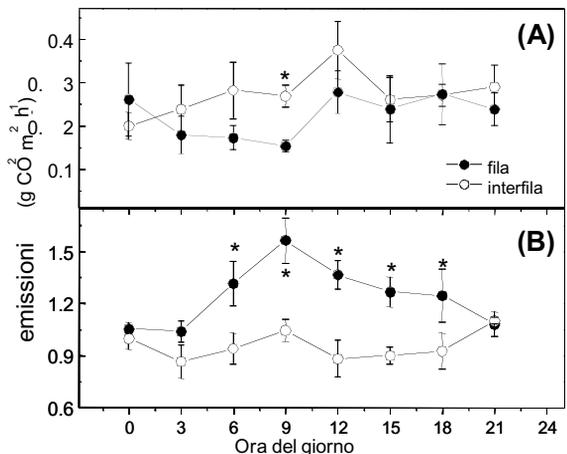


Figura 2. Andamento giornaliero delle emissioni dal suolo di CO_2 registrate in un albicocchetto in Febbraio (A) e Maggio (B). * = differenze significative ($P < 0.05$, Student's *t*-test) (da Montanaro et al., 2010).

Figure 2. Diurnal trend of the mean soil CO_2 flux (F) emitted by soil ($g\ m^{-2}\ h^{-1}$) during (A) 6-11 February and (B) 15-18 May. Each point is the average of four chambers (\pm SE). Comparing treatments in the same figure * indicates a significant difference at $P < 0.05$ (Student's *t*-test) (from Montanaro et al., 2010).

Tabella 1. Stima dell'accumulo annuale di humus in un oliveto (30 cm profondità) sostenibile (materiale di potatura trinciato, suolo inerbito) al netto della quota mineralizzata. (1,4 t m⁻³ densità apparente, 1,0% contenuto in sostanza organica, tasso di mineralizzazione annuo del 3%).

Table 1. Annual amount of humus accumulated in a olive orchard (30 cm soil depth) under sustainable management (i.e. pruning material mulched in loco, cover crops) after mineralization (1.4 t m⁻³ bulk density, 1% organic matter, 3% annual mineralization rate).

	Input di biomassa (t ha ⁻¹ di SS)	Coeff. isoumico	Humus (t ha ⁻¹ anno ⁻¹)
Materiale di potatura	3,3	0,35	1,15
Foglie	0,9	0,20	0,18
Sfalcio cotico erboso	7,3	0,15	1,10
Turnover radici	6,1	0,35	2,10
Tot.	17,6		4,53
		Mineralizzazione	-1,26
		Humus netto accumulato	3,27

stione del suolo, la conducibilità idraulica saturata di un suolo inerbito è risultata circa 12 volte più grande di quella di un suolo lavorato (cioè 160 contro 13 mm di acqua al giorno) (Palese et al., 2009) favorendo pertanto l'immagazzinamento idrico nel suolo.

L'Italia ha recepito il Protocollo di Kyoto (Legge n. 120 del 1° giugno, 2002) impegnandosi ad una riduzione complessiva del 6,5% dei gas ad effetto serra rispetto ai livelli del 1990. Nell'ambito della strategia nazionale per il rispetto dell'accordo di Kyoto (Delibera CIPE n. 123/2002) il settore agro-forestale consentirebbe un assorbimento annuo di 10,2 MtCO₂ (circa 11% del totale). Ciò sarebbe possibile grazie agli assorbimenti di carbonio derivanti da interventi di afforestazione e riforestazione, attività di gestione forestale, di gestione dei suoli agricoli e pascoli e di rivegetazione. Le eventuali misure da applicare al settore agricolo risultano essere ancora in fase di valutazione "[...] vista la completa assenza di dati in letteratura" come cita la stessa Delibera CIPE (Montanaro et al., 2008).

La gestione sostenibile del suolo come strumento per incrementare il contenuto di carbonio è una premessa indispensabile per contrastare attivamente il degrado dei suoli coltivati ed allo stesso tempo immagazzinare CO₂ atmosferica nel suolo. In tabella 1 è riportato un esempio di accumulo di humus in un oliveto gestito in modo sostenibile. Risulta che, al netto della frazione mineralizzata, sono circa 3,27 t ha⁻¹ di humus che ogni anno vengono immagazzinate nel suolo. Con questo ritmo, è presto calcolato che occorrono circa 14 anni per incre-

mentare di un punto percentuale la sostanza organica contenuta nel suolo. Inoltre, va sottolineato che tale processo comporta lo stoccaggio di circa 23 t ha⁻¹ anno⁻¹ di CO₂.

La difficoltà di reperire nelle Regioni meridionali compost di qualità certificata costituisce un chiaro limite all'attuazione di questa pratica culturale.

Gli organismi politici dovrebbero considerare la possibilità di favorire la nascita di strutture di compostaggio che consentirebbe alle aziende agricole di approvvigionarsi di compost a prezzo competitivo ed allo stesso tempo promuovere la raccolta differenziata sul territorio urbano.

Conclusioni

Alla luce dei cambiamenti climatici, la sfida attuale per la frutticoltura non è solamente il risultato produttivo, ma anche la conservazione ed il miglioramento delle risorse naturali, la protezione ed il recupero dei suoli, ed anche gli aspetti socio-economici (Kirchmann and Thorvaldsson, 2000) assumendo così un *ruolo polifunzionale*.

Emerge la necessità di monitorare con maggior frequenza il contenuto dei sali dell'acqua e l'accumulo degli stessi nei suoli. Auspichiamo che gli organismi di governo del territorio aprontino un quadro normativo adeguato per l'attuazione di programmi informativi ed operativi sul tema.

Sulla base dei dati disponibili, è auspicabile un piano nazionale che riveda complessivamente l'uso di acque reflue in agricoltura ed appo-

sti nuove risorse per l'ottimizzazione del ciclo delle acque in una prospettiva difficile, scatenata dai cambiamenti del clima.

Auspichiamo un maggior coinvolgimento degli operatori e ricercatori del settore agricolo anche nell'ambito della *questione carbonio atmosferico* (riduzione e stoccaggio nel suolo). Il settore agricolo necessita di più informazioni scientifiche per poter addivenire a modelli di certificazione dell'impronta del carbonio nei processi produttivi.

La promozione dell'uso di *compost* nella tecnica colturale agricola deve essere sostenuta dalla possibilità di reperire tale materia organica *in loco* (nascita impianti compostaggio ed incremento della raccolta differenziata).

Bibliografia

- Angelopoulos K., Dichio B., Xiloyannis C. 1996. Inhibition of photosynthesis in olive trees (*Olea europaea* L.) during water stress and rewatering. *J. Exp. Bot.*, 47, 301:1093-1100.
- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S., Palutikof J.P. (eds.) 2008: *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Costantini E.A.C, Urbano F., Bonati G., Nino P., Fais A. (eds.) 2007. *Atlante nazionale delle aree a rischio di desertificazione*. INEA, Roma.
- Dichio B., Montanaro G., Xiloyannis C. 2010. Integration of the regulated deficit irrigation strategy in a sustainable orchard management. *Acta Horticulturae*, in press.
- Dichio B., Tataranni G., Savino A., Montanaro G. 2008. Innovazioni nella gestione sostenibile dell'irrigazione del pesco. *Rivista di Frutticoltura*, 7/8:36-43.
- FAO, 1993. *Soil tillage in Africa: needs and challenges*. FAO Soils Bulletin n. 69.
- Gunderson C.A., Wullschlegel S.D. 1994. Photosynthetic acclimation in trees to rising atmospheric CO₂: A broader perspective. *Photosynthesis Research*, 39:369-388.
- Kirchmann H., Thorvaldsson G. 2000. Challenging targets for future agriculture. *European Journal of Agronomy*, 12:145-161.
- Montanaro G., Dichio B., Xiloyannis C. 2007. Response of photosynthetic machinery of field-grown kiwifruit under Mediterranean conditions during drought and rewatering. *Photosynthetica*, 45, 4:533-540.
- Montanaro G., Tuzio A. C., Aiello F., Dichio B. 2008. L'irrigazione causa principale della salinizzazione e dell'alcalinizzazione dei suoli. *Rivista di Frutticoltura*, 5:18-22.
- Palese A.M., Agnelli A.E., Celano G., Platinetti M., Vignozzi N., Xiloyannis C. 2009. Soil management and soil water balance in a mature rainfed olive orchard. *Proceedings of the Olivebioteq 2009*, 15-19 December, Sfax (Tunisia), in press.
- Palese A.M., Pasquale V., Celano G., Motta F., Xiloyannis C. 2008. Le acque reflue urbane trattate: da "prodotto di scarico" a "risorsa" per l'irrigazione in frutticoltura. *Rivista di Frutticoltura*, 5:60-64.
- Rosegrant M.W., Ewing M., Yohe G., Burton I., Huq S., Valmonte-Santos R. 2008. *Climate Change and Agriculture Threats and Opportunities*. W.B. Druckerei GmbH Hochheim am Main, Germany.
- Thomas R.B., Strain B.R. 1991. Root restriction as a factor in photosynthetic acclimation of cotton seedlings grown in elevated carbon dioxide. *Plant Physiol.*, 96:627-634.
- Usuda H., Shimogawara K. 1998. The effects of increased atmospheric carbon dioxide on growth, carbohydrates, and photosynthesis in radish, raphanus sativus. *Plant and Cell Physiology*, 39, 1:1-7.
- Wilhelm W.W., Doran J.W., Power J.F. 1986. Corn and soybean yield response to crop residue management under no-tillage production system. *Agronomy J.*, 78:184-189.
- Xiloyannis C., Dichio B., Celano G., Telesca V., Dalonzo F., Manfredi L. 2006. Drip Irrigation of Apricot Orchards in Areas with High Evaporative Demand and Low Rainfall: Accumulative Effects on Salinisation and Some Soil Chemical Characteristics. *Acta Hort.*, 717:299-302.
- Xiloyannis C., Montanaro G. 2007. L'irrigazione in una frutticoltura sostenibile nel Veronese. *Atti e Memorie dell'Accademia di Agricoltura, Scienze e Lettere di Verona*, CLXXX:341-374.

Microbiota autoctoni per il controllo dei microrganismi alteranti e patogeni negli alimenti: il ruolo della bioprotezione

Luca Cocolin*, Barbara Dal Bello, Valentina Alessandria, Paola Dolci, Kalliopi Rantsiou

*Dipartimento di Valorizzazione e Protezione delle Risorse Agroforestali
(DIVAPRA, Sezione di Microbiologia Agraria e Tecnologie Alimentari, Università di Torino)
Via Leonardo da Vinci 44, 10095 Grugliasco (TO)*

Società Italiana di Microbiologia Agraria, Alimentare ed Ambientale (SIMTREA)

Riassunto

Con il termine bioprotezione si indica l'utilizzo di microrganismi, o di loro metaboliti, per il controllo di microbiota patogeni o alteranti negli alimenti. Questo approccio di tipo biologico ha acquisito particolare rilevanza specialmente negli ultimi anni, in seguito alla richiesta da parte del consumatore di prodotti alimentari sempre più freschi e naturali, senza aggiunta di conservanti e non sottoposti a trattamenti tecnologici invasivi. I prodotti artigianali tipici sono una fonte unica di biodiversità microbica. In essi risiedono sia batteri che lieviti, che con le loro attività di tipo metabolico sono alla base dei processi di fermentazione e che portano all'ottenimento di alimenti dalle caratteristiche qualitative uniche. Accanto alla capacità prettamente fermentativa, è stato più volte evidenziato che microbiota autoctoni sono anche in grado di inibire lo sviluppo di altri microrganismi, sia patogeni, che alterativi. I batteri, e in particolare batteri lattici d'importanza alimentare, sono capaci di produrre batteriocine, proteine attive contro microrganismi patogeni, come *Listeria monocytogenes*, ma anche alteranti, come *Clostridium butyricum*. Questi ceppi sono stati ben studiati e caratterizzati e un loro utilizzo come starter microbici può aumentare sia la qualità igienico-sanitaria che la conservabilità. Inoltre anche i lieviti, ed in particolare *Saccharomyces cerevisiae* nel settore enologico, ma anche altre specie nell'ambito orto-frutticolo, producono proteine killer, che inibiscono la crescita di altri lieviti, nella maggior parte dei casi alterativi. In questo lavoro sono riassunte le principali caratteristiche di queste molecole inibenti e saranno presentate le loro più importanti applicazioni nel settore agro-alimentare.

Parole chiave: Bioprotezione, batteri lattici, lieviti, batteriocine, tossine killer.

Summary

AUTOCHTHONOUS MICROBIOTA TO CONTROL PATHOGENIC AND SPOILAGE MICROORGANISMS IN FOOD: THE ROLE OF BIOPROTECTION

Bioprotection indicates the use of microorganisms, or their metabolites, to control the pathogenic and spoilage microbiota in foods. This biological approach has become particularly relevant in the last years, following the requests of the consumers, who are asking more and more for fresh and natural products, without the use of chemical preservatives or invasive technological treatments. Artisanal products represent a unique source of microbial diversity. They contain bacteria and yeasts, carrying out the fermentation process, responsible for the formation of the unique organoleptic characteristics these products have. Several times it has been highlighted how these populations, apart from the fermentative activity, can inhibit other microorganisms, both pathogenic and spoilage. Bacteria, and more specifically lactic acid bacteria, are able to produce bacteriocins, active towards pathogens, such as *Listeria monocytogenes*, and spoilers, like *Clostridium butyricum*. These strains have been studied and characterized and their use as starter cultures can result in an increased safety and shelf-life. Moreover, also yeasts, such as *Saccharomyces cerevisiae* in the wine-making sector, but also other species in the fruit and vegetable sectors, are able to produce killer proteins, able to inhibit the growth of other yeast species, often involved in the spoilage of the product. In this paper the main characteristics of these inhibitory molecules will be summarized and their main application in the agro-food sector will be presented.

Key-words: Bioprotection, lactic acid bacteria, yeasts, bacteriocins, killer toxins.

* Autore corrispondente: tel.: +39 011 6708553; fax +39 011 6708549. Indirizzo e-mail: lucasimone.cocolin@unito.it.

1. Introduzione

Per un prodotto agroalimentare la qualità nella sua accezione più estesa, così come la sicurezza in quanto pre-requisito della qualità stessa, ne costituiscono gli elementi fondamentali e la loro tutela deve rappresentare il fine ultimo di ogni produttore. In questo, un ruolo prioritario è svolto dalla ricerca che deve mettere a punto strumenti sempre nuovi, efficaci e di facile utilizzo per controllare la sicurezza e la qualità dei prodotti, ma altresì per incrementarne gli effetti a beneficio del consumatore. Negli ultimi anni si è quindi assistito ad una intensa attività di ricerca che ha portato, da un lato, alla definizione di una larga parte dei fattori nutrizionali presenti negli alimenti e dei pericoli chimico-fisici e microbiologici connessi al loro consumo, e dall'altro alla messa a punto di tecnologie volte ad una conservazione di questi fattori nell'alimento finito e ad un efficace controllo dei pericoli. La sempre più ampia diffusione delle *mild technologies* ha determinato quindi una produzione più rispettosa della materia prima e delle sue caratteristiche compositive e sensoriali che ha trovato nei microrganismi dei validi strumenti, non solo per l'incremento della qualità, ma anche per un efficace controllo della microflora patogena ed alterante e l'aumento del valore nutrizionale.

È proprio in questa ottica che si inserisce l'applicazione sempre più diffusa dei microrganismi non solo per le normali fasi di produzione, ma altresì per una serie molto vasta di attività che vanno dal controllo della microflora patogena ed inquinante, alla eliminazione di fattori antinutrizionali e all'aumento della edibilità del prodotto.

Tutto ciò spiega quindi come di fronte ad una richiesta sempre più pressante del mercato, l'offerta sia ancora molto limitata sia in numero di ceppi disponibili, sia in attività sviluppate. Ed è particolarmente nell'ambito dei microrganismi ad azione antagonista che le possibilità offerte del mercato sono quanto mai limitate se non in molti casi, assenti. Negli ultimi anni, infatti, il consumatore è diventato sempre più esigente, preferendo composti ed ingredienti di origine naturale. In quest'ambito si colloca l'applicazione della bioprotezione intesa come utilizzo di ceppi ad attività battericida, o delle lo-

ro batteriocine, per controllare ed inibire flore patogene ed alteranti (Stiles, 1996). Benché siano disponibili alcune colture di batteri ad azione anti-listeria per formaggi e salumi, che spesso evidenziano però un limitato campo di azione in termini di condizioni operative ed attività, mancano però colture antagoniste verso altri microrganismi patogeni quali *Staphylococcus*, *Escherichia* o *Salmonella*, ma altresì colture in grado di operare su batteri alteranti quali *Clostridium* spp., *Brochothrix* spp. ed altri.

I prodotti naturalmente fermentati, cioè senza l'utilizzo di starter microbici, rappresentano un ecosistema unico per lo studio della biodiversità microbica in diverse matrici alimentari come latte, carne o vino. In particolar modo i prodotti fermentati tipici, dove le lavorazioni sono per lo più ancora tradizionali e molto spesso vengono tramandate da generazione in generazione, hanno delle caratteristiche uniche da un punto di vista organolettico, ottenute attraverso un contributo microbico peculiare. L'Italia è un paese estremamente ricco di prodotti tipici artigianali. La maggior parte di essi sono il risultato di un complesso processo di trasformazione microbica, che molto spesso è eseguito da microrganismi naturalmente presenti nelle materie prime. Da questo punto di vista rappresentano dei patrimoni unici per quanto riguarda la biodiversità microbica. Per esempio nella sola Regione Piemonte si possono indicare: 369 Prodotti Artigianali Tipici (PAT, Regolamento della Regione Piemonte n. 173/98 e 350/99), 12 Prodotti di Origine Protetta (DOP) e 5 Prodotti ad Indicazione di Origine Protetta (IGP) (Regolamento europeo n. 510/2006).

In questo lavoro verranno riassunte le principali strategie di bioprotezione, basate sull'utilizzo di ceppi produttori di batteriocine e tossine killer, nell'ambito agro-alimentare.

2. Le batteriocine

I batteri lattici (LAB) sono un gruppo di microrganismi tecnologici molto importanti nell'ambito agroalimentare, la cui capacità di fermentare gli zuccheri con produzione di acidi organici (acido lattico ed acetico) è alla base dei processi di fermentazione. Accanto alla produzione di questi metaboliti i LAB sono anche in

grado di produrre dei composti ad azione antimicrobica, in grado di inibire la crescita di microrganismi a loro vicini dal punto di vista filogenetico (Jack et al., 1995; Klaenhammer, 1993). Queste molecole, chiamate batteriocine, sono di natura proteica, solitamente sono costituite da polipeptidi singoli o organizzati in complessi e formano una famiglia molto estesa di molecole che vengono classificate in funzione del loro modo d'azione (Jack et al., 1995). La maggior parte delle batteriocine sono piccole (< 6 kDa), di natura cationica, stabili al calore, possiedono sia gruppi polari che apolari che permettono loro di penetrare le membrane cellulari. In questo gruppo si distinguono due classi principali di batteriocine (Nissen-Meyer e Nes, 1997): la classe I (lantibiotici) raggruppa batteriocine, nella cui struttura sono inclusi aminoacidi non comuni, come lantionine e β -metil lantionine, risultanti dall'estesa modificazione post-traduzionale; la classe II non subiscono questo tipo di modificazione e l'unico processo a cui vengono sottoposte è il taglio del peptide leader o segnale e, in alcuni casi, alla formazione di ponti di solfuro. Infine è possibile distinguere una terza classe di batteriocine (classe III) proposta da Klaenhammer (1993), che raggruppa molecole ad elevato peso molecolare (> 30 kDa), stabili al calore e prodotte principalmente da LAB, definite generalmente come batteriolisine.

2.1 Valutazione della capacità di microrganismi di produrre batteriocine

La ricerca e valutazione di microrganismi capaci di produrre batteriocine tradizionalmente si basa sull'isolamento di ceppi batterici, dopo campionamento microbiologico, e una loro analisi nei confronti di ceppi indicatori, per i quali si vuole definire una attività inibente. Il metodo storicamente più utilizzato a questo scopo è la diffusione in agar mediante pozzetto (AWDA dall'inglese Agar Well Diffusion Assay), in cui uno strato di agar, preparato includendo il microrganismo indicatore, viene forato creando dei pozzetti in cui viene depositato il brodo di coltura del microrganismo testato. Se dopo incubazione si viene a formare un alone di inibizione, nell'immediato intorno del pozzetto, indice di una mancata crescita del ceppo indicatore, questo indica una produzione di composti ini-

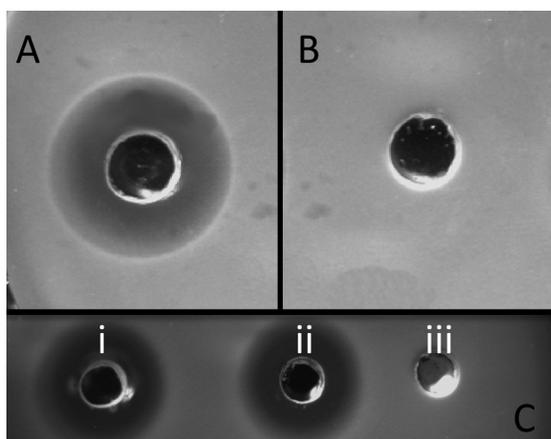


Figura 1. Agar well diffusion assay di ceppi produttori (A) e non produttori (B) di batteri lattici isolati da alimenti. Al fine di valutare l'effettiva presenza di una batteriocina (C), il brodo di coltura è neutralizzato (i), trattato con catalasi (ii) e proteinasi K (iii). Solo nel caso in cui l'alone di inibizione scompare in seguito al trattamento con la proteinasi K si può identificare il composto inibente come una batteriocina.

Figure 1. Agar well diffusion assay of bacteriocin producing (A) and non-producing (B) lactic acid bacteria strains isolated from food. In order to evaluate the presence of the bacteriocin (c), the broth culture is neutralised (i), catalase (ii) and proteinase K (iii) treated. Only when the inhibition disappear after proteinase K treatment the inhibition can be correlated to the presence of a bacteriocin.

benti da parte del ceppo studiato (fig. 1). Al fine di comprendere la natura del composto inibente sarà ulteriormente necessario trattare il brodo colturale con enzimi proteolitici e con idrossido di sodio (NaOH): in seguito ad azioni proteolitiche la batteriocina verrà disattivata, quindi l'alone scomparirà, inoltre la neutralizzazione del brodo eliminerà eventuali inibizioni dovute alla presenza di acidi organici. È inoltre fondamentale anche definire se l'azione inibente è dovuta alla presenza di perossido d'idrogeno prodotto dal metabolismo dei LAB. Per questo motivo i brodi colturali vengono anche trattati con catalasi, un enzima in grado di eliminare l' H_2O_2 (fig. 1). Questo metodo è stato comparato con metodi quantitativi di tipo spettrofotometrico ed è stata definita una buona correlazione (Parente et al., 1995). L'AWDA può essere anche utilizzato per una quantificazione del titolo della batteriocina stessa se associato all'analisi di diluizioni critiche (Barefoot

e Klaenhammer, 1983). Inoculando nei pozzetti una diluizione scalare del brodo di coltura, sarà possibile individuare il fattore di diluizione fino al quale è presente l'alone di inibizione, dando così la possibilità di calcolare le unità arbitrarie per ml (AU/ml) di batteriocina.

Questo criterio metodologico risulta particolarmente laborioso vista la necessità di isolare dei microrganismi senza avere alcuna informazione sulla loro potenziale capacità di produrre batteriocine. Ulteriormente il numero di isolati che possono essere testati è molto spesso piuttosto limitato. Per superare questi svantaggi del metodo classico, basato sull'AWDA, recentemente è stato proposto un approccio innovativo basato sull'utilizzo delle *replica plates* ricoperte con uno strato di agar contenente il ceppo indicatore. Attraverso questo sistema è possibile testare un numero molto elevato di colonie batteriche, in quanto le stesse piastre di campionamento microbiologico sono replicate, tante volte quanti sono i microrganismi indicatori, e successivamente sono ricoperte da un sottile strato di agar contenente gli stessi. In questo modo si possono testare contemporaneamente tutte le colonie presenti sulla piastra di campionamento (fino ad un massimo di 300), aumentando così notevolmente la possibilità di individuare delle colonie in grado di avere azione inibente. Come mostrato in figura 2, le colonie in grado di produrre sostanze antimicrobiche produrranno un alone di inibizione nei confronti del ceppo indicatore. Esse potranno quindi essere isolate e successivamente confermate per la loro attività antimicrobica. Utilizzando questo metodo, Dal Bello et al. (2010) hanno rilevato circa 1000 colonie di LAB e stafilococchi in grado di produrre aloni di inibizione nei confronti di ceppi patogeni ed alteranti. Dopo conferma attraverso il metodo AWDA, circa 100 erano effettivamente in grado di produrre batteriocine.

2.2 Applicazione della bioprotezione in ambito alimentare

Negli ultimi decenni i ricercatori italiani sono stati molto attivi nell'ambito della bioprotezione, sia per quanto riguarda l'isolamento ed identificazione di ceppi capaci di produrre batteriocine, sia nell'ambito della loro applicazione nei diversi comparti dell'industria alimentare.

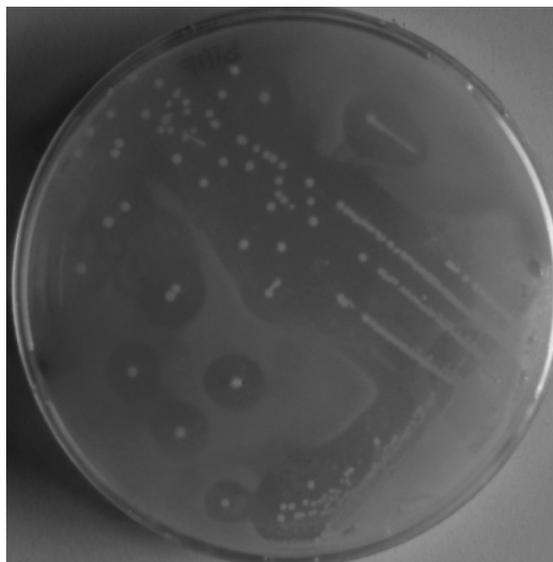


Figura 2. Rilevazione di ceppi inibenti mediante l'utilizzo di uno strato sottile di agar contenente il microrganismo indicatore distribuito su di una piastra di conta. La presenza di aloni di chiarificazione nell'intorno della colonia evidenzia la capacità della stessa di produrre sostanze ad azione antimicrobica.

Figure 2. Detection of inhibitory strains by using an overlay of agar, containing the target microorganism, and distributed on the surface of count plates. The presence of inhibitory regions around some colonies highlights its capability to produce an inhibitory compound.

Nel settore lattiero caseario sono molteplici gli esempi di ceppi produttori di batteriocine. Villani et al. (1993) isolarono un ceppo di *Enterococcus faecalis* in grado di inibire la crescita di *Listeria monocytogenes*. Dopo identificazione della proteina inibente, definita come enterocina 226NWC, il ceppo fu testato in brodo ed in latte ricostituito ed in entrambi gli esperimenti il ceppo fu in grado di inibire la crescita di *L. monocytogenes*. Anche altre specie del genere *Enterococcus* sono state descritte come produttrici di batteriocine. In uno studio condotto da Cocolin et al. (2007), due ceppi di *Enterococcus faecium* furono isolati da latte crudo di capra. Entrambi erano in grado di inibire lo sviluppo di microrganismi patogeni, come *L. monocytogenes*, ma anche alteranti, come *Clostridium butyricum*. Dopo identificazione molecolare delle determinanti geniche, fu definita la presenza di due batteriocine, enterocina A ed enterocina B, prodotte da entrambi i ceppi. Infine, in un esperimento di co-cultura di *L. mo-*

nocytogenes con i due ceppi di enterococchi descritti in questo studio in latte UHT fu evidenziato come i produttori di batteriocine potevano controllare lo sviluppo del patogeno, limitandone lo sviluppo nel corso della fermentazione. È di particolare rilevanza sottolineare la elevata biodiversità di ceppi produttori di batteriocine nell'ambito lattiero caseario. Come riportato da Moschetti et al. (2001) e da Dal Bello et al. (2010), i formaggi rappresentano degli ecosistemi unici in cui possono convivere, nello stesso prodotto, anche più ceppi produttori di batteriocine.

Un secondo comparto alimentare, in cui la bioprotezione ha trovato uno sviluppo notevole, è quello delle carni fermentate. In questo specifico ambito, sono stati pubblicati diversi contributi scientifici che descrivono attività antimicrobiche, principalmente nei confronti di microrganismi patogeni, i cui responsabili non sono solo LAB, ma anche stafilococchi. Più nello specifico, all'inizio degli anni Novanta, Villani et al. (1994) pubblicarono uno studio incentrato sulla selezione di cocchi coagulasi negativi (CNC) in grado di inibire la crescita di *L. monocytogenes*. Dopo analisi di circa 120 ceppi di CNC, 4 ceppi di *Staphylococcus xylosum* furono selezionati perché inibenti nei confronti di tutti i ceppi di *L. monocytogenes* usati in questo studio. Questa attività antimicrobica fu successivamente chiarita in uno studio da parte degli stessi autori, in cui la molecola responsabile dell'inibizione fu parzialmente caratterizzata. Come descritto da Villani et al. (1997), non fu possibile studiare l'attività antimicrobica in brodi colturali in assenza della coltura di *S. xylosum*, sottolineando la possibilità che la batteriocina non venisse liberata nel mezzo, ma fosse ancorata alla parete cellulare del microrganismo. Nonostante questo aspetto, gli autori dimostrarono l'utilità del ceppo studiato durante la fermentazione di salami Napoli inoculati con *L. monocytogenes*. Mentre il patogeno fu rilevato anche dopo 75 giorni di maturazione nei salami non inoculati con *S. xylosum*, in quelli inoculati, ci fu subito un abbattimento di carica del patogeno, seguita da una sua totale scomparsa alla fine della maturazione. Considerando i LAB, Urso et al. (2006a) descrissero la caratterizzazione tecnologica di un ceppo di *Lactobacillus sakei* in grado di produrre sakacina P, per

la produzione di salame tipico Friulano. Dopo la definizione della capacità del ceppo di crescere in diverse concentrazioni di sale, a diversi valori di pH e utilizzando zuccheri differenti, o loro miscele, il ceppo fu inoculato in una miscela per la produzione di salame e fu seguito con analisi microbiologiche. Isolando i LAB cresciuti sulle piastre di campionamento fu possibile definire la capacità del ceppo inoculato di guidare la fermentazione. Inoltre il prodotto finale fu caratterizzato da una carica batterica totale inferiore rispetto ad un salame non inoculato con il ceppo produttore di batteriocine. Dopo analisi sensoriale, il prodotto ottenuto fu preferito rispetto ad un salame ottenuto con l'uso di starter commerciali.

Se la bioprotezione è stata ben studiata nei settori lattiero-caseario e dei salami fermentati, in altri ambiti alimentari, come gli impasti acidi e dei vegetali freschi, le applicazioni sono ancora limitate. Ceppi ad attività antimicrobica furono isolati da impasti acidi (Corsetti et al., 1996) e da farine di frumento ed altri cereali (Corsetti et al., 2008) e fu anche messo in evidenza come l'utilizzo di ceppi di *Lactobacillus plantarum*, in grado di inibire lo sviluppo di *Bacillus subtilis*, rallentava il processo di alterazione del pane filante (Pepe et al., 2003). Per ciò che concerne il settore dei vegetali freschi minimamente processati, solo Randazzo et al. (2009) utilizzarono un ceppo di *Lactococcus lactis*, in grado di inibire lo sviluppo di *L. monocytogenes*, nella conservazione di insalate a 4 °C. I campioni inoculati artificialmente con il patogeno mostrarono una riduzione di circa 3 ordini di grandezza in presenza del ceppo inibente dimostrando una sua applicabilità per il controllo dell'aspetto igienico sanitario di questi prodotti.

2.3 Immobilizzazione delle batteriocine su film plastici usati per il confezionamento

Recentemente, l'ambito della bioprotezione si è esteso all'utilizzo delle batteriocine per la funzionalizzazione di materiali plastici utilizzati per il confezionamento degli alimenti. Questa applicazione è di particolare rilevanza per quelle batteriocine prodotte da microorganismi che non possono essere inoculati come agenti di fermentazioni, in quanto incompatibili. Alcuni esempi riguardano specie di *Leuconostoc*, le

quali a causa del loro metabolismo eterofermentativo e la conseguente produzione di gas, non sono considerate per la produzione di formaggi e salami. Anche se non è pensabile un utilizzo diretto di ceppi produttori, è invece auspicabile la purificazione delle batteriocine, le quali possono essere poi utilizzate come ingredienti o immobilizzate su materiali per il confezionamento. Mauriello et al. (2004) descrisse la possibilità di immobilizzare su dei film di polietilene la batteriocina prodotta da *Lb. sakei*, attiva contro *L. monocytogenes*. Il film funzionalizzato, attraverso diversi metodi, come immersione, spaying o ricopertura, si dimostrò attivo contro l'inibizione del patogeno inoculato in bistecche e carne macinata. Ercolini et al. (2006) estese ulteriormente le conoscenze a riguardo del meccanismo di azione dei film funzionalizzati con batteriocine, andando a studiare le cinetiche di morte di *L. monocytogenes* con microscopia epifluorescente, in grado di differenziare le popolazioni vitali e quelle morte, dopo colorazione con specifici composti in grado di intercalarsi al DNA delle cellule in esame. Lo studio effettuato su cellule di patogeno in sospensione o inoculate su wurstel, evidenziò una loro immediata inattivazione quando venivano a contatto con la superficie funzionalizzata del film, sottolineando un potenziale utilizzo di questi materiali per il confezionamento per un miglioramento dell'aspetto igienico sanitario degli alimenti.

Un'ulteriore applicazione di questo innovativo approccio nell'utilizzo delle batteriocine fu descritto da Ercolini et al. (2010). In questo studio, la nisina, batteriocina molto studiata e con uno spettro di azione molto ampio, fu immobilizzata su film ad alta barriera, successivamente utilizzati per la conservazione di carne bovina conservata a 1 °C. I risultati ottenuti dal monitoraggio microbiologico sottolinearono come l'utilizzo di questi film erano in grado di inibire profondamente lo sviluppo di batteri Gram positivi, come anche i Gram negativi. Attraverso delle analisi molecolari di popolazione microbica fu tuttavia evidenziato che l'ecologia microbica delle carni confezionate con film funzionalizzati, o no, non cambiava dal punto di vista qualitativo, sottolineando che le stesse specie microbiche erano alla fine responsabili dell'alterazione del prodotto.

3. Il fattore killer e le loro applicazioni in ambito alimentare

Nel 1963 fu per la prima volta osservata un'interazione lievito-lievito che venne chiamata come fenomeno killer. Esso consiste in un'azione inibente di un certo lievito, in grado di produrre una tossina attiva nei confronti di altri lieviti (Shimizu, 1993). Queste tossine possono essere proteine o glicoproteine (van Vuuren e Jacobs, 1992) e sono in grado di disattivare lieviti sensibili alla loro azione. Queste tossine sono note come fattori killer e sono prodotte e secrete nell'ambiente. I lieviti in grado di produrre fattori killer sono chiamati lieviti killer. Solitamente sono resistenti alla tossina da loro stessi prodotta, ma una tossina killer diversa può portare alla loro disattivazione. Considerando *Saccharomyces cerevisiae* si possono distinguere ceppi killer (K), sensibili (S) e neutrali (N). I ceppi killer causano la morte dei ceppi sensibili, ma non possono agire su ceppi neutrali. Qualche volta, altre tossine killer possono uccidere lieviti killer ed in questo caso si parla di lieviti killer sensibili. I ceppi neutrali non producono tossine killer, ma sono immuni nei confronti di altri ceppi killer. Infine i ceppi sensibili non producono tossine killer e sono disattivati da tossine prodotte da lieviti killer.

Il fenomeno killer è piuttosto diffuso in natura ed è stato riconosciuto in molti ceppi da laboratorio, ma anche in lieviti selvaggi di natura industriale, clinica ed isolati da diversi ambienti (Ribéreau-Gayon, 1985). Inizialmente, questo fenomeno fu descritto principalmente nell'ambito delle fermentazioni alcoliche (vino, birra e sake), ma fu poi esteso a tutto il comparto delle fermentazioni alimentari. *S. cerevisiae* è un lievito che molto comunemente possiede questo carattere, ma anche altre specie come *Candida*, *Debaryomyces*, *Hansenula*, *Kluyveromyces*, *Pichia*, *Ustilago*, *Torulopsis* e *Cryptococcus* sono in grado di sintetizzare fattori killer (Jacobs e van Vuuren, 1991). È importante sottolineare che il fenomeno killer è ristretto ad alcuni ceppi di una specie in un determinato genere, anche se il campo di azione può coinvolgere anche specie di generi diversi (van Vuuren e Jacobs, 1992).

Considerando le applicazioni che le tossine killer hanno in ambito alimentare, è indubbia la

prevalenza di studi nel settore enologico. La bibliografia è molto ricca a riguardo di ceppi di *S. cerevisiae* in grado di produrre tossine killer, anche se una grossa limitazione al loro utilizzo è l'effettiva attività della molecola nell'ambiente vino. È infatti risaputo che il pH ha una grossa influenza sull'efficacia di queste molecole, riducendola a pH bassi (Ciani et al., 2005). Anche altri lieviti diversi da *S. cerevisiae* sono in grado di produrre tossine killer in ambito enologico. Di particolare rilievo la capacità di *Pichia anomala* e *Kluyveromyces wickerhamii* di produrre delle tossine killer nei confronti di *Dekkera/Brettanomyces*, agente molto controverso in ambito enologico, in quanto in grado di alterare i vini in seguito alla sua capacità di produrre elevati tenori di fenoli volatili (4-etil fenolo e 4-etil guaiacolo). Comitini et al. (2004) e De Ingeniis et al. (2009) presero in considerazione lo studio di queste due tossine andando a definire anche il loro meccanismo di azione. Questi autori nei loro studi ipotizzarono anche un possibile utilizzo di queste tossine killer per una protezione dei vini durante il periodo di invecchiamento e conservazione. Con lo stesso approccio metodologico, Comitini e Ciani (2010) identificarono dei ceppi di *Tetrapisispora phaffi* attiva nei confronti di *Hanseniaspora uvarum*, i quali potevano essere considerati come mezzi efficienti per controllare lo sviluppo dei lieviti selvaggi nelle prime fasi delle fermentazioni alcoliche. Allestendo delle microvinificazioni inoculate con entrambi i lieviti o solo *H. uvarum*, gli autori dimostrarono come i profili fermentativi dei mosti erano molto più puliti se vi era la presenza di *T. phaffi*, la quale esercitava un'inibizione specifica nei confronti di *H. uvarum*.

Un'ulteriore applicazione dei lieviti killer nel settore agroalimentare è stato descritto da Gorretti et al. (2009). In questo studio, è descritto un approccio molto esteso di ricerca di attività killer nei confronti di una moltitudine di generi di lievito responsabili di processi di alterazioni di diverse tipologie di alimenti. Una tossina killer prodotta da *Willopsis saturnus* fu descritta come capace di inibire la crescita di 310 diversi ceppi di lievito, appartenenti a 21 specie alteranti raggruppate in 14 generi. L'attività inibente di questa tossina killer fu comparata a dei conservanti di sintesi utilizzati nel settore alimentare (potassio sorbato e potassio metabi-

solfito) e fu evidenziata una maggiore efficienza di inibizione da parte della tossina killer. Inoltre, di particolare rilevanza nel settore alimentare, l'attività della tossina non era influenzata dal pH, concentrazione di etanolo, glucosio e sale.

4. Conclusioni e sviluppi futuri

Le batteriocine ed i fattori killer sono prodotti del metabolismo microbico che più volte sono stati utilizzati nell'ambito alimentare per controllare sia microrganismi patogeni che alteranti. I lavori disponibili in letteratura hanno messo in evidenza come gli alimenti possono vedere aumentata la propria sicurezza igienico-sanitaria e la durata commerciale (*shelf-life*) in seguito all'utilizzo di ceppi microbici in grado di produrre questi composti antimicrobici. Nell'ottica di trattare gli alimenti con tecnologie sempre più rispettose della qualità e meno invasive, la bioprotezione rappresenta uno strumento ideale a tale scopo.

Una delle sfide future che la ricerca dovrà affrontare sarà lo studio della regolazione dei geni codificanti per le batteriocine ed i fattori killer. Sono molto pochi gli studi che considerano l'influenza dei processi alimentari sulla capacità di un ceppo microbico di produrre o no un determinato composto antimicrobico. Un esempio a tal riguardo è rappresentato dallo studio condotto da Urso et al. (2006b), in cui fu studiato l'effetto delle pratiche operative per la produzione di un salame fermentato, sulla capacità di un ceppo di *Lb. sakei* di produrre batteriocina. Attraverso metodiche di tipo molecolare, basate sull'ibridizzazione dell'RNA messaggero specifico codificante la batteriocina, fu evidenziato come le condizioni di lavorazione non interferivano con l'espressione del gene codificante la batteriocina (fig. 3) e con questo fu sottolineato come il ceppo preso in esame poteva essere utilizzato per impedire lo sviluppo di microrganismi patogeni, nello specifico di *L. monocytogenes*. Questo esempio sottolinea come, oggi giorno, è necessario studiare a fondo i meccanismi che sottostanno alla produzione di questi composti inibenti, in quanto è di fondamentale importanza definire che i processi produttivi a cui vanno incontro i vari alimenti, non interferiscano con la potenzialità antimicrobica del ceppo utilizzato.

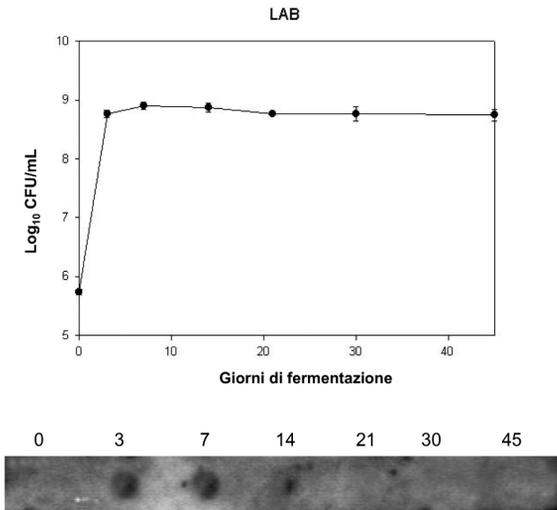


Figura 3. Conte microbiologiche di batteri lattici (LAB) e analisi dot blot di RNA estratto direttamente dal salame al fine di definire l'espressione di geni codificanti per batteriocine. La presenza di segnali a 3, 7 e 14 giorni di fermentazione nell'analisi dot blot indica che il gene codificante la batteriocina è espresso anche nelle condizioni di produzione dei salami in analisi.

Figure 3. Lactic acid bacteria (LAB) counts and dot blot analysis of the RNA extracted directly during sausage fermentation in order to define the expression of the genes encoding for the bacteriocin production. The presence at 3, 7 and 14 days of spots in the dot blot analysis highlights that the bacteriocin gene is expressed also during production of the sausages examined.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato redatto nell'ambito del progetto finanziato dalla Regione Piemonte, CIPE 2006, dal titolo: "Qualità e sicurezza dei prodotti agroalimentari Piemontesi: selezione e studio di ceppi batterici con azione antagonista nei confronti di microrganismi patogeni e alteranti".

Bibliografia

Barefoot S.F., Klaenhammer T.R. 1983. Detection and activity of lactacin B, a bacteriocin produced by *Lactobacillus acidophilus*. Appl. Environ. Microbiol., 45:1808-1815.

Ciani M., Clementi F., Faticenti F. 2005. I lieviti selezionati e il loro impiego enologico. In: Vincenzini M., Romano P., Farris G.A (eds): Microbiologia del vino, 197-219. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.

Cocolin L., Foschino R., Comi G., Fortina M.G. 2007. Description of the bacteriocins produced by two strains of *Enterococcus faecium* isolated from Italian goat milk. Food Microbiol., 24:752-758.

Comitini F., Ciani M. 2010. The zymocidal activity of *Tetrapispora phaffii* in the control of *Hanseniaspora uvarum* during early stages of winemaking. Lett. Appl. Microbiol., 50:50-56.

Comitini F., De Ingeniis J., Pepe L., Mannazzu I., Ciani M. 2004. *Pichia anomala* and *Kluyveromyces wickerhamii* killer toxins as new tools against *Dekkera/Brettanomyces* spoilage yeasts. FEMS Microbiol. Lett., 238:235-240.

Corsetti A., Gobetti M., Smacchi E. 1996. Antibacterial activity of sourdough lactic acid bacteria: isolation of a bacteriocin-like inhibitory substance from *Lactobacillus sanfrancisco* C57. Food Microbiol., 13:447-456.

Corsetti A., Settanni L., Braga T. M., de Fatima Silva Lopes M., Suzzi G. 2008. An investigation of the bacteriocinogenic potential of lactic acid bacteria associated with wheat (*Triticum durum*) kernels and non-conventional flours. LWT- Food Sci. Technol., 41:1173-1182.

Dal Bello B., Rantsiou K., Bellio A., Zeppa G., Ambrosoli R., Civera T., Cocolin L. 2010. Microbial ecology of artisanal products from north west of Italy and antimicrobial activity of the autochthonous populations. LWT- Food Sci. Technol., in stampa.

De Ingeniis J., Raffaelli N., Ciani M., Mannazzu I. 2009. *Pichia anomala* DBVPG 3003 secretes a ubiquitin-like protein that has antimicrobial activity. Appl. Environ. Microbiol., 75:1129-1134.

Ercolini D., Ferrocino I., La Storia A., Mauriello G., Gigli S., Masi P., Villani F. 2010. Development of spoilage microbiota in beef stored in nisin activated packaging. Food Microbiol., 27:137-143.

Ercolini D., La Storia A., Villani F., Mauriello G. 2006. Effect of a bacteriocin-activated polythene film on *Listeria monocytogenes* as evaluated by viable staining and epifluorescence microscopy. J. Appl. Microbiol., 100:765-772.

Goretti M., Turchetti B., Buratta M., Branda E., Corazzi L., Vaughan-Martini A., Buzzini P. 2009. *In vitro* antimycotic activity of a *Williopsis saturnus* killer protein against food spoilage yeasts. Int. J. Food Microbiol., 131:178-182.

Jack R.W., Tagg J.R., Ray B. 1995. Bacteriocins of gram-positive bacteria. Microbiol. Rev., 59:171-200.

Jacobs C.J., van Vuuren H.J.J. 1991. Effects of different killer yeasts on wine fermentations. Am. J. Enol. Vitic., 4:295-300.

Klaenhammer T.R. 1993. Genetics of bacteriocins produced by lactic acid bacteria. FEMS Microbiol. Rev., 12:39-86.

Mauriello G., Ercolini D., La Storia A., Casaburi A., Villani F. 2004. Development of polythene films for food packaging activated with an antilisterial bacteriocin from *Lactobacillus curvatus* 32Y. J. Appl. Microbiol., 97:314-322.

Moschetti G., Blaiotta G., Villani F., Coppola S. 2001. Nisin producing organisms during traditional "Fior di latte" cheese making monitored by multiplex-PCR and PFGE. Int. J. Food Microbiol., 63:109-116.

- Nissen-Meyer J., Nes I.F. 1997. Ribosomally synthesized antimicrobial peptides: their function, structure, biogenesis, and mechanism of action. *Arch. Microbiol.*, 167:67-77.
- Parente E., Brienza C., Moles M., Ricciardi A. 1995. A comparison of methods for the measurement of bacteriocin activity. *J. Microbiol. Methods*, 22:95-108.
- Pepe O., Blaiotta G., Moschetti G., Greco T., Villani F. 2003. Rope-producing strains of *Bacillus* spp. from wheat bread and strategy for their control by lactic acid bacteria. *Appl. Environm. Microbiol.*, 69:2321-2329.
- Randazzo C.L., Pitino I., Scifò G.O., Caggia C. 2009. Biopreservation of minimally processed iceberg lettuces using a bacteriocin produced by *Lactococcus lactis* wild strain. *Food Control*, 20:756-763.
- Ribéreau-Gayon P. 1985. New developments in wine microbiology. *Am. J. Enol. Vitic.*, 36:1-10.
- Shimizu K. 1993. Killer yeasts. In: Fleet G.H. (ed.): *Wine Microbiology and Biotechnology*, 243-264. Harwood Academic Publishers, Chur, Switzerland.
- Stiles M.E. 1996. Biopreservation by lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 70:331-345.
- van Vuuren H.J.J., Jacobs C.J. 1992. Killer yeasts in the wine industry: a review. *Am. J. Enol. Vitic.*, 43:119-128.
- Urso R., Rantsiou K., Cantoni C., Comi G., Cocolin L. 2006a. Technological characterization of a bacteriocin-producing *Lactobacillus sakei* and its use in fermented sausages production. *Int. J. Food Microbiol.*, 110:232-239.
- Urso R., Rantsiou K., Cantoni C., Comi G., Cocolin L. 2006b. Sequencing and expression analysis of the sakacin P bacteriocin produced by a *Lactobacillus sakei* strain isolated from naturally fermented sausages. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 71:480-485.
- Villani F., Pepe O., Mauriello G., Salzano G., Moschetti G., Coppola S. 1994. Antimicrobial activity of *Staphylococcus xyloso* from Italian sausages against *Listeria monocytogenes*. *Let. Appl. Microbiol.*, 18:159-161.
- Villani F., Salzano G., Sorrentino E., Pepe O., Marino P., Coppola S. 1993. Enterocin 226NWC, a bacteriocin produced by *Enterococcus faecalis* 226, active against *Listeria monocytogenes*. *J. Appl. Bacteriol.*, 74:380-387.
- Villani F., Sannino L., Moschetti G., Mauriello G., Pepe O., Amodio-Cocchieri R., Coppola S. 1997. Partial characterization of an antagonistic substance produced by *Staphylococcus xyloso* 1E and determination of the effectiveness of the producer strain to inhibit *Listeria monocytogenes* in Italian sausages. *Food Microbiol.*, 14:555-566.

Evoluzione degli ecosistemi naturali e agricoli in relazione ai cambiamenti climatici

Vincenzo G.G. Mennella*, Luca Pacicco, David Grohmann

Dipartimento Uomo e Territorio, Università di Perugia

Associazione Italiana di Ingegneria Agraria

Riassunto

È oramai acclarato sia a livello scientifico che economico che la tutela dell'ambiente è la strada per lo sviluppo in quanto non può esservi vero sviluppo se gli equilibri ecologici vengono messi in pericolo e le risorse naturali saccheggiate in modo indiscriminato.

I cambiamenti climatici e i loro effetti sugli agroecosistemi non costituiscono solo una questione scientifica ma vanno considerati come un problema degli esseri umani in quanto parti integranti della natura.

Nella relazione vengono presentati alcuni risultati delle unità operative del progetto FISR-Micena, relativi alle evoluzioni più significative dei sistemi agricoli e naturali in relazione agli andamenti climatici.

Per quattro aree ad alto grado di naturalità della Sardegna sono stati confrontati dati climatici e indice NDVI derivato da immagini satellitari; per quanto concerne i sistemi agricoli l'analisi ambientale effettuata sul comprensorio del Trasimeno ha evidenziato alcuni singolarità nell'andamento della temperatura media dell'aria a cui è corrisposta una variazione delle fasi fenomenologiche degli indicatori utilizzati e una complessiva diminuzione delle rese complessive.

Parole chiave: cambiamenti climatici, indice mosca dell'olivo, indice telerilevato NDVI, sistema agricolo, sistema naturale.

Summary

EVOLUTION OF NATURAL AND AGRICULTURAL ECOSYSTEMS IN RELATION TO CLIMATE CHANGE

By now it is clear, at both scientific and economic levels, that environmental protection is the right path for development, as there can't be no real development if ecological balances are put in danger and natural resources are indiscriminately exploited.

Climate changes and their effects on agro-ecosystems not only contribute to the scientific debate but must be considered as an issue for all the human beings, as integral parts of nature.

In the paper are presented several results achieved by the operative units of the FISR-Micena project concerning the most significant evolutions of agricultural and natural systems in relationship with the observed climate trends. For what concern four Sardinia's areas with an high naturalistic value, the climate data have been confronted with NDVI index data derived from satellite images; for what concern agricultural systems the environmental analysis carried out in the Trasimeno lake district has pointed out several singularities in the mean temperature trend with corresponding variations of some phenological phases of the analyzed indicators and a comprehensive reduction of the production yields.

Key-words: climate changes, olive fly index, NDVI index, agricultural system, natural system.

* Autore corrispondente: tel. +39 075 5856083; fax: +39 075 5856086. Indirizzo e-mail: v.mennella39@alice.it

Introduzione

In seguito a eventi meteorologici rilevanti e imprevedibili che da alcuni anni si verificano con sempre maggiore frequenza l'immaginario collettivo percepisce che il clima sta cambiando. Ma cosa vuol dire che il clima sta cambiando? Cosa provoca queste mutazioni? Cosa dobbiamo e possiamo fare? Sono questi gli interrogativi a cui ricercatori di tutto il mondo stanno cercando di dare risposte, confortati da analisi e indagini condotte con estremo rigore dal punto di vista scientifico, prefigurando scenari talora preoccupanti sul futuro del nostro pianeta, sia perché le modificazioni in atto si ritengono inevitabili e a lungo termine sia per le loro ripercussioni sulla stabilità della società e sulla vita nel pianeta.

È oramai acclarato a livello scientifico ed economico, ma non tutti ne sono coscienti e consapevoli, che la tutela dell'ambiente non costituisce un ostacolo allo sviluppo ma è la strada per lo sviluppo in quanto non può esservi vero sviluppo se le risorse naturali vengono saccheggiate e gli equilibri ecologici messi in pericolo dalle varie forme di inquinamento.

I cambiamenti climatici e i loro effetti sugli agroecosistemi non costituiscono solo una questione scientifica ma debbono essere considerati più attentamente come un problema degli esseri umani in quanto parti integranti della natura e non al di fuori di essa.

Il sistema climatico è, nel nostro pianeta, uno dei più complessi per il numero delle variabili stocastiche coinvolte e delle relazioni che le legano per la gran parte ancora ignote. Va sottolineato inoltre che il clima è la combinazione delle condizioni meteorologiche prevalenti in una regione su lunghi periodi di tempo (25-30 anni), quindi solo l'osservazione prolungata nel tempo di parametri come la temperatura, le precipitazioni e l'umidità consente di ottenere valori medi statisticamente significativi che possono descrivere il clima di una determinata regione.

Approcciando un sistema complesso qual è il clima non possiamo tacere che ci si trova in una situazione di incertezza generale. Se infatti è possibile individuare trend di variazione per alcune delle principali variabili climatiche a livello globale, altrettanto non si può dire se si fa riferimento a orizzonti spaziali limitati o ad alcune particolari variabili.

Un ulteriore grado di incertezza viene aggiunto allorché si fa riferimento ad alcune forzanti naturali e antropiche e alle loro mutue interazioni.

Significativo lo schema riassuntivo in cui (fig. 1) vengono sinteticamente rappresentate le dinamiche che intercorrono tra forzanti, effetti, impatti e sviluppo socio-economico.

La comunità scientifica è sempre più orientata verso la convinzione che i dati raccolti indichino una generale trasformazione del clima e quindi ciò cui si sta assistendo non è la semplice espressione delle naturali oscillazioni intrinseche a tale sistema.

Per ottenere informazioni obiettive sullo stato del rapporto tra società umane e cambiamenti climatici è indispensabile riferirsi ai documenti dell'*Intergovernmental Panel of Climate Changes* (IPCC) composto da un gruppo internazionale di ricercatori, organizzato sotto la guida delle Nazioni Unite, che in campo scientifico internazionale costituiscono la massima autorità sull'argomento.

I risultati delle ricerche raccolte e organizzate nei documenti dell'IPCC indicano con la massima evidenza e condivisione che:

- le emissioni di gas serra (GHG) stanno aumentando esponenzialmente dal periodo preindustriale e continueranno a crescere nei prossimi decenni;
- il clima della terra sta cambiando;
- l'ipotesi che il cambiamento sia indipendente dalle attività umane non è significativa.

Le valutazioni globali delle osservazioni dal 1970 ad oggi consentono di individuare l'effetto del riscaldamento in molti sistemi fisici e biologici (dal 66% al 99% a seconda del sistema). In generale si stanno osservando e nei prossimi decenni si amplieranno (probabilità 90-99%) fenomeni quali l'aumento delle precipitazioni alle medie e alte latitudini con una diminuzione nelle regioni tropicali e subtropicali; l'aumento nella frequenza e nell'intensità degli eventi climatici estremi come alluvioni, tempeste, ondate di caldo e di freddo eccessivi; l'aumento del rischio di desertificazione in aree estese; la diminuzione dei ghiacciai nelle principali catene montuose mondiali; la crescita del livello del mare; nonché una riduzione complessiva delle disponibilità alimentari, non compensata dall'aumento di produttività delle coltivazioni dei paesi siti al Nord del pianeta. Le zone più col-

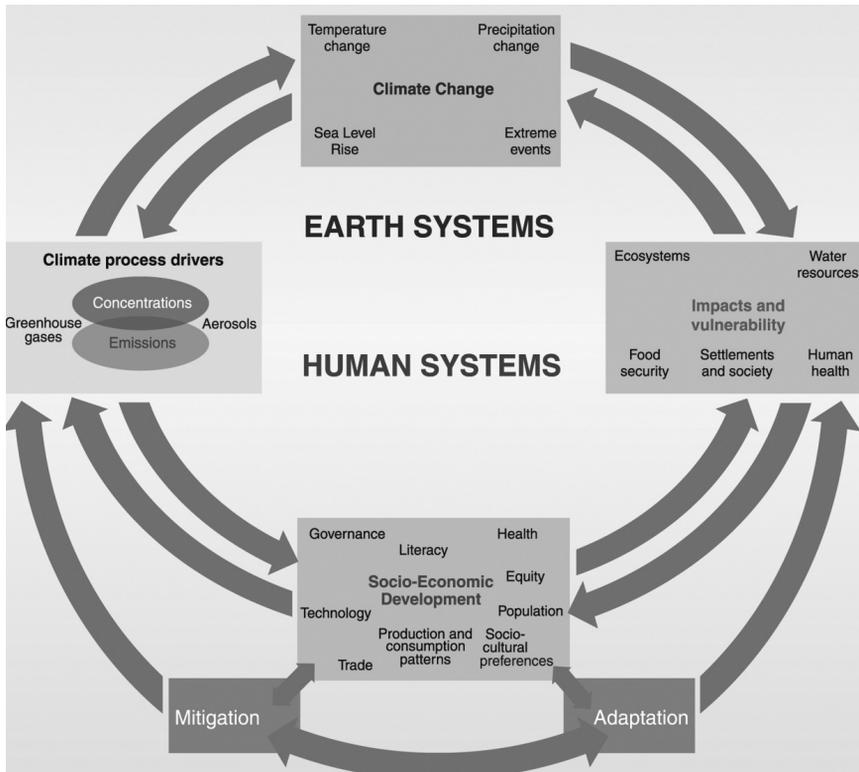


Figura 1. Schema riassuntivo forzanti/risposte del sistema climatico.

Figure 1. Climate system process drivers/responses.

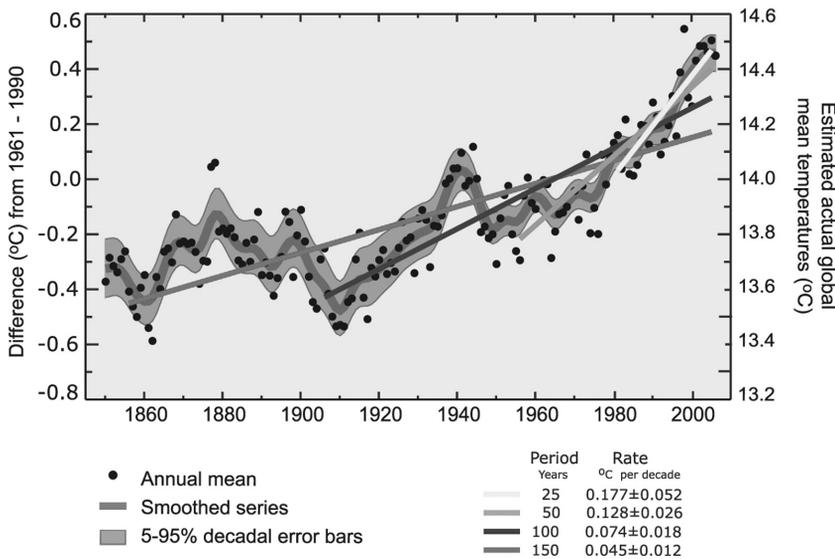


Figura 2. Andamento della temperatura media globale.

Figure 2. Global mean temperature trend.

pite saranno quelle più povere e sovraffollate del pianeta (in Europa la parte mediterranea) che indurranno una ampia redistribuzione delle popolazioni e delle attività economiche. Si può dire con certezza che a livello globale a partire dal 1860, data da cui sono disponibili dati at-

tendibili (fig. 2), la temperatura media della terra è in leggero aumento (meno di 1 °C) e che negli ultimi cinquant'anni si è avuto un incremento della temperatura più marcato rispetto ai periodi precedenti come si evidenzia dalla inclinazione delle linee di regressione. In termini

di durata e ampiezza del fenomeno il riscaldamento durante il 1900 è stato il più importante negli ultimi mille anni.

Per quanto concerne l'affidabilità dei dati riportati va sottolineato che i documenti dell'IPCC, essendo basati su meccanismi congegnati per escludere la non obiettività e garantire l'accuratezza delle informazioni (associate sistematicamente ad una stima dell'incertezza) e per escludere influenze ideologiche e politiche dominanti sui risultati resi pubblici, costituiscono le conoscenze più affidabili a disposizione. Esse sono prodotte dal lavoro di migliaia di ricercatori e condivise dai governi di tutto il mondo, che si riuniscono periodicamente ogni quattro anni per fare il punto della situazione e decidere di conseguenza impegni e misure per fronteggiare eventuali emergenze e definire il percorso per un futuro sostenibile.

Impatti del cambiamento climatico sugli ecosistemi

Le più rilevanti conseguenze dei cambiamenti climatici riguardano quindi i sistemi naturali e in particolare gli ecosistemi terrestri e acquatici e i sistemi antropici come l'agricoltura, le risorse idriche, l'ambiente umano e costiero, la salute umana.

L'aumento della temperatura, il cambiamento del regime delle precipitazioni e dei venti e le variazioni di frequenza e intensità degli eventi estremi sono i principali elementi che agiscono sulle specie vegetali e animali.

Le specie possono rispondere a tali variazioni o adattandosi alle nuove condizioni o attraverso una selezione genetica che permetta la sopravvivenza nelle nuove condizioni. Il complesso dei cambiamenti fisiologici, tecnologici, demografici, geografici delle singole specie determina la modificazione degli ecosistemi e della biodiversità.

Gli impatti su specie ed ecosistemi si possono raggruppare (Hughes, 2002; Wather et al., 2002) nelle seguenti categorie: impatti sulla fisiologia e sul comportamento; impatti sul ciclo vitale; impatti sulla distribuzione geografica; impatti sulla composizione e sulle interazioni delle specie nelle comunità ecologiche. È necessario considerare anche i tempi di risposta che caratterizzano i diversi processi influenzati dal

cambiamento climatico da quelli brevi (giorni-mesi) per gli impatti sulla fisiologia a quelli lunghi (centinaia di anni, millenni) tipici dei processi evolutivi. Un'altra considerazione riguarda le verifiche sperimentali, che possono essere effettuate solo attraverso l'uso di modellistica climatica, fra l'altro in continua evoluzione e perfezionamento, la cui scala minima di applicazione è quella continentale e sub-continentale.

Conseguentemente mentre le strategie di mitigazione sono per loro natura globali quelle di adattamento devono necessariamente essere locali, creando quindi una forte domanda di informazione più localizzata rispetto agli indici globali del cambiamento climatico.

Il caso del mediterraneo è emblematico in quanto i modelli globali non riescono a dare che una rappresentazione molto approssimativa della regione a causa della sua orografia complessa, inserita al bordo tra l'area meteorologica tropicale e quella delle medie latitudini, teatro di delicate interazioni oceano-atmosfera e con grandi contrasti termici. Tuttavia i modelli concordano sull'aspetto di fondo della diminuzione delle precipitazioni specialmente invernali e l'aumento delle temperature, particolarmente quelle estive, nel bacino del mediterraneo. Ed è con riferimento a questa area che anni fa è stato varato a scala nazionale il progetto FISR-Micena in via di conclusione di cui chi vi parla ha la responsabilità di una unità operativa. Vi esporrò pertanto alcuni risultati parziali.

Risultati delle ricerche (progetto FISR-Micena)

Gli obiettivi di questa Unità Operativa, per i primi due anni di attività, erano quelli di costruire banche dati informatizzate, gestite e aggiornabili in relazione alle variazioni climatiche, per la conoscenza delle evoluzioni dei sistemi naturali e agricoli e di rappresentare graficamente le evoluzioni più significative.

Per quanto concerne il sistema naturale, sono state individuate quattro aree in Sardegna (fig. 3) ad elevato grado di variabilità rappresentative dell'ambiente mediterraneo e della variabilità climatica regionale dove sono state studiate le relazioni tra la variazione dell'indice telerilevato NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e l'andamento delle principali va-

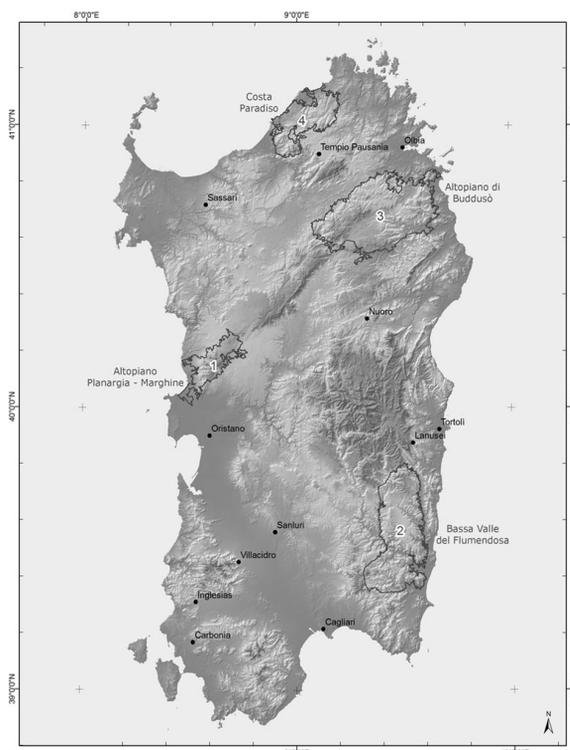


Figura 3. Aree studio.
Figure 3. Study areas.

riabili climatiche, implementando delle banche dati sull'evoluzione del sistema naturale.

Le metodologie utilizzate e i risultati ottenuti sono riportati nel poster (Pacocco et al., 2009). Mi limiterò pertanto a sottolineare che l'utilizzo di dati telerilevati da satellite, soprattutto immagini riescono a mettere in evidenza la variabilità spazio-temporale dell'indice di attività fotosintetica della vegetazione e pertanto l'uso di serie temporali di immagini NDVI a bassa risoluzione consente di stimare variazioni di questo parametro in risposta a eventuali trend dei principali fattori limitanti lo sviluppo della vegetazione, quali piogge e temperature. Nello studio cui ho fatto riferimento sono stati analizzati e messi in relazione in maniera combinata, i cumulati di precipitazioni e le temperature medie e dell'indice NDVI, su base mensile, riferiti al periodo 1997-2008. I risultati ottenuti hanno evidenziato che all'aumentare delle precipitazioni corrisponde un incremento dei valori dell'indice, legato all'aumento della biomassa prodotta.

L'incremento dell'indice NDVI si manifesta con un certo ritardo rispetto all'incremento plu-

viometrico, il che è attribuibile alla risposta biologica specifica dei sistemi naturali. Nelle aree caratterizzate da vegetazione prevalentemente arborea l'indice di vegetazione ha un andamento costante, mentre nelle aree caratterizzate da vegetazione tipica della macchia mediterranea l'oscillazione dell'indice NDVI, in relazione all'andamento delle precipitazioni, risulta essere più ampia. Questo comportamento dell'indice è in parte legato alla diversa risposta della vegetazione arborea rispetto a quella arbustiva ed erbacea. Dall'analisi del valore medio del NDVI annuale massimo (fig. 4), calcolato all'interno di ciascuna area di studio, si evidenzia che il trend per ogni area è in aumento, con andamenti particolarmente significativi per alcune aree.

Nel complesso si può affermare che in tutte le aree di studio la copertura vegetale è in aumento, con trend di crescita diversificati. Il cumulato annuale di precipitazione medio evidenzia un trend positivo per tutte le aree.

Per poter quantificare le variazioni della copertura vegetale, nell'arco di tempo considerato, ci si è avvalsi del calcolo del Coefficiente di variazione (CoV).

È risultato che a bassi valori del CoV, corrispondono aree caratterizzate da bassa variabilità dell'indice NDVI, quindi limitate variazioni dello stato di copertura vegetale. A valori più elevati corrispondono, invece, aree in cui si sono verificate ampie variazioni dello stato di copertura vegetale.

Le osservazioni climatiche di carattere con-

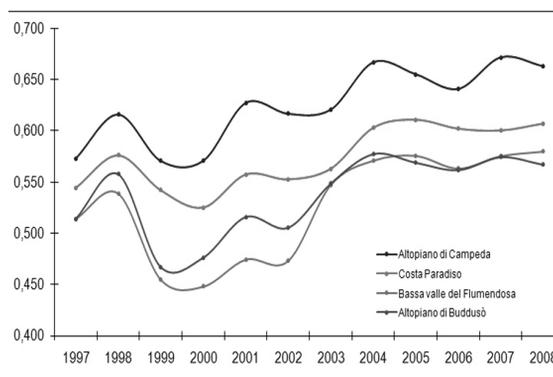


Figura 4. Andamento del valore medio dell'indice NDVI massimo per il periodo 2001-2008.

Figure 4. Max NDVI index mean value trend (2001-2008).

tinente, pubblicate nel Rapporto APAT-IPCC (Carraio et al., 2007), non trovano però conferma nell'analisi effettuata nelle aree di studio, dove si registra un aumento della piovosità e una sostanziale stabilità delle temperature. Va comunque sottolineato che la ridotta finestra temporale cui si riferiscono tali analisi non ha permesso l'individuazione di trend climatici, secondo quella che è la loro definizione di osservazioni trentennali, sebbene i dati raccolti e analizzati offrano interessanti spunti per approfondire le analisi e individuare le correlazioni significative. Per quanto concerne il sistema agricolo, l'area individuata è quella del bacino del lago Trasimeno.

Per tale area sono stati studiati gli effetti dei mutamenti climatici attraverso un database che raccoglie dati climatici e dati relativi a indicatori di produzione.

Per quanto concerne i sistemi agricoli l'attenzione si è concentrata sull'analisi delle serie storiche meteorologiche e quelle relative alla resa in olio delle olive raccolte nell'area dell'isola Polvese, lago Trasimeno. I primi risultati conseguiti sono stati la costruzione di un database climatico, e l'individuazione di un set di indicatori:

1. Andamento della temperatura dell'aria (indicatore climatico).
2. Andamento dell'umidità relativa (indicatore climatico).
3. Frequenza delle gelate tardive (indicatore climatico).
4. Produttività delle coltivazioni di olivo (indicatore vegetale).
5. Variazione epoca della fioritura (indicatore fenologico).
6. Andamento della popolazione della mosca dell'olivo (indicatore faunistico).

L'olivo è stato scelto come indicatore per le sue caratteristiche di impianto pluriennale e per la scarsità di input chimici necessari alla coltivazione considerato che l'ecosistema in oggetto si trova all'interno di un'area protetta.

Ciò ha permesso di individuare con maggior precisione quelli che sono gli effetti diretti del clima sull'indicatore potendo in qualche misura trascurare le alterazioni dovute ai trend di sviluppo apportati da interventi di miglioramento genetico delle colture oppure a modifiche nelle tecniche di coltivazione.

Dall'analisi dei dati emerge un complessivo

aumento della temperatura media dell'aria di circa 1,1 °C nei venti anni di osservazione. Gli aumenti maggiori risultano relativi alle temperature minime, diminuendo di fatto la variabilità complessiva della temperatura. Un altro dato interessante si può apprezzare, considerando l'andamento delle temperature disaccoppiato per i mesi dell'anno. Le temperature dei mesi di maggio e giugno risultano aumentate anche di 4 gradi (fig. 5) e ciò giustifica la variazione nei tempi in cui si susseguono le varie fasi fenologiche della pianta. In particolare si riscontra un anticipo della fase di fioritura, dovuto all'aumento di gradi giorno disponibili, e conseguentemente un allungamento della fase vegetativa della cultivar, Dolce Agogia, oggetto delle osservazioni.

Sulla base delle considerazioni riportate è possibile intravedere l'azione preponderante che la temperatura dell'aria esercita sulla dinamica delle popolazioni di *Bactrocera Oleae* (mosca dell'olivo) principale fitofago dell'olivo, sia direttamente, limitando le possibilità di sopravvivenza dei vari stadi e di moltiplicazione degli adulti, sia indirettamente influenzando lo stato fisiologico della pianta ospite.

Analizzando poi le dinamiche e gli effetti degli attacchi della mosca dell'olivo è stato possibile individuare una relazione tra la resa in olio delle olive raccolte e la diffusione delle mosche nel comprensorio di interesse. La biomassa direttamente perduta perché mangiata dalle larve e l'effetto di disidratazione dovuto alla presenza delle gallerie scavate nei frutti, comporta un'evidente diminuzione della resa.

Tale diminuzione pare avere un limite inferiore al 13% (fig. 6).

Negli anni in cui l'umidità del periodo estivo permette una dinamica positiva delle popolazioni di mosca l'andamento che si osserva è l'effetto delle infestazioni, negli anni in cui invece si registra un'umidità insufficiente alla proliferazione degli attacchi, la diminuzione della resa è invece l'effetto della mancanza di turgidità dei frutti, propria di una stagione secca.

Conclusioni

Per quanto concerne le aree naturali della Sardegna le analisi dei dati non hanno evidenziato significativi trend evolutivi dello stato della co-

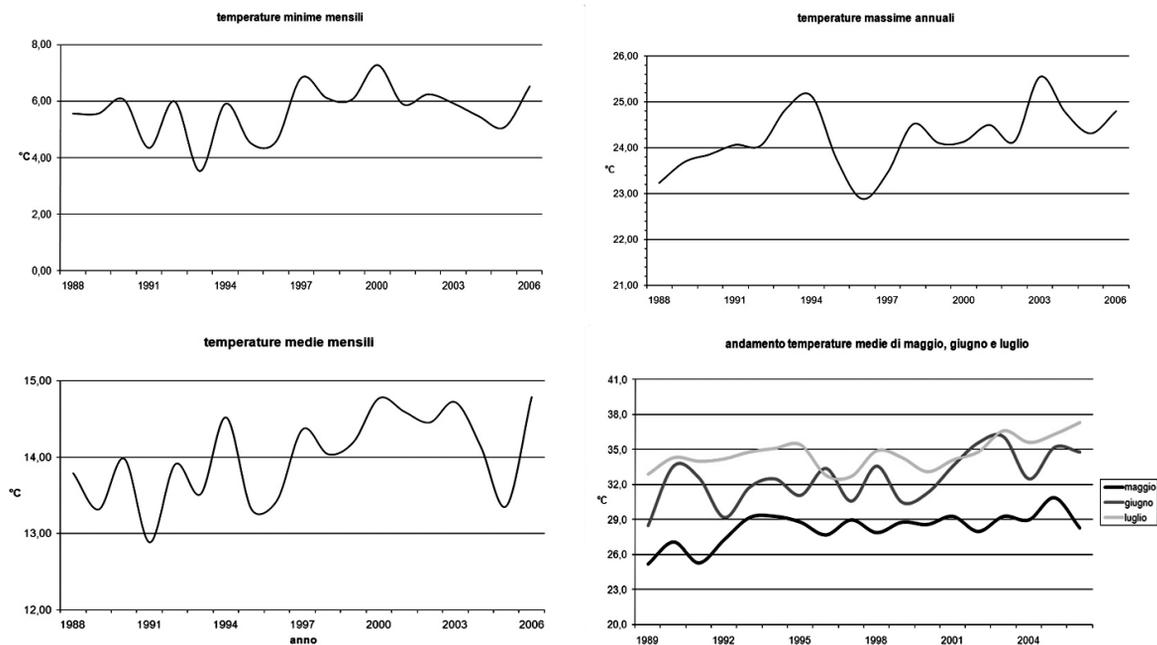


Figura 5. Andamento delle temperature (1988-2006).

Figure 5. Temperature trend (1988-2006).

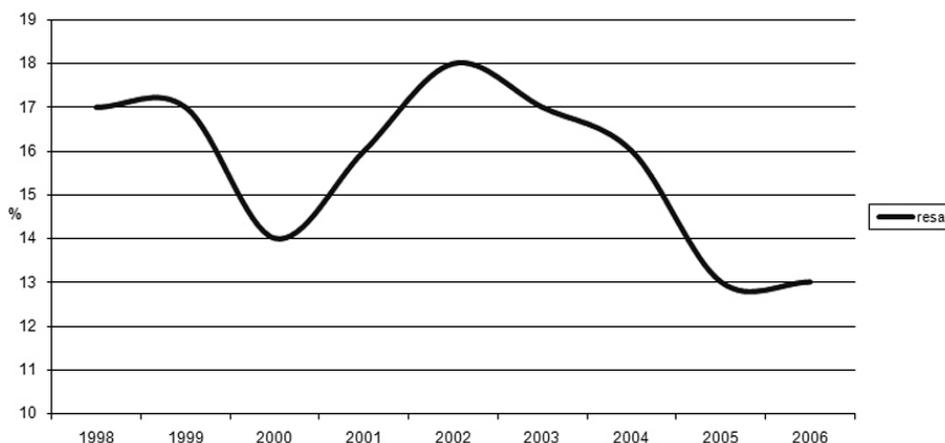


Figura 6. Andamento della resa in olio (1997-2007).

Figure 6. Oil yield trend (1997-2007).

apertura vegetale attribuibili principalmente a fenomeni climatici così come invece rilevati a scala temporale e territoriale più ampia a livello nazionale e internazionale.

Ulteriori approfondimenti già avviati sull'evoluzione delle associazioni fitosociologiche rilevabili nelle aree di studio consentiranno di stimare l'ecosistema di specifiche correlazioni e conseguentemente individuare linee guida per la gestione dei sistemi naturali. Per quanto attiene alle aree del comprensorio del lago Trasimeno dall'analisi dei dati emerge un complessi-

vo aumento della temperatura media dell'aria di circa 1,1 °C nei venti anni di osservazione. Aumenti maggiori (fino a 4 °C) si sono registrati nei mesi di maggio e di giugno, il che determina variazioni nei tempi in cui si susseguono le varie fasi fenomenologiche della pianta presa in esame (anticipo delle fasi di fioritura dell'olivo) e un allungamento della fase vegetativa della coltivazione stessa. È stata altresì individuata una diminuzione della resa in olio delle olive raccolte dovuta ad una diffusione maggiore della mosca.

Bibliografia

- Bazzaz F., Sombroek W. 1996. *Global Climate Change and Agricultural Production*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Bounoua L., Collatz G.J., Los S.O., Sellers P.J., Dazlich D.A., Tucker C.J., Randall D.A. 2000. Sensitivity of Climate to Changes in NDVI. *Journal of Climate*, 13:2277-2292.
- Carraro C., Crimi J., Sgobbi A. 2007. La valutazione economica degli impatti dei cambiamenti climatici in Italia e delle relative misure di adattamento, APAT and CMCC, novembre 2007.
- Di Orazio F., Scartazza A., Gratani L., Brugnoli E. 2004. Impatto del Cambiamento Climatico sui Sistemi Agricoli: Ricerca di Indicatori di Tolleranza alla Siccità, CLIMAGRI, Roma.
- Donatelli M., Tubiello F.N., Peruch U., Rosenzweig C. 2002. Impacts of Climate Change and Elevated CO₂ on Sugar Beet Production in Northern and Central Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 6, 2:133-142.
- Dragoni W. 1982. Idrogeologia del lago Trasimeno: sintesi, problemi, aggiornamenti. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 5: 192-206.
- Gutman G. 1989 On the relationship between monthly mean and maximum-value composite normalized vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 10:1317-1325.
- Los S.O., Justice C.O., Tucker C.J. 1994. A global 1 by 1 NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 15:3493-3518.
- Ludovisi A., Poletti A. 2003. Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems: 2. exergy and specific exergy indices. *Ecol. Model.*, 159:223-228.
- Mennella V., Vizzari M. 2008. Rischio ambientale nel bacino del lago Trasimeno, Regione dell'Umbria, Dipartimento Uomo e Territorio – Sezione Pianificazione del Territorio Agricolo e Forestale – Università degli Studi di Perugia, Città di Castello.
- Pacicco C.L., Vizzari M., Mennella V.G.G., Delitala A.M.S., Capece P., Fiori M., Mannu G., Pinna Nossai R. 2009. Poster “Studio dell'evoluzione della copertura vegetale della Sardegna mediante immagini NDVI da NOAA e dati termo-pluviometrici”. In Atti del VII Convegno AISSA “Agricoltura, Qualità dell'Ambiente e Salute”, 2-4 dicembre, Ancona.
- Ricci C., Ballatori E. 1982. Dinamica di popolazione degli adulti di *Dacus Oleae* (Gmel.), Istituto di Entomologia Agraria, Istituto di Statistica, Università di Perugia.
- Romano G. 2006. La qualità in campo: la filiera produttiva dell'olio. Atti del Convegno di Bari sulla Filiera dell'olio d'oliva, Confagricoltura.
- Townshend J.R.G., Justice C.O. 1986. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 7:1555-1570.
- Townshend J.R.G. 1994. Global data sets for land applications from the AVHRR: an introduction. *International Journal of Remote Sensing*, 15:3319-3332.
- Tucker C.J., Sellers P.J. 1986. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7:1395-1416.
- Tucker C.J., Sharman M.J., Ittersum G.V. 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, 17:233-249.
- Vicente-Serrano S.M., Cuadrat-Prats J.M., Romo A. 2006. Aridity influence on vegetation patterns in the middle Ebro Valley (Spain): Evaluation by means of AVHRR images and climate interpolation techniques. *Journal of Arid Environments*, 66:353-375.
- Boggia A., Pennacchi F. 1999. Sviluppo agricolo sostenibile del bacino del Lago Trasimeno, Dipartimento di Scienze Economiche ed Estimative - Unipg, Arusia, Regione dell'Umbria.
- Fischer G., Shah M., Tubiello F.N., Van Velhuizen H. 2005. Socio Economic and Climate Impact on Agriculture: an Integrated Assessment, 1990-2080, *Philosophical Transaction of the Royal Society*, ottobre 2005, 2067-2083.

Sequestro di CO₂ nei suoli agricoli: opportunità, sfide e rischi

Michele Pisante^{*1}, Rodolfo Santilocchi²

¹ Centro di Ricerca e Formazione in Agronomia e Produzioni Vegetali, Dipartimento Scienze degli Alimenti, Università degli Studi di Teramo

Via C.R. Lerici 1, 64023 Mosciano S.A. (TE)

² Dipartimento di Scienze Ambientali e delle Produzioni Vegetali, Università Politecnica delle Marche, Via Brezze Bianche, 60131 Ancona

Società Italiana di Agronomia

Riassunto

Il suolo può essere una fonte di rilascio di carbonio (*source*) oppure un sito di immagazzinamento (*sink*), dipende da come viene gestito. L'agricoltura condotta con schemi agronomici convenzionali (fortemente basati sulle lavorazioni del suolo) è la principale responsabile della degradazione dei suoli e delle emissioni di CO₂ eq. ascrivibili al settore agricolo. Per accumulare carbonio nel suolo, occorre interrompere e invertire il processo di degradazione dei suoli e adottare pratiche razionali di gestione della fertilità. È dimostrato che nel medio periodo la forma più efficiente di adattamento al cambiamento climatico è rappresentata dalla razionale gestione della biosfera in generale e del comparto agricolo in particolare: con l'adozione di pratiche agronomiche opportune, quello agricolo è potenzialmente in grado di ridurre le proprie emissioni con costi minori rispetto agli altri settori, di aumentare il sequestro del carbonio e così di mitigare le emissioni di gas serra. Infatti, per quanto riguarda gli assorbimenti di carbonio e la riduzione delle emissioni, il comparto agricolo e il suolo giocano un ruolo determinante, principalmente dettato dalle elevate capacità di stock di questo elemento associate ai tempi di permanenza all'interno del suolo. L'estensione e l'effettiva capacità di sequestro da parte del Suolo di Carbonio Organico (SOC) nei terreni agricoli italiani dipenderà sostanzialmente dalle politiche future. Queste potrebbero contemplare l'inclusione del settore agricolo in un sistema di scambio delle emissioni, sia come un settore incluso negli scambi sia come un settore prestatore di servizi per la compensazione. È importante risolvere con urgenza alcune importanti questioni in sospeso come la ricerca e lo sviluppo, per rimuovere gli attuali ostacoli all'inclusione del sequestro di carbonio nel suolo nel meccanismo di scambio delle emissioni.

È necessario prevedere misure complementari come la ricerca, sviluppo e trasferimento tecnologico per migliorare l'estensione ed incrementare l'adozione delle tecniche esistenti, o misure di sovvenzioni per accelerare l'adozione di sistemi di gestione della produzione agricola conservativi.

Parole chiave: Cambiamenti climatici, protocollo di Kyoto, CO₂, Soil Organic Carbon, agricoltura conservativa.

Summary

CO₂ SEQUESTRATION IN AGRICULTURAL SOILS: OPPORTUNITIES, CHALLENGES AND RISKS

Management of agricultural soils may determine soil carbon emission to the atmosphere (*source*) or soil carbon sequestration (*sink*). Conventional agricultural practices (based on tillage operations) are the main factor causing soil degradation and CO₂ eq. emissions from agricultural activities. To accumulate carbon in soils, it would be necessary to interrupt and invert the soil degradation process and to adopt rational fertility management practices. There is evidence that in the medium term the most effective way for adaptation to climate change is represented by a rational management of the biosphere and particularly of the agricultural sector: by the adoption of specific agricultural practices, agriculture is potentially in grade to reduce its emission with the minor costs with respect to other activities, to increase carbon sequestration and reduce greenhouse gases emission. In fact, agricultural activities

* Autore corrispondente: tel. e fax: +39 0861 266940. Indirizzo e-mail: mpisante@unite.it

play a fundamental role in carbon sequestration and reduction of emissions, mainly because the high stock capacity of this element associated with the retention time into the soil.

The extent of actual SOC sequestration achieved on Italian agricultural land will depend crucially on future policies. These could be inclusion of agriculture in an emissions trading scheme, either as a covered sector, or as an offset provider. It is important to resolve outstanding research questions as a matter of urgency, to remove this barrier to inclusion of soil carbon in emissions trading.

Complementary measures, such as research, development and technology transfer to improve the extension to improve adoption of existing techniques or subsidies to accelerate the adoption of conservation farming systems, should be contemplated.

Key-words: climate change, Kyoto protocol, CO₂, Soil Organic Carbon, conservation agriculture.

Introduzione

In base a quanto previsto nel Protocollo di Kyoto, nel periodo 2008-2012 l'Italia dovrà arrivare ad emettere ca. 480 Mt CO₂ eq¹ anno⁻¹, abbattendo le attuali emissioni di circa 100 Mt CO₂.

In questo contesto il settore agro-forestale italiano si pone come un elemento virtuoso poiché, senza considerare il potenziale di assorbimento derivante dalla gestione dei suoli agricoli e dei prati-pascoli (attualmente non contabilizzabile agli effetti degli obiettivi posti nel Protocollo di Kyoto, RRN 2007.2013-Italia, 2009), produce un saldo negativo di CO₂ (assorbimento pari a 34 Mt).

È dimostrato che nel medio periodo la forma più efficiente di adattamento al cambiamento climatico è rappresentata dalla razionale gestione della biosfera in generale e del comparto agricolo in particolare: con l'adozione di pratiche agronomiche opportune, quello agricolo è potenzialmente in grado di ridurre le proprie emissioni con costi minori rispetto agli altri settori, aumentare il sequestro del carbonio e così mitigare le emissioni di gas serra. Il pool di carbonio stoccato nei suoli è particolarmente importante perché è il secondo, per grandezza, dopo quello oceanico: con 2500 Gt è 3,3 volte più grande di quello atmosferico e 4,5 volte maggiore di quello di origine biotica (Lal, 2006).

Opportunità

L'azione antropica legata ai cambiamenti d'uso e di gestione del suolo e all'intensificazione colturale ha sensibilmente ridotto gli stock di SOC (*Soil Organic Carbon*) a livello globale. Il passaggio da sistemi naturali a sistemi coltivati produce perdite particolarmente rapide ed intense: mediamente il 30% del carbonio dei primi 100 cm di suolo viene perduto nei primi 30-50 anni (Post e Kwon, 2000). L'entità delle perdite è massima nei climi freddo-umidi e più modesta in quelli caldo-secchi, anche perché i livelli raggiunti in condizioni naturali sono, di solito, nettamente superiori.

Da una analisi su scala globale dello stato delle terre agricole, emerge che l'agricoltura condotta con metodi agronomici convenzionali è la principale responsabile della degradazione dei suoli e delle emissioni di CO₂ eq. ascrivibili al settore agricolo. Gli esperimenti ventennali condotti negli USA da Dick et al. (1998), in Germania da Tebrügge e Düring (1999) e in Russia da Kolchugina et al. (1995) dimostrano che l'aratura può depauperare il 10-30% del carbonio edifico.

Per interrompere e invertire il processo di degradazione dei suoli accumulando carbonio, anche in terreni fortemente depauperati, occorre adottare opportune pratiche razionali di gestione. Si stima che grandi quantitativi di carbonio possano essere sequestrati dai suoli: mediamente 0,9 ± 0,3 Pg anno⁻¹ dai terreni agrari a livello globale (Lal, 2004) e tassi di sequestro inferiori per pascoli permanenti. Secondo le stime di Lal (2004) i 3,7 miliardi di ettari di pascoli e praterie delle regioni semi-aride e sub-umide sequestrerebbero tra 0,01 e 0,3 Gt di car-

¹ Con il termine di CO₂ equivalente (CO₂ eq) si intende l'aggregazione di tutti i gas serra rapportati al potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential GWP) della CO₂. Per il metano (CH₄) è stato assunto un valore di GWP pari a 21 volte quello della CO₂ e per il protossido di azoto (N₂O) è stato considerato un valore pari a 310 volte quello della CO₂.

bonio anno⁻¹, mentre secondo le stime di Follett e Schuman (2005) i pascoli permanenti a livello mondiale equivarrebbero a 3,5 miliardi di ettari e il loro tasso di sequestro di SOC si aggirerebbe intorno a 0,2 Gt anno⁻¹. Per migliorare il sequestro di carbonio nei suoli, nel caso dei terreni pascolivi è possibile intervenire con il contenimento del pascolamento, l'introduzione di leguminose e il controllo delle infestanti. Nelle regioni temperate si potrebbe anche valutare l'applicazione di fertilizzanti azotati, sebbene tale pratica debba essere scrupolosamente soppesata per evitare che gli effetti benefici dell'aumentato sequestro di carbonio vengano vanificati dall'aumento di emissioni di N₂O o, per effetto della maggiore densità di animali, dall'aumento delle emissioni di metano di derivazione enterica (Vuichard et al., 2004). Nel caso di agro-ecosistemi degradati esistono opportunità di recupero diverse a seconda delle caratteristiche dei suoli: la granulometria, le caratteristiche del profilo, l'uso storico e il clima condizionano la quantità e la velocità con cui il suolo può accumulare carbonio. In generale, si prestano all'uopo tutte le pratiche e gli usi del suolo che implicano un aumento della quantità di biomassa al suolo, una riduzione e/o eliminazione delle lavorazioni, una migliore conservazione dell'acqua e degli elementi nutritivi, un miglioramento delle strutture e un incremento della diversità specifica della pedofauna.

Ad esempio, il passaggio da un sistema colturale con tecniche convenzionali, basate sulla lavorazione del suolo, al *no-till farming systems* secondo i principi dell'Agricoltura Conservativa, più conosciuta in Italia come Agricoltura Blu (Pisante, 2007), permetterebbe di ridurre le emissioni di CO₂ in atmosfera di 30-35 Kg ha⁻¹ anno⁻¹ e, in modo particolare nei climi aridi, determinando molteplici vantaggi. Innanzi tutto il contenuto in SOM (*Soil Organic Matter*) è universalmente riconosciuto essere un indicatore chiave della qualità del suolo, in virtù della attività biologica che scaturisce dalla frazione organica (continui processi di sintesi e degradazione ad opera di mesofauna, microfauna e microflora edafiche, reazioni biochimiche che contribuiscono in modo determinante alla fertilità fisica e chimica). Inoltre la presenza di SOM influenza positivamente la stabilità degli aggregati e questa, a sua volta, la capacità di infiltrazione dell'acqua, la disponibilità di nutrienti e

la resistenza a fenomeni di involuzione della fertilità (erosione idrica, eolica). In questo modo, un suolo ricco di SOM permette alle colture di resistere meglio ai periodi siccitosi e riduce i rischi di desertificazione. Infine, si ricorda che nei suoli tropicali ricchi in argille con bassa capacità di scambio cationico (caoliniti, miche, cloriti), il mantenimento di un adeguato livello di SOM contribuisce in maniera determinante a rendere disponibili per le piante importanti elementi nutritivi (come il fosforo) e a contenere la tossicità di altri (per formazione di chelati) Robert (1996). Risultati positivi di *no-till farming systems* in suoli spiccatamente sabbiosi sono stati ottenuti in Siria (Ryan, 1997), Nigeria (dove Ringius nel 2002, a 4 anni dalla conversione all'agricoltura conservativa, riporta un incremento dei livelli di C da 15 a 32,3 t ha⁻¹), Brasile e Argentina (Lal, 2000; Sa et al., 2001). Molti studi hanno evidenziato il potenziale dell'agricoltura conservativa anche in Europa (Smith et al., 1998; 2000). Smith et al. (1998) stimano un potenziale di 23 Tg C anno⁻¹ sequestrabili con l'adozione di pratiche agronomiche conservative in Europa e 3,2 Tg C anno⁻¹ di emissioni da combustibili in meno. In effetti sono stati ottenuti risultati positivi in terreni sia argillo-limosi (entisuoli) che argillosi (vertisuoli) del sud-ovest semiarido della Spagna (su rotazioni cereale a paglia – girasole – leguminose in condizioni *rainfed*). L'esperimento ventennale (1985-2006) di Hernanz su *Triticum aestivum* in rotazione con *Vicia sativa* e *Pisum sativum* in vertic luvisol dimostra che, dopo circa 10 anni di *no-till farming systems*, il SOC si stabilizza ad un livello superiore del 14% a quello dei sistemi convenzionali. Alcuni esperimenti hanno evidenziato l'importanza delle leguminose nella rotazione (*intercropped* o come *cover crop*): si ipotizza che i maggiori tassi di sequestro di carbonio riscontrati (5-8 Mg ha⁻¹ contro 0,04-0,88 Mg ha⁻¹ dei sistemi tradizionali) siano da attribuirsi all'attività della popolazione microbica che prolifera nella rizosfera delle leguminose (Chen et al., 2008).

Un bilancio miope del tasso di accumulo del carbonio vs il tasso di crescita del carbonio atmosferico (stimato intorno ai 3,3 Gt a livello globale) si chiuderebbe con un disavanzo e indurrebbe a considerare quello di accumulare il carbonio nel suolo un tentativo compensatorio velleitario. Al contrario, in una visione lungimi-

rante, dinamica e olistica (che comprende in unico macro-sistema i cicli di acqua e carbonio), spicca l'importanza di politiche virtuose d'uso e gestione del suolo che permettono di guadagnare tempo in attesa di alternative all'uso dei combustibili fossili. Da non dimenticare, inoltre, che l'accumulo di carbonio nel suolo è un obiettivo meritevole di essere perseguito, indipendentemente dagli effetti mitiganti sul riscaldamento globale. Accumulare carbonio nel suolo può, infatti, tradursi in una maggiore produttività in alcune aree depresse, migliorare la qualità e la disponibilità d'acqua e recuperare suoli ed ecosistemi degradati in aree sensibili. In altri termini, l'accumulo di carbonio nel suolo è un processo naturale, che può contribuire indirettamente a benefici ambientali, climatici e sociali a scala globale (Pisante, 2007). Quando questo processo viene avviato nei terreni agrari, ai benefici precedenti possono essere aggiunti anche vantaggi economici.

Sfide

Ben 450 Gt di carbonio sarebbero state emesse in atmosfera dagli ecosistemi terrestri nel corso dei secoli. Di queste, 320 Gt in epoca pre-industriale e 130 Gt in epoca post-industriale. Il solo carbonio derivante dai combustibili fossili ammonta a 270 Gt.

Per quanto fin qui esposto risulta evidente la necessità di accumulare carbonio nel suolo. Tale processo, tuttavia, è legato alla disponibilità di altri elementi nutritivi. La produzione industriale dei fertilizzanti necessari ad accompagnare il processo di stoccaggio del carbonio presenta a sua volta un costo in termini di carbonio. Ad esempio, se per produrre 1 Kg di azoto vengono emessi 0,86 Kg di carbonio, per l'accumulo di 1 Gt di carbonio sono necessari mediamente 80 milioni di t di azoto e 20 t di fosforo. La sfida per il futuro dell'agricoltura mondiale è rappresentata dunque dalla riduzione dell'uso dei concimi azotati di sintesi e dalla valorizzazione di fonti alternative alla produzione industriale, quali la fissazione biologica dell'N atmosferico, ma anche dalla riduzione delle perdite per lisciviazione e, soprattutto, dalla gestione oculata dei residui colturali. Ben 3 Gt di residui colturali delle colture cerealicole vengono prodotti annualmente su scala globale. A tal

proposito, si rileva che è ancora oggi argomento di accese discussioni ideologiche se sia più conveniente (a livello di bilancio globale del carbonio) lo stoccaggio nel suolo di tali residui o il loro uso come biomasse per la produzione d'energia. Magdoff e Weil (2004) ritengono che la pratica del sovescio non sia utile ai fini del ripristino dei livelli di carbonio organico: il contatto diretto dei residui vegetali con i microrganismi decompositori accelera la perdita di SOM rispetto ai sistemi conservativi, che per loro definizione, mantengono il suolo indisturbato e limitano il turnover della SOM (Mikka e Rice, 2004).

L'agricoltura del futuro dovrà indirizzarsi verso il mantenimento di una copertura vegetale il più possibile permanente (per almeno il 30% della superficie del suolo), avvicendamenti colturali in grado di garantire anche un equilibrio biologico nel terreno agrario, minima interazione tra suolo e macchine (ma anche sulla contrazione del transito per ridurre il compattamento superficiale). L'integrazione e la sinergia di razionali pratiche agronomiche può assicurare l'aumento del carbonio organico nel suolo (anche fino a 1 m di profondità), riducendo le emissioni dirette (ascrivibili all'uso di combustibili fossili) e indirette (per l'intensificazione dell'umificazione) rispetto alle tecniche convenzionali, oltre ad aumentare la biodiversità e, dunque, la resilienza dell'agro-ecosistema.

A distanza di oltre quaranta anni dalla Rivoluzione Verde, la sfida della ricerca scientifica per aumentare la produzione primaria e soddisfare i crescenti fabbisogni alimentari di una popolazione in continua evoluzione è diventata sempre più ardua. A questi cambiamenti globali si aggiungono le ulteriori difficoltà rappresentate dalla sostenibilità delle produzioni e dalla necessità di impiegare le risorse naturali in modo più efficiente, aumentando le rese unitarie e minimizzando gli effetti negativi dell'impatto ambientale, senza trascurare la redditività per gli operatori del settore.

Secondo alcune stime, la popolazione mondiale salirà a 9 miliardi entro il 2030: fornire alimenti per tutti sarà una sfida notevole per l'agricoltura e la zootecnia del futuro. Vincere o perdere questa prova rappresenterà la differenza tra la vita e la morte per milioni di persone in tutto il mondo e porrà i presupposti per nuovi equilibri sociali, politici ed economici. Per far

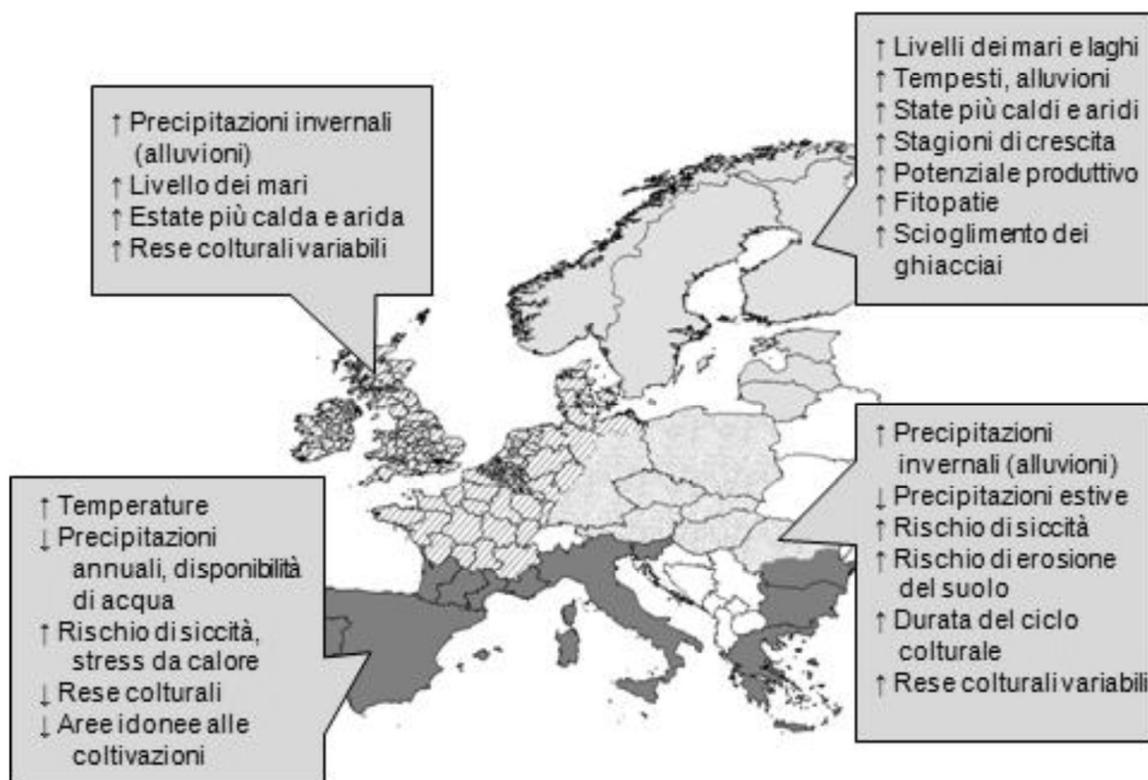


Figura 1. Impatti previsti dei cambiamenti climatici nelle diverse regioni europee.

Figure 1. Projected impacts from climate change in different EU regions (http://ec.europa.eu/agriculture/climate_change/).

fronte alle esigenze alimentari della popolazione mondiale la produzione cerealicola dovrà crescere del 50% entro il 2050, contando su una disponibilità di terra e di acqua paragonabile, nella migliore delle ipotesi, a quella attuale (Brown, 2006). La conservazione delle risorse idriche e l'impiego di efficienti sistemi d'irrigazione sono elementi cruciali per incrementare la produttività delle terre irrigabili e per accumulare carbonio nel suolo.

Rischi

L'agricoltura moderna, caratterizzata da lavorazioni intensive, ha un forte impatto sugli agroecosistemi: non solo porta ad una diminuzione nelle concentrazioni di sostanza organica nei suoli, ma è anche responsabile delle emissioni di gas serra.

L'aumento della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, l'aumento della temperatura, le modifiche del regime delle precipitazioni stagiona-

li e annuali e della frequenza di fenomeni estremi si ripercuoteranno sull'ambiente naturale in cui si muove l'agricoltura e incideranno sul volume, sulla qualità e sulla stabilità della produzione alimentare. A breve termine, i fattori che potrebbero avere le conseguenze più gravi per l'agricoltura sono la frequenza e l'intensità di eventi meteorologici estremi, le variazioni stagionali del regime delle precipitazioni e l'insorgenza di nuove fitopatie. In casi estremi il degrado degli ecosistemi agricoli potrebbe tradursi nella desertificazione, con la conseguente perdita di qualsiasi capacità produttiva dei terreni. I cambiamenti climatici, pur essendo un fenomeno globale, avranno effetti complessi sui processi biofisici alla base dei sistemi agricoli, con impatti diversi a livello locale ed effetti netti sull'attività agricola variabili nelle diverse regioni geografiche e, all'interno della stessa regione, in base al tipo di azienda. In figura 1 sono riportate le potenziali conseguenze del cambiamento climatico per le diverse regioni europee.

Conclusioni

Oggi l'Agricoltura Blu rappresenta per il nostro Paese un sistema sostenibile del moderno sviluppo rurale vicino all'ambiente e può determinare un nuovo corso per la sostenibilità economica, agronomica ed ambientale dell'agricoltura italiana.

Per finalizzare tali obiettivi è indispensabile prevedere una equa retribuzione al produttore agricolo attraverso la generazione di "Certificati Blu" che attestino un riconoscimento di tipo ambientale da contabilizzare sulla base dei livelli accresciuti di sequestro della CO₂ nei suoli agricoli e della conseguente riduzione delle emissioni per un minore uso di energia impiegata.

Questa straordinaria opportunità, nell'immediato futuro, potrebbe consentire al pari di altri Paesi che già hanno codificato questo sistema (NSW, Australia) l'inserimento dei Certificati Blu nel meccanismo del grande mercato dei crediti di CO₂, favorendo la creazione di un sistema congiunto pubblico-privato di supporto economico alla specifica attività agricola, a servizio dell'ambiente e della collettività. Questa tematica, per la valenza che riveste nel settore pubblico e privato, nonché sull'economia dell'agricoltura e dell'ambiente, è di grande attualità e rientra tra le prioritarie attività programmatiche dell'Unione Europea nella revisione della PAC post 2013.

Ringraziamenti

Un vivo ringraziamento alla dott.ssa Sandra C. Corsi e a Jose Carlos Herrera Nuñez, PhD, per il contributo offerto nella fase di redazione del presente lavoro.

Bibliografia

Boddey R.M. et al. 2010. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. *Global Change Biology*, 16:784-795.

Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. 1995. Carbon Pools and Accumulation in Peatlands of the Former Soviet Union. *Global Biogeochem. Cycles*, 9, 1:37-46.

Brown Lester R. 2006. *Plan B 2.0: Rescuing a Planet Under Stress and a Civilization in Trouble*. W.W. Norton & Company, New York.

Chen M., Chen B., Marschner P. 2008. Plant growth and soil microbial community structure of legumes and grasses grown in monoculture or mixture. *Journal of Environmental Sciences*, 20:1231-1237.

FAO 2001. *Soil carbon sequestration for improved land*

management. *World Soil Resources Report No. 96*. Rome.

FAO 2004. *Carbon sequestration in dryland soils*. World Soil Resources Report No. 102. Rome.

Follett R.F., Schuman G.E. 2005. Grazing land contributions to carbon sequestration (invited Keynote paper for the 2005 International Grassland Congress, Belfast, Ireland). McGilloway, D.A. *Grazingland: a global resource*. The Netherlands Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 266-277.

Hernanz J.L. et al. 2009. Soil carbon sequestration and stratification in a cereal/leguminous crop rotation with three tillage systems in semiarid conditions. *Elsevier Science Direct*, 133:114-122.

http://ec.europa.eu/agriculture/climate_change/

Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Elsevier Geoderma*, 123:1-22.

Lal R. 2006. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304:1623-1627.

Melero S. et al. 2009. Long-term effects of conservation tillage on organic fractions in two soils in southwest of Spain. *Elsevier Science Direct*, 133:68-74.

Mikka M., Rice C.W. 2004. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:809-815.

Pisante M. 2007. *Agricoltura Blu. La via italiana dell'agricoltura conservativa. Principi, tecnologie e metodi per una produzione sostenibile*. IISole24Ore-Edagricole, Bologna, XII + 317 pp. (ISBN-978-88-506-5253-2).

Post W.M., Kwon K.C. 1999. Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology*, 6:317-328.

Rete Rurale Nazionale 2007-2013 – Italia 2009. Schema di documento di posizione del sistema rurale italiano rispetto alle politiche internazionali sul clima. Agricoltura, foreste e cambiamenti climatici. Il contributo del mondo rurale in vista della revisione del Protocollo a Copenaghen per un ruolo centrale del settore agro-forestale nel post-Kyoto. Roma, 29 ottobre 2009.

Ringius L. 2002. Soil carbon sequestration and the CDM: opportunities and challenges for Africa. *Clim. Change*, 54:471-495.

Robert M. 1996. *Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Dunod/Masson, Paris, 240.

Ryan J. 1997. Change in organic carbon in long-term rotation and tillage trials in northern Syria. In: Lal R., Kimble J.M., Follett R.F., Stewart B.A. (eds.): *Management of carbon sequestration in soil*, 28.

Smith P., Powlson D.S., Glendinning M.J., Smith J.U. 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biology*, 4:679-685.

Soussana J.F., Loiseau P., Vuichard N., Ceschia E. 2004. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use Manage*, 20:219-230.

Tebbrügge F., Düring R.A. 1999. Reducing tillage intensity: a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research*, 53:15-28.

Biosintesi e controllo delle micotossine negli alimenti

Massimo Reverberi*¹, Alessandra Ricelli², Corrado Fanelli¹, Anna Adele Fabbri¹

¹ Dipartimento di Biologia Vegetale, Università "La Sapienza"

Largo Cristina di Svezia 24, 00165 Roma

² CNR, Istituto di Chimica Biomolecolare – Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma

Società Italiana di Patologia Vegetale (SIPaV)

Riassunto

Le micotossine sono dei metaboliti secondari tossici prodotti da diversi funghi ubiquitari nell'ambiente che appartengono principalmente ai generi *Fusarium*, *Aspergillus* e *Penicillium*. Questi composti possono essere mutagenici, teratogenici e carcinogenici sia per gli animali che per l'uomo. Nella nostra normale dieta entriamo quotidianamente in contatto, attraverso il cibo contaminato, con notevoli quantità di micotossine. Ma perché i funghi producono le micotossine? E come è regolata la sintesi di questi composti? Alcune micotossine hanno uno specifico ruolo ad esempio come fattori di virulenza di funghi patogeni, ad es. le fumonisine ed alcuni tricoteceni, nella competizione con altri organismi, ad es. la patulina nei confronti dei batteri. In altri casi, come le aflatossine, più di un ruolo può essere ipotizzato. Gli stimoli che possono modulare la sintesi delle tossine sono diversi e molteplici. In questa *review* abbiamo focalizzato la nostra attenzione su quelle tossine i cui meccanismi regolatori sono stati ben descritti. In particolare, alcune di queste *pathways* sembrano avere un comune fattore di regolazione che è rappresentato dal controllo esercitato dalle specie reattive dell'ossigeno. Infatti, quando un fungo riceve uno stimolo esterno reagisce cambiando, attraverso una ben definita cascata di trasduzione del segnale, "stile di vita". Questo profondo cambiamento porta anche all'attivazione di meccanismi globali di controllo della trascrizione ed, in particolare, di fattori di trascrizione che sono capaci di incrementare l'espressione dei geni appartenenti ai *cluster* delle micotossine. Il controllo esercitato dallo stress ossidativo sulla biosintesi di micotossine ha consentito di utilizzare alcuni composti antiossidanti di diversa origine per inibire la sintesi di questi composti tossici sia in campo che nello stoccaggio. Recentemente, sono state messe a punto diverse strategie di controllo delle micotossine maggiormente compatibili con l'ambiente basate sull'uso di molti composti antiossidanti di origine naturale o di microrganismi di biocontrollo.

Summary

BIOSYNTHESIS AND CONTROL OF MYCOTOXINS IN FOODS

Mycotoxins are harmful secondary metabolites produced by several widespread environment-contaminating fungi mainly belonging to *Fusarium*, *Aspergillus* and *Penicillium* genera. These compounds can be mutagenic, teratogenic and carcinogenic for animals and humans. In our diet we experience a quite harmful daily consumption of mycotoxin-contaminated foods. But why fungi do produce toxins? And how are their biosynthesis regulated? Some mycotoxins have a clear-cut role in the assessment of pathogenesis, i.e. fumonisins and some trichothecene, in the competition with other organisms, i.e. patulin vs bacteria. In other cases, such as aflatoxins, more than one role can be hypothesised. Several are the inputs able to modulate mycotoxin synthesis. Here we have focused our attention on those whose regulatory mechanisms have been assessed. In particular, some of these pathways seem to have a common factor which is represented by the control exerted by the reactive oxygen species. In fact, when a fungus receives an external stimulus reacts by activating, through a quite well-defined signal cascade, an evident switch in its lifestyle. This profound change also lead to the activation of global gene regulators and, in particular, of transcription factors able to enhance the mycotoxin gene cluster expression. The control exerted by oxidative stress onto the mycotoxin synthesis has lead to use antioxidants of different origin for blocking the synthesis of these harmful compounds both in the field and in the storage. Recently, many natural-based antioxidant or biocontrol-related strategies have been assessed as environment-friendly approaches for controlling the production of many mycotoxins in feed and foodstuffs.

Key-words: food safety, mycotoxins, oxidative stress, oxylipins, signal transduction.

* Autore corrispondente: tel.: +39 06 49917131; fax: +39 06 49917136. Indirizzo e-mail: massimo.reverberi@uniroma1.it

Introduzione

I metaboliti secondari sono dei composti a basso peso molecolare spesso prodotti da funghi, batteri e piante attraverso specifiche vie metaboliche. Una particolare caratteristica di questi metaboliti è che le cellule possono sopravvivere senza sintetizzarli e per questo sono definiti da alcuni autori (Bennett, 1983) come *luxury molecules*. Infatti, non è completamente chiaro perché gli organismi divergano energia per sintetizzarli, quale sia il loro ruolo nell'omeostasi cellulare e il potenziale vantaggio che questi composti possano fornire nella nicchia trofica. Questi metaboliti sono dei composti bioattivi e possono esercitare un effetto tossico o benefico per gli uomini e gli animali in relazione alla loro struttura chimica e alla concentrazione usata (ad es. gli alcaloidi ergotici). Un importante gruppo tra i metaboliti secondari tossici è rappresentato dalle micotossine. Questi composti possono essere sintetizzati durante il differenziamento morfologico e/o la tarda fase di crescita del fungo (Yu and Keller 2005). Tra queste, l'ocratossina A (OTA), la patulina (PAT), le aflatoxine (AF), i tricoteceni (TR) e le fumonisine (FUM) rappresentano un piccolo ma significativo gruppo prodotto rispettivamente da *Aspergillus ochraceus*, *Penicillium expansum*, *A. parasiticus*, *A. flavus* e da diverse specie appartenenti al genere *Fusarium*. Queste micotossine mostrano diversi livelli di tossicità nei confronti degli esseri umani: le AF sono epato-cancerogene, l'OTA è probabilmente capace di indurre carcinogenesi renale mentre la PAT è tossica per l'apparato gastro-intestinale così come molti tricoteceni quali il deossinivalenolo (DON) e la tossina T2 (T2), mentre la fumonissina B1 (FB1) è neuro-tossica.

Molti autori hanno messo in evidenza che lo stress ossidativo ambientale o cellulare rappresenta uno stimolo per la sintesi di queste tossine, almeno in *A. flavus*, *A. parasiticus* (Jayashree and Subramaniam, 2000; Kim et al., 2008; Narasaiah et al., 2006; Reverberi et al., 2005, 2008), *A. ochraceus* (Reverberi et al., 2010), *A. nidulans* (Maggio-Hall et al., 2005) e *F. graminearum* (Ponts et al., 2006). Lo stress ossidativo non è esclusivamente un fenomeno negativo per la cellula fungina dato che le specie reattive dell'ossigeno (RS), come ad es. il perossido d'idrogeno (H₂O₂), l'anione superossido (O₂⁻) e le os-

silipine, rappresentano anche uno stimolo per il differenziamento (Calvo et al., 2002, Aguirre et al., 2006). La formazione di RS all'interno della cellula avviene principalmente durante la tarda fase di crescita, nella quale hanno inizio complessi segnali di "senescenza ifale" come il differenziamento dei conidi o degli sclerozi (Aguirre et al., 2006; Reverberi et al., 2008). La cellula reagisce ad uno stato iper-ossidante attivando dei fattori di trascrizione relativi allo stress ossidativo quali Yap1, in *Saccharomyces cerevisiae* (Estruch, 2000), in *Aspergillus parasiticus*, *A. ochraceus* (Reverberi et al., 2008) e *A. fumigatus* (Aguirre et al., 2006). Questo fattore di trascrizione è capace di tradurre il "messaggio ossidativo" al nucleo e di attivare le difese antiossidanti attraverso le quali la cellula può bilanciare il possibile danno dovuto ai processi ossidativi in atto (Estruch, 2000, Moye-Rowley, 2003). La delezione del gene *ApyapA*, ortologo di Yap1, in *A. parasiticus* modifica il bilancio redox endo-cellulare e crea uno stato iper-ossidante che è capace di indurre la sintesi di aflatoxine (Reverberi et al., 2008). Un'altra evidenza indiretta della relazione esistente tra ossidazione e sintesi di micotossine è stata ottenuta mediante l'aggiunta di pro-ossidanti nel mezzo colturale (e.g. tetracloruro di carbonio, cumene idroperossido; *t*-butil-idroperossido). Questi composti stimolano in modo significativo la formazione delle AF e di OTA, confermando in tal modo il ruolo chiave svolto dallo stress ossidativo nella biosintesi delle micotossine (Fanelli et al., 1984; Kim et al., 2004). Lo stress ossidativo è considerato come un "pre-requisito" per la sintesi di aflatoxine in *A. parasiticus* e *A. flavus* (Jayashree e Subramaniam, 2000). Inoltre, diversi studi hanno riportato che l'uso di antiossidanti nei mezzi di coltura è capace di inibire la formazione di diverse micotossine tra cui le aflatoxine (Fanelli et al., 1985; Kim et al., 2008). Da questo scenario emerge che lo stress ossidativo potrebbe rappresentare un tratto comune nella formazione di molte micotossine.

Biosintesi delle micotossine e sua regolazione

Un modello generale riguardante la regolazione della biosintesi delle micotossine è stato recentemente riportato da Georgianna e Payne

(2009) ed è basato sull'*Aspergillus*. I geni necessari per la sintesi delle AF (in totale 25 + 4 di un mini-cluster adiacente per l'utilizzazione degli zuccheri) si trovano, insieme al gene regolatore della *pathway* – *aflR*, in un cluster di 70-Kb. Il set proteico di trasduzione del segnale richiesto per la regolazione della biosintesi delle AF include FlbA, una proteina RGS regolatrice del segnale derivante da proteine G (Dohlman and Thorner, 1997; Hicks et al., 1997), FluG, la subunità alfa di una proteina G eterotrimerica (Yu et al., 1996), PkaA, che codifica per la subunità catalitica della protein chinase A (Shimizu et al., 2003; Shimizu e Keller, 2001) e probabilmente un non ancora identificato recettore accoppiato alla proteina G (GPCR). Uno dei bersagli di questa cascata di trasduzione è AflR un fattore di trascrizione Zn(II)₂Cys₆ che si lega al DNA (Price et al., 2006). Questo fattore riconosce la sequenza palindromica 50-TCGN5CGA-30 (anche chiamata motivo di legame AflR) nel promotore di molti geni strutturali nel cluster delle AF e della sterigmatocistina (ST) in *A. parasiticus*, *A. flavus*, e *A. nidulans* (Georgianna e Payne, 2009). Quando FadA viene attivato in seguito alla percezione del segnale è capace di inibire sia direttamente che indirettamente, cioè attraverso la PkaA dipendente da cAMP, l'attività di AflR (Shimizu and Keller 2001). FlbA, la cui attivazione dipende da FluG, disattiva FadA e stimola l'attivazione di AflR (Calvo et al., 2002). Il complesso interscambio di questi fattori contribuisce all'accensione/spegnimento del *cluster* delle AF e probabilmente anche di altri cluster del metabolismo secondario. Un altro fattore importante nel regolare le sintesi della AF/ST in *Aspergillus* è LaeA, regolatore globale del metabolismo secondario, che ha probabilmente un ruolo nel rimodellamento cromosomico attraverso la regolazione dell'acetilazione/metilazione dell'istone H4 (Roze et al., 2007a, b). La delezione di *laeA* risulta infatti nella perdita di espressione di *aflR* e della biosintesi delle AF in *A. flavus* (Bok and Keller 2004). Il ritrovamento di LaeA in *A. ochraceus* suggerisce che questo fattore possa anche contribuire al controllo della sintesi dell'OTA. Comunque, la conoscenza delle vie di *signalling* che portano alla biosintesi di questa tossina è ancora ad uno stadio preliminare. Recentemente è stato proposto che l'OTA venga sintetizzata da enzimi codificati da un cluster re-

lativamente corto (< 10-Kb) composto di 2 putative monossigenasi P450, una polichetide sintasi ed una sintasi peptidica non ribosomiale (Karolewicz e Geisen 2005; O'Callaghan et al., 2006). Dato che è stato dimostrato che la sintesi di OTA è anche regolata dalle ossilipine prodotte dal fungo stesso (Reverberi et al., 2010) è probabile che anche in *A. ochraceus* operino meccanismi simili a quelli operanti in altre specie di *Aspergillus*, come verrà successivamente illustrato. Diverse specie di *Fusarium* sono capaci di produrre tossine quali i TR, divisi in 4 tipi, A-D, a seconda della loro struttura chimica, le FUM e lo zearalenone (Desjardins e Proctor, 2007). I TR sono sintetizzati da un cluster di 25-Kb composto da 12 geni co-regolati. Il gene *tri6* codifica per un fattore di trascrizione che regola la trascrizione di tutti i geni del cluster, ed è a sua volta regolato da Tri10 (Kimura et al., 2007). Un tratto comune nelle vie di trasduzione del segnale relative alla sintesi di micotossine tra *Aspergillus* e *Fusarium* è indicato dal fatto che *fadA*^{G42R}, un ortologo in *Fusarium* di FadA di *A. nidulans*, controlla la produzione dei TR alterando l'espressione del cluster dei geni TR stessi in *F. sporotrichioides*. Un altro importante gruppo di micotossine prodotte dal genere *Fusarium* è rappresentato dalle fumonisine, un gruppo di metaboliti secondari polichetidici sintetizzati dal *cluster* genico FUM (Proctor et al., 1999). Questo *cluster* (42.5-Kb) è costituito da 22 open reading frames (ORFs) – 16 dei quali sono apparentemente co-regolati (Proctor et al., 2003). Un gene precedentemente non considerato nel *cluster*, *fum21*, è adiacente al *cluster* FUM ed in particolare vicino al gene *fum1*, codificante per una polichetide sintasi; *fum21* codifica per una proteina che presenta un dominio Zn(II)₂Cys₆ di putativo legame al DNA. Fum 21 è quindi apparentemente coinvolta nella regolazione trascrizionale del cluster FUM e nella biosintesi delle fumonisine (Brown et al., 2007). In modo simile alla regolazione della sintesi delle AF in *Aspergillus*, il cluster FUM in *F. verticillioides* è sotto il controllo di FvVe1, un omologo del sensore luminoso *veA* di *Aspergillus*. Questo fattore è capace di controllare la morfogenesi e il metabolismo secondario in *Fusarium* (Li et al., 2006).

La conoscenza delle vie che regolano la sintesi delle tossine non è uniforme, in particolare per alcune tossine prodotte dal genere *Penicil-*

lium, quali la PAT, che comunque presentano un'ampia diffusione e discreta tossicità. La sintesi della PAT ha origine a partire dal polichetide 6-metilsalicilato (6-MSA) e dovrebbe coinvolgere almeno 10 passaggi enzimatici (Moake et al., 2005). I geni relativi alla sintesi della PAT sono probabilmente presenti in un unico *cluster* e recentemente almeno 5 di questi sono stati descritti. Questo *cluster* dovrebbe contenere almeno dei geni codificanti per una iso-epossido deidrogenasi, una 6-MSA sintasi, due monossigenasi P450 ed un trasportatore di membrana ABC. Tutti questi geni sono co-regolati in condizioni colturali che supportano la produzione di PAT in *P. expansum* (White et al., 2006). Nel genoma di *A. clavatus*, produttore di PAT, il ritrovamento di due geni codificanti per gli stessi citocromi P450 ha portato alla scoperta di un *cluster* di 15 geni coinvolto nella sintesi di questa tossina (Artigot et al., 2009). La via di trasduzione del segnale relativa alla regolazione della sintesi della PAT ancora deve essere elucidata anche se è stato recentemente messo in evidenza come lo stress ossidativo sia in grado di regolarne la sintesi (Sanzani et al., 2009; Tolaini et al., 2010) suggerendo l'esistenza di meccanismi regolatori simili a quelli attivi in *Aspergillus*.

Quali sono i segnali che controllano e regolano la produzione di micotossine? In generale l'alterazione dell'ambiente esterno in termini di luce, elementi nutritivi, stress, contatto con l'ospite è capace di modificare lo "stile di vita" del fungo tossigeno e di indurlo a produrre le micotossine. Inoltre sembra che la maggior parte di questi segnali, soprattutto quelli di stress, venga "tradotta" a livello intra-cellulare in un aumento di produzione di specie reattive dell'ossigeno, ovvero in un'alterazione del bilancio *redox*. La sintesi di molte di queste micotossine ha come "impulso" iniziale proprio un forte sbilanciamento dell'ambiente cellulare verso uno stato iper-ossidante. Ma come e perché vengono prodotte queste specie reattive nei funghi micotossigeni? In generale, i funghi sono organismi aerobici e quindi, come tali, dipendono dall'ossigeno per la loro sopravvivenza. L'uso di ossigeno durante i normali processi metabolici cellulari (respirazione, metabolismo degli acidi grassi, attività della NADPH ossidasi) o la presenza di fattori abiotici quali un eccesso di metalli, umidità o luce possono indurre la produ-

zione di RS (Halliwell e Gutteridge, 2007a). La costante presenza nella cellula di RS rappresenta quindi una condizione universale ma necessaria per tutti gli organismi viventi (Dowling e Simmons, 2009) ai quali anche i funghi sono ovviamente soggetti. Le RS possono essere anche pericolose ma la cellula stessa è in grado di produrre molecole antiossidanti quali l' α -tocoferolo, l'acido ascorbico, il β -carotene, il glutathione ridotto e attivando enzimi come la catalasi, la glutathione perossidasi e la superossido dismutasi (Halliwell e Gutteridge, 2007b). Ma cos'è lo stress ossidativo? Sies (1991) lo definisce come un disturbo nel bilancio tra ossidanti e antiossidanti in favore delle specie ossidanti che portano ad un probabile danno dei costituenti cellulari. In generale, una cellula può tollerare una modesta quantità di specie ossidanti che usualmente stimola un aumento di antiossidanti al fine di ristabilire un corretto bilancio tra ossidanti ed antiossidanti. Comunque, la risposta dei funghi filamentosi allo stress ossidativo non è esclusivamente basata sulla stimolazione della produzione di specie antiossidanti, ma è più complessa coinvolgendo una cosiddetta "plasticità fenotipica" dei funghi (Caddick, 1993) attraverso la quale la cellula fungina è capace di modificare il fenotipo stesso per adattarsi ai cambiamenti ambientali. Infatti, le RS possono anche rappresentare un "input metabolico" che è vitale per modificare lo sviluppo fungino. Ad esempio, sia la germinazione dei conidi che lo stabilirsi della dominanza apicale dell'ifa sono sotto il controllo delle RS (Lledias et al., 1999; Semighini e Harris, 2008). Quando si ha un accumulo di RS, il bilancio tra specie ossidanti ed antiossidanti viene alterato ed un danno alla membrana cellulare può essere messo in evidenza (*free radical theory of aging* – Harmann, 1956). È noto da tempo che esiste una stretta correlazione tra lo stress ossidativo e il metabolismo secondario, in particolare con la sintesi delle AF (Fanelli et al., 2004). L'esistenza di questa relazione è stata recentemente confermata ed è stato osservato che la presenza di pro-ossidanti nel terreno colturale porta ad un aumento delle RS endo-cellulari (Jayashree e Subramanyam, 2000; Narasaiah et al., 2006; Reverberi et al., 2008). Inoltre, sembra che lo stress ossidativo non stimoli esclusivamente la sintesi delle AF in *A. parasiticus* e *A. flavus* ma anche altre micotossine in altri funghi. Nel

caso delle tossine prodotte dal *Fusarium* l'aggiunta di perossido d'idrogeno e di diamide (che agisce ossidando il glutatione) ai mezzi colturali dove il fungo si sviluppa, risulta in una notevole induzione della sintesi di DON e acetil-deossinivalenolo (ADON) (Ponts et al., 2006). Ponts e collaboratori (2007) hanno dimostrato che l'aggiunta di H₂O₂ è capace di indurre la biosintesi di DON e ADON attraverso un'augmentata espressione dei geni Tri; mentre l'aggiunta di catalasi alle colture, riducendo l'effetto del perossido d'idrogeno riduce anche la sintesi di tossina mostrando una *down*-regolazione dei geni Tri. Altre specie reattive sono capaci di indurre la sintesi di tossine, in particolare alcune ossilipine, acidi grassi insaturi ossidati come l'acido idroperossioctadecadienoico (HPODE), possono stimolare la sintesi di OTA in *A. ochraceus* (Reverberi et al., 2010). Risultati simili sono stati precedentemente ottenuti da Fabbri et al. (1983) per quanto riguarda i processi ossidativi che controllano la sintesi delle AF.

La correlazione tra stress ossidativo e sintesi di micotossine è direttamente collegata a quella esistente tra stress ossidativo e differenziamento. Infatti, il differenziamento ed il metabolismo secondario sono dei processi strettamente correlati nei funghi, le mutazioni che portano ad un'alterazione dei processi di sviluppo alterano anche il metabolismo secondario (Calvo et al., 2002). Una base molecolare per questo tipo di relazione è stata recentemente dimostrata. I funghi rispondono alla luce modulando il differenziamento ed il metabolismo secondario (Bayram et al., 2008). *A. nidulans* reagisce alla luce mediante il fattore VeA formando conidi asessuali, mentre al buio sviluppa preferenzialmente cleistoteci. Inoltre la luce può anche controllare la biosintesi di sterigmatocistina (ST) in *A. nidulans* (Stinnet et al., 2007; Fisher, 2008). Un complesso trimetrico, chiamato complesso *velvet* formato dai 3 geni *VelB/VeA/LaeA*, è responsabile della sincronizzazione dello sviluppo e dei cambiamenti metabolici al buio, ma come il segnale luminoso sia trasmesso a questo complesso è ancora ignoto (Bayram et al., 2008).

Oltre ad essere una reazione ad uno stato iper-ossidante della cellula i metaboliti secondari possono essere prodotti da uno o più metaboliti primari dopo che uno o più nutrienti diventano limitanti (Miller, 2001). È noto da tem-

po che diversi fattori nutrizionali, tra cui le fonti azotate e carboniose, possono influenzare la sintesi delle micotossine. In *A. flavus* e *A. parasiticus*, l'aggiunta di prolina e asparagina può significativamente aumentare la biosintesi delle AF (Payne e Hagler, 1983), mentre il triptofano (Trp) aumenta la sintesi delle AF in *A. parasiticus* ma la inibisce in *A. flavus* (Wilkinson et al., 2007). L'effetto del triptofano è stato osservato in associazione con un aumento dell'espressione di alcuni geni del cluster delle AF come *norA*, *nor1* e *omtB* in *A. parasiticus* ma non in *A. flavus* (Wilkinson et al., 2007). Per quanto riguarda la sintesi di OTA, l'azoto è spesso un fattore inibente per la sua sintesi. L'espressione del gene *pks* codificante per una polichetide sintasi relativa alla sintesi di OTA è infatti sempre ridotta in presenza di elevate fonti di azoto, confermando che l'effetto inibitorio abbia origine a livello trascrizionale (O'Callaghan et al., 2006). Abbas et al. (2009) hanno dimostrato che alcune sorgenti di azoto come l'ammonio acetato non hanno un impatto significativo sull'espressione della *pks* relativa alla sintesi di OTA anche se questo composto porta comunque ad una inibizione della sintesi di questa tossina. Questo indicherebbe il coinvolgimento di meccanismi post-trascrizionali nella regolazione della sintesi di questa tossina.

L'influenza delle fonti carboniose sulla sintesi di diverse micotossine è studiato da molto ed ha prodotto risultati abbastanza contraddittori. Price et al. (2006) indicano che un fattore chiave per l'eventuale stimolazione della sintesi della micotossina è la facilità con cui la sorgente carboniosa considerata possa essere degradata nella via glicolitica e nella via degli esoso monofosfati. Questa scoperta è stata confermata dal fatto che un *set* di geni quali *enoA* e *pbcA*, che presentano un'alta omologia con enolasi e piruvato decarbossilasi, sono *up*-regolati in risposta all'aggiunta di saccarosio al mezzo colturale. Nel caso della sintesi di OTA, l'aggiunta di diversi zuccheri semplici ha mostrato effetti opposti a seconda del terreno colturale utilizzato (Abbas et al., 2009). Ad esempio, il lattosio mostra un significativo effetto stimolante nei confronti della sintesi di questa tossina. Invece molto spesso il glucosio mostra un effetto inibente nella sintesi di molte tossine (Rujiker e Wisser, 1997).

Così come i fattori nutrizionali sono in gra-

do di controllare o quantomeno regolare la sintesi di diverse micotossine così i segnali provenienti dall'ospite possono modulare a livello trascrizionale sia lo sviluppo del patogeno che la sintesi di molti metaboliti secondari tra cui le micotossine. Diversi funghi micotossigeni tra cui molte specie appartenenti ai generi *Fusarium*, *Aspergillus* e *Penicillium* sono capaci di adattarsi a diverse condizioni di crescita che variano dal saprofitismo alla patogenesi. Ad esempio, *A. flavus*, che è generalmente noto come saprofita del post-raccolta, può mostrare anche delle fasi patogeniche nel corso del suo ciclo vitale ad esempio quando cresce nei tessuti ricchi di lipidi degli embrioni del seme vivo di mais (Fennell et al., 1973; Lillehoj et al., 1974). Molto spesso il cambio di "stile di vita" in questi funghi è indotto da segnali che provengono da potenziali ospiti; questi segnali sono in grado di stimolare la formazione di fattori di virulenza, (Desmond et al., 2008), composti tossici (Lillehoj, 1991) o una transizione morfologica (Noverr e Huffnagle, 2004). Alcuni di questi segnali sono spesso diffusibili, ad esempio alcuni composti organici volatili (VOCs) prodotti dalle piante, come il metil jasmonato e altre ossilipine sono capaci di stimolare la sporulazione (Hountondji et al., 2006) e modulare la biosintesi delle micotossine in molti funghi (Gao e Kolomiets, 2009; Reverberi et al., 2010).

Le ossilipine sono una classe di acidi grassi ossidati capaci di agire come segnali di comunicazione intra- ed intercellulari negli animali, nelle piante e nei funghi (Tsitsigiannis e Keller, 2006). Uno dei pochi segnali extracellulari noti nel regolare lo sviluppo sessuale e asessuale ed il metabolismo secondario nei funghi è proprio una miscela di ossilipine, i fattori *psi* – precocious sexual inducer – che agiscono come precursori di ormoni capaci di reprimere la conidiogenesi e di promuovere lo sviluppo sessuale (Champe e el-Zayat, 1989). Linee mutanti nei geni *ppo* (*psi* producing oxidases) di *A. nidulans* $\Delta ppoA\Delta ppoC$ e $\Delta ppoA\Delta ppoB\Delta ppoC$ non sono in grado di produrre la ST sia *in vitro* che *in vivo*. Il blocco della sintesi di questa tossina avviene a livello trascrizionale. Questo suggerisce che le ossilipine regolano il metabolismo secondario ad un livello trascrizionale (Tsitsigiannis e Keller, 2006). Quindi dato che è stato osservato, come detto in precedenza, che anche le ossilipine prodotte dalle piante possono modu-

lare il metabolismo secondario, ed in particolare la sintesi delle micotossine, in diversi funghi patogeni, è ipotizzabile l'esistenza di un *cross-talk* tra pianta e fungo basato sulle ossilipine. Infatti, un tipo di "cross-talk ossilipinico" è stato dimostrato nell'interazione tra *A. nidulans* e semi di mais e tra *A. ochraceus* e semi di grano. In questo scenario il fungo micotossigenico secernerebbe delle ossilipine nel momento in cui entra in contatto con l'ospite il quale, a sua volta, percependole come elicitatori (i.e. Pathogen Associated Molecular Patterns?) attiverebbe delle risposte di difesa che includono anche la produzione di altre ossilipine attraverso l'attivazione della via delle lipossigenasi (LOX), (Gao et al., 2009; Reverberi et al., 2010). Le LOX sono enzimi che aggiungono in modo regio-specifico un ossigeno molecolare a quegli acidi grassi polinsaturi (PUFA) che mostrano un legame *cis, cis* 1,4 pentadiene. In particolare nei PUFA delle piante si possono formare delle ossilipine che mostrano il perossido prevalentemente in C9 ed in C13 (Feussner e Wasternack, 2002). Le ossilipine prodotte dal seme, probabilmente mimando quelle prodotte dal fungo, sono in grado di indurre diverse risposte nel fungo patogeno tra cui l'attivazione del metabolismo secondario e cambiamenti nella morfogenesi (Brodhagen et al., 2008). Infatti, le ossilipine formate a partire dall'acido linoleico e linolenico (HPOD/TE) sono capaci di influenzare in modo differenziale la sintesi di diverse micotossine. Ad esempio in *A. flavus* e *A. nidulans* il 9-HPODE stimola mentre il 13-HPODE inibisce la sintesi di AF e ST (Burow et al., 1997; Brodhagen et al., 2008; Gao e Kolomiets, 2009). Ma le ossilipine prodotte dalla pianta rappresentano effettivamente una risposta alle ossilipine prodotte dal patogeno? In *A. ochraceus* è stata dimostrata l'esistenza di questo *cross-talk* proprio attraverso la delezione di un gene del fungo codificante per una lipossigenasi, il gene *AoloxA*. Tale gene codifica per una LOX simile ad una 15-LOX umana che porta alla formazione prevalente di 13-ossilipine a partire dall'acido linoleico in *A. ochraceus*. Questo ceppo *lox*⁽⁻⁾ è incapace di produrre ossilipine durante l'interazione con l'ospite, il quale a sua volta non riesce a "percepirlo", non produce 9-ossilipine e quindi non supporta la produzione di OTA (Reverberi et al., 2010). Quindi le ossilipine rappresenterebbero uno stimolo de-

rivante dall'ospite che mediante un'alterazione della sintesi della loro "contro-parte" fungina sono in grado di modificare lo stile di vita del fungo dal saprofitico "Dr. Jekyll" al patogeno micotossigeno "Mr. Hyde".

Molte specie appartenenti al genere *Fusarium*, come il *F. oxysporum*, *F. graminearum* e *F. sporotrichioides* sono in grado di produrre diverse fitopatie come le malattie vascolari e le fusariosi della spiga. A queste specie appartengono dei tipici patogeni "di campo" che sviluppano una relazione molto stretta con i rispettivi ospiti vegetali e sono capaci di usare una serie di molecole segnale derivanti dall'ospite prodotte durante l'interazione per indurre la sintesi di diversi fattori di virulenza tra cui i tricoteceni e le fumonisine (Desjardins e Proctor, 2007). In *F. pseudograminearum* la produzione di DON stimola la formazione di perossido d'idrogeno nell'ospite (Desmond et al., 2008), ma è anche noto che questa specie reattiva è, a sua volta, un potente induttore della sintesi di questa tossina (Ponts et al., 2009) suggerendo un *cross-talk* basato sui perossidi tra il patogeno ed il suo ospite. Comunque anche in *Fusarium* è attivo un *cross-talk* basato sulle ossilipine. Infatti, in *F. sporotrichioides* la distruzione di un gene omologo a *ppo* di *A. nidulans* inibisce la produzione di tossina T2 (Mac Donald et al., 2004) e nei semi di mais diverse specie di *Fusarium* inducono l'espressione di una 9-LOX (Wilson et al., 2001). Questo suggerisce che il mais tenta di alterare il metabolismo ossilipinico in *Fusarium*, ma così come avviene per l'*Aspergillus*, il patogeno usa le ossilipine vegetali per attivare i suoi fattori di virulenza, i.e. le fusario-tossine. È infatti noto, che sia la T2 che il DON contribuiscano notevolmente nella virulenza del patogeno, infatti ceppi di *Fusarium* incapaci di sintetizzare queste tossine presentano una virulenza notevolmente ridotta. Anche la sintesi di fumonisina B1 è indotta dalla produzione di 9-HPOD(T)E e 9-KOD(T)E da parte dell'ospite (Gao et al. 2007) (fig. 1).

Le micotossine negli alimenti

Tutti gli esseri umani devono nutrirsi per sopravvivere. Questo è il paradigma che rende fondamentale la sicurezza sia delle derrate che degli alimenti per la salvaguardia della salute

umana. Considerando che quasi tutti i prodotti vegetali sono idonei per la crescita di funghi micotossigeni, la formazione di micotossine nelle piante infette e nelle derrate contaminate è un rischio sempre presente che conduce all'accumulo di queste sostanze pericolose e al loro "carry-over", o trasporto lungo la filiera, sia nei mangimi per animali che negli alimenti stessi. Quindi la contaminazione da micotossine può indurre negli esseri umani le cosiddette micotossicosi primarie, se ad essere consumato è un alimento direttamente contaminato da micotossine (es. riso, frumento, arachidi, legumi etc.), oppure secondarie se ad essere contaminato è l'alimento di origine animale derivante da animali allevati con mangime in cui sono presenti le micotossine (es. latte, carne, uova etc.) (Botталico, 2002).

La qualità del mangime per animali è quindi un punto chiave per la sicurezza alimentare. La Commissione Europea, soprattutto tramite l'EFSA (European Food Safety Authority), tenendo presente del rischio rappresentato dall'uso di un mangime non salubre per produrre alimenti di origine animale ha stabilito e recentemente aggiornato, una normativa molto severa concernente il rischio della presenza di agenti chimici o di micotossine nelle derrate utilizzate per produrre mangimi ed alimenti. In particolare, il giornale ufficiale dell'Unione Europea ha pubblicato il regolamento 1907/2006 che riguarda la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione dell'uso di agenti chimici (REACH), il regolamento 1881/2006 che stabilisce dei livelli massimi per alcuni contaminanti nelle matrici alimentari che è stato aggiornato dal reg. 1126/2007 e dal 565/2008. Attraverso questi regolamenti la UE ha lo scopo di garantire un alto livello di protezione della salute umana e della sicurezza ambientale. È stato infatti recentemente stimato che circa il 25% delle derrate mondiali è contaminato da micotossine. Generalmente queste tossine causano immuno-tossicità, la produzione di anticorpi antigene-specifici, un'alterata produzione di citochine e diversi tipi di tumore sia nell'uomo che negli animali (Wild e Gong, 2009), probabilmente attraverso la loro capacità di interagire con il DNA e modificarne la sua struttura e la sua azione. Infatti alcune micotossine possono essere carcinogeniche (es. fumonisine, Gruppo 2B: "possibly carcinogenic to humans";

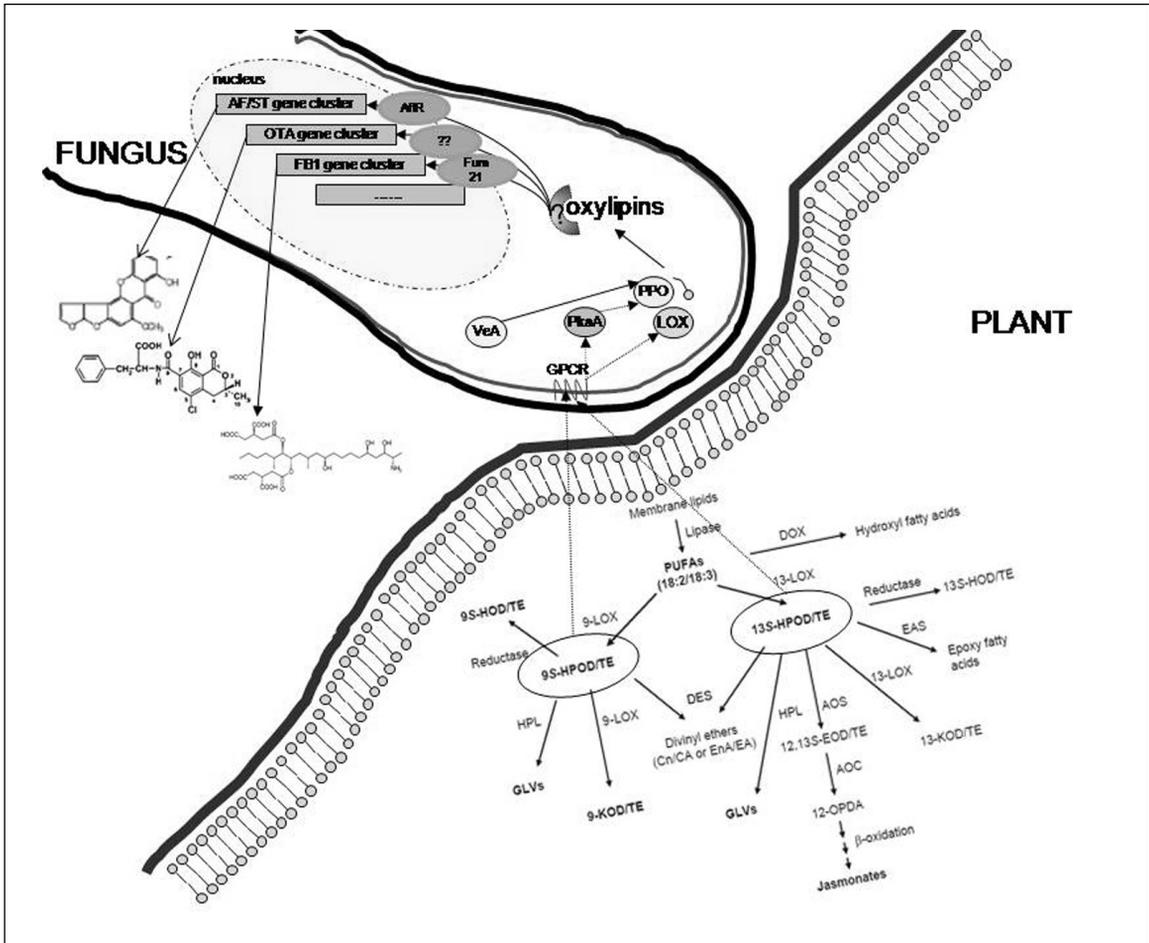


Figura 1. Rappresentazione diagrammatica del *cross-talk* ossilipinico esistente tra un fungo micotossigeno (e.g. *Aspergillus nidulans*, *A. ochraceus*, *Fusarium verticillioides*) e una cellula vegetale. In risposta al riconoscimento del patogeno la pianta produce delle ossilipine di difesa (adattato da Gao e Kolomiets, 2009). Questi composti vengono rilasciati attraverso la cellula vegetale e probabilmente “recepiti” da un recettore accoppiato ad una proteina G (GPCR) presente nella superficie esterna della membrana cellulare. Questo recettore, probabilmente attraverso l’azione della protein-chinasi PkaA (adattato da Tsitsigiannis e Keller, 2007), è capace di indurre l’attivazione di alcuni enzimi che formano ossilipine come le diossigenasi ppo-like in *A. nidulans* e la lipossigenasi AoloxA di *A. ochraceus*. Secondo questa ipotesi le ossilipine formate da questi enzimi potrebbero rappresentare uno dei putativi regolatori dei fattori di trascrizione relativi alla sintesi delle micotossine come AfIR e Fum21 (le linee tratteggiate rappresentano delle interazioni ipotetiche).

Figure 1. Diagrammatic representation of oxylipin cross-talk occurring between a mycotoxigenic fungus (e.g. *Aspergillus nidulans*, *A. ochraceus*, *Fusarium verticillioides*) and a plant cell. In response to pathogen recognition the plant produces defence oxylipins (adapted from Gao and Kolomiets, 2009). These compounds are released through the plant cell wall and probably received by a G-protein coupled receptor present on the fungal membrane. It is here hypothesised that this receptor, probably by means of the mediated action of the *A. nidulans* PkaA analogues (adapted from Tsitsigiannis and Keller, 2007), is able to trigger the activation of oxylipin-forming enzymes such as the ppo-dioxygenase-like enzymes in *A. nidulans* and the lipoxygenase of *A. ochraceus* AoloxA. Under this hypothesis the oxylipin formed by these enzymes could represent one of the putative regulators of the mycotoxin-related transcriptional factor such as AfIR and Fum21 (dotted lines represent hypothetical interactions).

International Agency for Research on Cancer, IARC), carcinogeniche e teratogeniche (es. OTA, Gruppo 2B) o carcinogeniche, mutageniche e teratogeniche (es. aflatoxina B₁, Gruppo

1; aflatoxina M₁, Gruppo 2B) (IARC, 2002). Le aflatoxine sono epato-carcinogeniche per l’uomo mentre studi recenti suggeriscono che la fumonisina B1 può causare difetti nel tubo neu-

rale in alcune popolazioni che consumano molto mais o suoi derivati (Wild e Gong, 2009). D'altronde la presenza di micotossine nei mangimi può indurre gravi disturbi fisiologici negli animali e quindi non solo peggiorare la sicurezza dell'alimento di origine animale ma anche la sua qualità. Tra le micotossine maggiormente presenti come contaminanti nei mangimi sono presenti le aflatossine, l'OTA, le fumonisine e lo zearalenone (ZEA). Questa micotossina, prodotta da diversi funghi tra cui il *F. graminearum* e il *F. culmorum*, ha delle proprietà estrogeniche e ad es. causa iper-estrogenismo nei maiali. Generalmente lo ZEA viene trovato insieme ad altre tossine prodotte dal *Fusarium* quali il DON, il nivalenolo (NIV), e le fumonisine. Un report pubblicato nel 2003 (Haouet e Altissimi, 2003) ha indicato che in Italia la presenza di aflatossine nei cereali è in continuo aumento. Per quanto riguarda l'OTA, la contaminazione dei mangimi animali può causare la presenza di residui nella parte edibile e nel siero di sangue, mentre risulta inferiore nelle carni, nel latte e nelle uova. Recenti analisi riguardanti l'esposizione all'OTA dei consumatori europei ha rivelato che attualmente il consumo settimanale varia dai 15 ai 60 ng/Kg di peso corporeo. La contaminazione di OTA dei mangimi animali riguarda principalmente i cereali, in particolare il mais, i cereali da birra, i semi di cotone, l'orzo mentre il DON è ritrovato negli insilati, nei mangimi (Driehuis et al., 2008). Una recente analisi sul territorio Europeo ha mostrato che il consumo giornaliero delle micotossine attraverso l'alimentazione raggiunge, sommando diverse tossine tra cui AF, OTA, TR, ZEA, FUM e PAT, un ammontare totale di ng/kg peso corporeo *pro die* (Leblanc et al., 2005).

Strategie di controllo delle micotossine

La presenza di micotossine nelle derrate alimentari utilizzate sia per produrre alimenti che mangimi per animali, nei mangimi e negli alimenti stessi è regolata, come detto in precedenza, da limiti fissati dalla UE. Quindi le industrie che producono mangimi ed alimenti devono attenersi strettamente a questi limiti, anche se molto spesso il materiale utilizzato per comporre questi prodotti risulta contaminato. Occorre quindi prevedere una strategia artico-

lata per impedire l'ingresso nella filiera alimentare di queste micotossine. Attualmente la strategia si compone di:

- 1) prevenzione;
- 2) detossificazione.

Il metodo che tradizionalmente viene utilizzato in tutto il mondo per eliminare o quantomeno limitare la contaminazione da funghi patogeni e produttori di micotossine è il controllo chimico. Le piante, le sementi e le derrate alimentari in generale vengono trattate, come strategia preventiva, sia in campo che nel post raccolta con anti-fungini, antiossidanti, insetticidi ed altri composti. In realtà nessuno di questi prodotti fornisce una soluzione definitiva per eliminare la contaminazione fungina e molto spesso provocano degli ulteriori problemi di rischio chimico per l'uomo e l'ambiente.

Attualmente è quindi importante trovare strategie di controllo alternative basate sull'uso di composti a basso impatto ambientale, economici e facilmente utilizzabili sia in campo che nelle derrate immagazzinate. Come detto in precedenza, è noto da diverso tempo che lo stress ossidativo ed in particolare l'alterazione del bilancio *redox* endocellulare verso uno stato iperossidante induca molti funghi patogeni a produrre micotossine. Quindi l'uso di composti antiossidanti può rappresentare un'efficiente strategia per prevenire contemporaneamente la produzione di diverse micotossine. D'altronde è noto da tempo l'uso di antiossidanti di sintesi quali il BHA (idrossianisolo butilato), il BHT (idrossitoluene butilato), il propil-gallato per inibire la sintesi di micotossine, anche se ad oggi molti di questi composti non possono essere più utilizzati nell'agro-industria a causa della loro tossicità per l'uomo e gli animali. Quindi sono state recentemente sviluppate delle strategie di prevenzione basate sull'utilizzo di composti antiossidanti di origine naturale derivati sia da piante che funghi. In particolare, la *Lentinula edodes*, un fungo basidiomicete medicinale già noto per le sue proprietà antivirali, antibatteriche, immuno-stimolanti (Wasser e Weiss, 1999), è risultato capace di stimolare il sistema antiossidante di diversi funghi micotossigeni e quindi di impedire la produzione di alcune micotossine (Reverberi et al., 2005; Zjalic et al., 2006; Tolaini et al., 2010). In *A. parasiticus* produttore di AF, l'aggiunta al terreno colturale di estratti bioattivi di *L. edodes* porta all'*up*-regolazione di

alcune attività antiossidanti, tra cui la superossido dismutasi e la glutatione perossidasi, e alla conseguente *down*-regolazione dell'espressione genica del *cluster* delle AF e quindi della biosintesi delle tossine stesse (Reverberi et al., 2005). L'uso di antiossidanti derivati dalle piante come l'acido caffeico riduce la produzione delle AF fino al 95% senza alterare la crescita fungina. Un'analisi microarray del trascrittoma di *A. flavus* trattato con l'acido caffeico indicava che l'espressione della maggior parte dei geni del cluster delle AF era *down*-regolato (Kim et al., 2008). Una ulteriore conferma dell'efficacia dell'uso di questi antiossidanti naturali nella lotta alle micotossine è stata ottenuta anche per *F. graminearum* e *F. culmorum*. Infatti, l'antiossidante acido ferulico, l'acido fenolico più abbondante nella crusca di grano, è capace di inibire la sintesi di NIV, DON, ADON e fusarenone. Inoltre una significativa inibizione della sintesi di FB1 in *F. verticillioides* è stata ottenuta utilizzando lo stesso antiossidante (Chiple e Uraih, 1980; Beekrum et al., 2003). Un altro antiossidante di origine vegetale già noto per le sue proprietà antiossidanti e antitumorali è il resveratrolo, stilbene trovato soprattutto in bacche rosse e nel vino. Questo composto agisce inibendo l'attività di enzimi pro-infiammatori come le ciclo-ossigenasi e le lipossigenasi. Dato che, come detto in precedenza, le ossilipine prodotte dalle LOX sono dei potenti stimolanti della sintesi di alcune micotossine, come ad esempio l' OTA, è stato recentemente trovato che il resveratrolo, proprio inibendo questi enzimi ossidativi, è capace di bloccare la sintesi di diverse micotossine tra cui, appunto, l'OTA (Fanelli et al., 2004). Una correlazione simile, cioè uno stretto rapporto tra lo stress ossidativo e sintesi di micotossine, è stata trovata anche per quanto riguarda la produzione di PAT in *P. expansum*, agente del marciume verde-azzurro delle pomacee. Castoria et al. (2003) hanno ottenuto notevoli risultati per quanto riguarda il biocontrollo del *P. expansum* e della produzione di PAT utilizzando dei lieviti isolati da matrici naturali. Tali microrganismi sono capaci di resistere alle condizioni di stress ossidativo che si generano nell'ambiente ferita che si origina in frutti (soprattutto pomacee). Tale ambiente viene facilmente colonizzato da patogeni opportunisti quali il *P. expansum*. I lieviti antagonisti sono capaci di colonizzare tale ambiente

molto più rapidamente del fungo patogeno e quindi di inibirne la crescita e la produzione di PAT. L'uso contemporaneo dei lieviti antagonisti e degli estratti bioattivi di *L. edodes* ha consentito di migliorare ulteriormente le *performances* del biocontrollo nei confronti dell'agente del marciume delle pomacee. Infatti, questi composti fungini sono probabilmente capaci di stimolare il sistema antiossidante dei lieviti antagonisti consentendo loro di crescere ancora più rapidamente nell'ambiente ferita e in tal modo di inibire completamente la produzione di PAT (Tolaini et al., 2010). Recentemente è stato infatti dimostrato che l'uso di antiossidanti di natura vegetale quali l'umbelliferone e la quercetina è capace di inibire la sintesi di PAT sia *in vitro* che *in vivo* (Sanzani et al., 2009).

Un'altra possibile strategia alternativa di prevenzione è sicuramente rappresentata dal controllo biologico della contaminazione fungina, soprattutto per quei patogeni di campo, come molte specie appartenenti al genere *Fusarium*, che producono le micotossine direttamente sulla pianta. Questa strategia può essere perseguita utilizzando dei microrganismi antagonisti come il fungo saprofito-micoparassita *Trichoderma* spp. o il lievito *Saccharomyces cerevisiae*, ma anche alcuni loro metaboliti (enzimi idrolitici come le β -glucanasi o le chitinasi). *Trichoderma* spp. possiede una resistenza innata alla maggior parte degli agro-chimici inclusi i fungicidi di sintesi, benché tale resistenza sia isolato-specifica e quindi può essere utilizzato come co-formulante in una strategia di lotta integrata. Infatti l'uso di questo antagonista naturale consente di ridurre se non escludere del tutto l'uso di pesticidi (Harman e Kubicek, 1998).

Quando la prevenzione non è sufficiente a impedire l'accumulo di micotossine, oppure le derrate sono già contaminate, è possibile intervenire attraverso delle strategie di detossificazione. Uno dei sistemi più semplici, economici e quindi più utilizzati è lo "scorticamento" del seme. Tale procedimento può diminuire il contenuto di micotossine fino al 40% ma anche altri metodi di tipo fisico (radiazioni o calore) e chimico (trattamento con perossidi o ammoniaca) possono essere utilizzati per degradarle. Questi metodi hanno però differenti aspetti negativi che limitano la loro applicazione: infatti non sono sempre "economici" ed inoltre possono degradare degli importanti componenti nu-

tritive delle derrate trattate (ad es. la componente vitaminica) e rappresentano comunque un rischio per l'ambiente, data l'elevata tossicità di alcuni di questi. Un esempio di detossificazione è dato dall'utilizzo di queste strategie per limitare la presenza di aflatoxina M1 nel latte. L'aflatoxina M1 rappresenta un *by-product* della aflatoxina B1. Infatti i ruminanti che si nutrono di mangime contaminato con l'AF B1 sono capaci di convertirne una parte nella forma idrossilata M1, maggiormente idrosolubile e quindi più facilmente escreta mediante le feci e l'urina ma proprio per questo motivo ritrovata in grande quantità nel latte vaccino. Per evitare che i livelli di M1 siano maggiori dei limiti consentiti (50 ppt) alcuni allevatori utilizzano delle sostanze che adsorbono la tossina quali la bentonite di sodio o di calcio, la zeolite, e i silicati idratati di alluminio, sodio e calcio (HSCAS). Però questi prodotti (tranne gli HSCAS) possono adsorbire le AF ma non hanno alcun effetto verso le altre tossine (vedi Fusario-tossine) presenti nei mangimi. Altri composti come il carbone vegetale e la colestiramina sono attualmente in studio per cercare di migliorare la qualità delle sementi utilizzate per i mangimi o gli alimenti. Il carbone attivo è capace di adsorbire molte tossine ed inoltre ha il vantaggio di adsorbire anche molti odori sgradevoli. Ma anche questi composti presentano alcuni svantaggi tra cui proprio la riduzione di alcuni microelementi presenti nelle sementi.

Conclusioni

Le micotossine sono molto probabilmente prodotte in conseguenza dell'instaurarsi di uno stato iper-ossidante nella cellula fungina. Tale stato è raggiunto durante la crescita, cioè a causa del normale accumulo di specie reattive, "scarto" delle reazioni ossidative del metabolismo primario quali respirazione degli zuccheri o degli acidi grassi, o in conseguenza dell'interazione con la radiazione luminosa, oppure per la presenza di sostanze ossidanti (vedi ossilipine) nell'ambiente di crescita. Quando la cellula fungina si trova in tale stato, compie un cambiamento nel proprio "stile di vita" attivando dei geni che controllano lo *switch* tra crescita vegetativa (micelio indifferenziato) e differenziativa (ovvero sviluppo di strutture riproduttive ses-

suali o asessuali) ma soprattutto "accendendo" il metabolismo secondario. Nel caso di molti funghi patogeni questo si traduce nella sintesi delle micotossine, metaboliti tossici e pericolosi per la salute umana ed animale. Il controllo esercitato dallo stato *redox* sull'accensione del metabolismo secondario ha reso possibile l'individuazione di strategie alternative per inibire la sintesi delle micotossine quali l'uso di sostanze o di microrganismi ad azione antiossidante. Tali strategie, soprattutto se basate sull'uso di sostanze bioattive naturali, rappresentano un'efficace alternativa a basso costo e soprattutto a basso impatto ambientale per limitare o comunque ridurre la presenza delle micotossine negli alimenti.

Bibliografia

- Abbas A., Vales H., Dobson A.D.W. 2009. Analysis of the effect of nutritional factors on OTA and OTB biosynthesis and polyketide synthase gene expression in *Aspergillus ochraceus*. *Int. J. Food Microbiol.*, 135:22-27.
- Aguirre J., Rios-Momberg M., Hewitt D., Hansberg W. 2005. Reactive oxygen species and development in microbial eukaryotes. *Trends Microbiol.*, 12:111-118.
- Artigot M.P., Loiseau N., Laffitte J., Mas-Reguieg L., Tadriss S., Oswald I.P., Puel O. 2009. Molecular cloning and functional characterization of two CYP619 cytochrome P450s involved in biosynthesis of patulin in *Aspergillus clavatus*. *Microbiology*, 155, 5:1738-1747.
- Bayram O., Krappmann S., Ni M., Bok J.W., Helmstaedt K., Valerius O., Braus-Stromeyer S., Kwon N.J., Keller N.P., Yu J.H. 2008. VelB/VeA/LaeA complex coordinates light signal with fungal development and secondary metabolism. *Science*, 320:1504-1506.
- Beekrum S., Govinden R., Padayachee T., Odhav B. 2003. Naturally occurring phenols: a detoxification strategy for fumonisin B₁. *Food Add. Contam.*, 20:490-449.
- Bennett J.W. 1983 Differentiation and secondary metabolites in mycelial fungi. In: Bennet J.W., Ciegler A. (eds.): *Secondary metabolism and differentiation in fungi*, 1-32, Marcel Dekker, New York.
- Bok J.W., Keller N.P. 2004. LaeA, a regulator of secondary metabolism in *Aspergillus* spp. *Eukaryot. Cell*, 3:527-535.
- Bottalico A. 2002. Funghi tossigeni e micotossine: aspetti generali. *Informatore Fitopatologico*, 12:10-16.
- Brodhagen M., Tsitsigiannis D.I., Hornung E., Goebel C., Feussner I., Keller N.P. 2008. Reciprocal oxylipin-mediated cross-talk in the *Aspergillus*-seed pathosystem. *Mol. Microbiol.*, 67, 2:378-391.
- Brown D.W., Butchko R.A.E., Busman M., Proctor R.H.

2007. The *Fusarium verticillioides* FUM Gene Cluster Encodes a Zn(II)₂Cys₆ Protein That Affects FUM Gene Expression and Fumonisin Production. *Eukaryot. Cell*, 6, 7:1210-1218.
- Burow G.B., Nesbitt T.C., Dunlap J., Keller N.P. 1997. Seed lipoxygenase products modulate *Aspergillus* mycotoxin biosynthesis. *Mol. Plant Microbe Interact.*, 10:380-387.
- Caddick M.X. 1993. Perception and response: phenotypic plasticity in fungi. In: Jennings D.H. (ed.): *Stress tolerance of fungi*, 13-44. Marcel Dekker, New York.
- Calvo A.M., Wilson R.A., Bok J.W., Keller N.P. 2002. Relationship between secondary metabolism and fungal development. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 66:447-459.
- Castoria R., Caputo L., De Curtis F., V. De Cicco 2003. Resistance of postharvest biocontrol yeast to oxidative stress: a possible new mechanism of action. *Phytopathol.*, 93:564-572.
- Champe S.P., el-Zayat A.A. 1989. Isolation of a sexual sporulation hormone from *Aspergillus nidulans*. *J. Bacteriol.*, 171:3982-3988.
- Chipley J.R., Uraih N. 1980. Inhibition of *Aspergillus* growth and aflatoxin release by derivatives of benzoic acids. *Appl. Environ. Microbiol.*, 40:352-357.
- Desjardins A.E., Proctor R.H. 2007. Molecular biology of *Fusarium* mycotoxins. *Int. J. Food Microbiol.*, 119: 47-50.
- Desmond O.J., Manners J.M., Stephens A.E., Maclean D.J., Schenk P.M., Gardiner D.M. 2008. The *Fusarium* mycotoxin deoxynivalenol elicits hydrogen peroxide production, programmed cell death and defence responses in wheat. *Mol. Plant Pathol.*, 9:435-445.
- Dohlman H.G., Thorner J. 1997. RGS proteins and signaling by heterotrimeric G proteins. *J. Biol. Chem.*, 272:3871-3874.
- Dowling D.K., Simmons L.W. 2009. Reactive oxygen species as universal constraints in the life-history evolution. *Proc. Res. Soc. B.*, 276:1737-1745.
- Driehuis F., Spanjer M.C., Schoten J.M., Giffel M.C.T. 2008. Occurrence of mycotoxins in feedstuffs of dairy cows and estimation of total dietary intake. *J. Dairy Sci.*, 91, 11: 4261-4271.
- Estruch F. 2000. Stress-controlled transcription factors, stress-induced genes and stress tolerance in budding yeast. *FEMS Microbiol. Rev.*, 24:469-486.
- Fabbri A.A., Fanelli C., Panfili G., Passi S., Fasella P. 1983. Lipoperoxidation and aflatoxin biosynthesis by *Aspergillus parasiticus* and *A. flavus*. *J. Gen. Microbiol.*, 129:3447-3452.
- Fanelli C., Fabbri A.A., Finotti E., Fasella P., Passi S. 1984. Free radicals and aflatoxin biosynthesis. *Experientia*, 40:191-193.
- Fanelli C., Fabbri A.A., Pieretti S., Finotti E., Passi S. 1985. Effect of different antioxidants and free radical scavengers on aflatoxin production. *Mycol. Res.*, 1:65-69.
- Fanelli C., Ricelli A., Reverberi M., Fabbri A.A. 2004. Aflatoxins and ochratoxins in cereal grains: An open challenge. *Recent Res. Devel. Crop Sci.*, 1:295-317.
- Fennell D.I., Bothast R.J., Lillehoj E.B., Peterson R.E. 1973. Bright greenish-yellow fluorescence and associated fungi in white corn naturally contaminated with aflatoxin. *Cereal Chem.*, 50:404.
- Feussner I., Wasternack C. 2002. The lipoxygenase pathway. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 53:275-297.
- Fisher R. 2008. Sex and poison in the dark. *Science*, 320:1430-1431.
- Gao X.Q., Shim W.B., Gobel C., Kunze S., Feussner I., Meeley R., Balint-Kurti P., Kolomiets M. 2007. Disruption of a maize 9-lipoxygenase results in increased resistance to fungal pathogens and reduced levels of contamination with mycotoxin fumonisin. *Mol. Plant Microbe Interact.*, 20:922-933.
- Gao X.Q., Kolomiets M.V. 2009. Host-derived lipids and oxylipins are crucial signals in modulating mycotoxin production by fungi. *Toxin Rev.*, 28:79-88.
- Gao X.Q., Brodhagen M., Isakeit T., Brown S.H., Göbel C., Betran J., Feussner I., Keller N.P., Kolomiets M.V. 2009. Inactivation of the Lipoxygenase ZmLOX3 Increases Susceptibility of Maize to *Aspergillus* spp. *Mol. Plant Microbe Interact.*, 22, 2:222-231.
- Georgianna D.R., Payne G.A. 2009. Genetic regulation of aflatoxin biosynthesis: From gene to genome. *Fungal Genet. Biol.*, 46:113-125.
- Halliwell B., Gutteridge J.M.C. 2007a. Oxygen is a toxic gas – an introduction to oxygen toxicity and reactive species. In: Halliwell B., Gutteridge J.M.C (eds.): *Free radicals in biology and medicine*, 1-29. Oxford University press, New York.
- Halliwell B., Gutteridge J.M.C. 2007b Cellular responses to oxidative stress: adaptation, damage, repair, senescence and death. In: Halliwell B., Gutteridge J.M.C (eds.): *Free radicals in biology and medicine*, 187-267. Oxford University press, New York.
- Haouet M.N., Altissimi M.S. 2003. Micotossine negli alimenti e micotossicosi animale e umana. Elaborazione dei dati ottenuti dal 1992 al 1998. Webzine – Sanità Pubblica Veterinaria, 4, 19. (<http://www.pg.izs.it/webzine.html>).
- Harman G.E., Kubicek C.P. 1998. *Trichoderma* and *Gliocladium*. In: *Enzymes, Biological Control and Commercial Applications*, 250-263. Taylor & Francis, London.
- Harmann D. 1956. Aging a theory based on free radical and radiation chemistry. *J. Gerontol.*, 11:298-300.
- Hicks J.K., Yu J.H., Keller N.P., Adams T.H. 1997. *Aspergillus* sporulation and mycotoxin production both require inactivation of the FadA G alpha protein dependent signaling pathway. *EMBO J.*, 16:4916-4923.
- Hountondji F.C.C., Hanna R., Sabelis M.W. 2006. Does methyl salicylate, a component of herbivore-induced plant odour, promote sporulation of the mite-pathogenic fungus *Neozygites tanajoae*? *Exp. Appl. Agrarol.*, 39:63-74.
- IARC (2002) Summary and Evolution.
- Jayashree T., Subramanyam C. 2000. Oxidative stress is a prerequisite for aflatoxin production by *Aspergillus parasiticus*. *Free Rad. Biol. Med.*, 10:981-985.

- Karolewicz A., Geisen R. 2005. Cloning a part of the ochratoxin A biosynthetic gene cluster of *Penicillium nordicum* and characterisation of the ochratoxin polyketide synthase gene. *Syst. Appl. Microbiol.*, 28:588-595.
- Kim J.H., Campbell B.C., Yu J., Mahoney N., Chan K.L., Molyneux R.J., Bhatnagar D., Cleveland T.E. 2005. Examination of fungal stress response genes using *Saccharomyces cerevisiae* as a model system: targeting genes affecting aflatoxin biosynthesis by *Aspergillus flavus* Link. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 67:807-815.
- Kim J.H., Yu J., Mahoney N., Chan K.L., Molyneux R.J., Varga J., Bhatnagar D., Cleveland T.E., Nierman W.C., Campbell B.C. 2008. Elucidation of the functional genomics of antioxidant-based inhibition of aflatoxin biosynthesis. *Int. J. Food Microbiol.*, 122, 1-2:49-60.
- Kimura M., Tokai T., Takahashi-Ando N., Ohsajo S., Fujimura M. 2007. Molecular and genetic studies of *Fusarium trichothecene* biosynthesis: pathways, genes and evolution. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 71, 9:2105-2123.
- Leblanc J.C., Tard A., Volatier J.L., Verger P. 2005. Estimated dietary exposure to principal food mycotoxins from The First French Total Diet Study. *Food Add. Contam.*, 22, 7:652-672.
- Lillehoj E.B., Garcia W.J., Lambrow M. 1974. *Aspergillus flavus* infection and aflatoxin production in corn: influence of trace elements. *Appl. Microbiol.*, 28:763-767.
- Lillehoj E.B. 1991. Aflatoxin: an ecologically elicited genetic activation signal. In: Smith J.E., Henderson R.S. (eds): *Mycotoxins and animal foods*, 2-30. CRC Press, Boca Raton, Fla.
- Lledias F., Rangel P., Hansberg W. 1999. Singlet oxygen is part of a hyperoxidant state generated during spore germination. *Free Rad. Biol. Med.*, 26:1396-1404.
- Li S., Myung K., Guse D., Donkin B., Proctor R.H., Grayburn W.S., Calvo A.M. 2006. FvVE1 regulates filamentous growth, the ratio of microconidia to macroconidia and cell wall formation in *Fusarium verticillioides*. *Mol. Microbiol.*, 62:1418-1432.
- McDonald T.T., Devi T., Shimizu K., Sim S.-C., Keller N.P. 2004. Signalling events connecting mycotoxin biosynthesis and sporulation in *Aspergillus* and *Fusarium* spp. In: Yoshizawa T. (ed.): *New Horizon of Mycotoxicology for Assuring Food Safety*. Proceedings of International Symposium of Mycotoxicology Takamatsu, Bookish Co, 139-147.
- Maggio-Hall L.A., Wilson R.A., Keller N.P. 2005. Fundamental contribution of beta-oxidation to polyketide mycotoxin production in *planta*. *Mol. Plant Microbe Interact.*, 18, 8:783-793.
- Miller D.J. 2001. Factors that affect the occurrence of fumonisin. *Environ. Health Persp.*, 109:321-324.
- Moake M.M., Padilla-Zakour O.I., Worobo R.W. 2005. Comprehensive review of patulin control methods in foods. *Comp. Rev. Food Sci. Food Safety*, 4, 1:8-21.
- Moye-Rowley W.S. 2003. Regulation of transcriptional response to oxidative stress in fungi: similarities and differences. *Eukaryot. Cell*, 2:381-389.
- Narasaiah K.V., Sashidar R.B., Subramanyam C. 2006. Biochemical analysis of oxidative stress in the production of aflatoxin and its precursor intermediates. *Mycopathol.*, 162:179-189.
- Noverr M.C., Huffnagle G.B. 2004. Regulation of *Candida albicans* morphogenesis by fatty acid metabolites. *Infect. Immun.*, 72:6206-6210.
- O'Callaghan J., Stapleton P.C., Dobson A.D.W. 2006. Ochratoxin A biosynthetic genes in *Aspergillus ochraceus* are differentially regulated by pH and nutritional stimuli. *Fungal Genet. Biol.*, 43:213-221.
- Payne G.A., Hagler W.M. 1983. Effect of specific aminoacids on growth and aflatoxin by *Aspergillus parasiticus* and *A. flavus* in defined media. *Appl. Environ. Microbiol.*, 171, 3:1539-1545.
- Ponts N., Pinson-Gadais L., Verdal-Bonnin M.N., Barreau C., Richard-Forget F. 2006. Accumulation of doxynivalenol and its 15-acetylated form is significantly modulated by oxidative stress in liquid cultures of *Fusarium graminearum*. *FEMS Microbiol. Lett.*, 258:102-107.
- Ponts N., Pinson-Gadais L., Barreau C., Richard-Forget F., Ouellet T. 2007. Exogenous H₂O₂ and catalase treatments interfere with *Tri* genes expression in liquid cultures of *Fusarium graminearum*. *FEMS Lett.*, 581:443-447.
- Ponts N., Couedelo L., Pinson-Gadais L., Verdal-Bonnin M.N., Barreau C., Richard-Forget F. 2009. *Fusarium* response to oxidative stress by H₂O₂ is trichothecene chemotype-dependent. *FEMS Microbiol. Lett.*, 293, 2:255-62.
- Price M.S., Yu J., Nierman W.C., Kim H.S., Pritchard B. 2006. The aflatoxin pathway regulator AflR induces gene transcription inside and outside of the aflatoxin biosynthetic cluster. *FEMS Microbiol. Lett.*, 255:275-279.
- Proctor R.H., Desjardins A.E., Plattner R.D., Hohn T.M. 1999. A polyketide synthase gene required for biosynthesis of fumonisin mycotoxins in *Gibberella fujikuroi* mating population A. *Fungal Genet. Biol.*, 27:100-112.
- Proctor R.H., Brown D.W., Plattner R.D., Desjardins A.E. 2003. Co-expression of 15 contiguous genes delineates a fumonisin biosynthetic gene cluster in *Gibberella moniliformis*. *Fungal Genet. Biol.*, 38:237-249.
- Reverberi M., Fabbri A.A., Zjalic S., Ricelli A., Punelli F., Fanelli C. 2005. Antioxidant enzymes stimulation in *Aspergillus parasiticus* by *Lentinula edodes* inhibits aflatoxin production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 69:207-215.
- Reverberi M., Zjalic S., Ricelli A., Punelli F., Camera E., Fabbri C., Picardo M., Fanelli C., Fabbri A.A. 2008. Modulation of antioxidant defence in *Aspergillus parasiticus* is involved in aflatoxin biosynthesis: a role for the *ApyapA* gene. *Eukaryot. Cell*, 7, 6:988-1000.

- Reverberi M., Punelli F., Scarpari M., Camera E., Zjalic S., Ricelli A., Fanelli C., Fabbri A.A. 2010. Lipoperoxidation affects ochratoxin A biosynthesis in *Aspergillus ochraceus* and its interaction with wheat seeds. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 85:1935-1946.
- Roze L.V., Arthur A.E., Hong S.Y., Chanda A., Linz J.E. 2007a. The initiation and pattern of spread of histone H4 acetylation parallel the order of transcriptional activation of genes in the aflatoxin cluster. *Mol. Microbiol.*, 66:713-726.
- Roze L.V., Beaudry R.M., Arthur A.E., Calvo A.M., Linz J.E. 2007b. *Aspergillus* volatiles regulate aflatoxin synthesis and asexual sporulation in *Aspergillus parasiticus*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 73:7268-7276.
- Ruijker C.J., Visser J. 1997. Carbon repression in *Aspergilli*. *FEMS Microbiol. Letter*, 151:103-114.
- Sanzani S.M., Schena L., Nigro F., De Girolamo A., Ippolito A. 2009. Effect of quercetin and umbelliferone on the transcript level of *Penicillium expansum* genes involved in patulin biosynthesis. *Eur. J. Plant Pathol.*, DOI 10.1007/s10658-009-9475-6.
- Semighini C.P., Harris S.D. 2008. Regulation of apical dominance in *Aspergillus nidulans* hyphae by reactive oxygen species. *Genetics*, 179:1919-1932.
- Shimizu K., Keller N.P. 2001. Genetic involvement of a cAMP-dependent protein kinase in a G protein signaling pathway regulating morphological and chemical transitions in *Aspergillus nidulans*. *Genetics*, 157:591-600.
- Shimizu K., Hicks J.K., Huang T.P., Keller N.P. 2003. Pka, Ras and RGS protein interactions regulate activity of AfIR, a Zn(II)2Cys6 transcription factor in *Aspergillus nidulans*. *Genetics* 165: 1095-1104
- Shwab EK, Keller NP (2008) Regulation of secondary metabolite production in filamentous fungi. *Mycol. Res.*, 112:225-230.
- Sies H. 1991. Oxidative stress II. Oxidants and antioxidants. Academic Press, London.
- Stinnett S.M., Espeso E.A., Cobeno L., Araujo-Bazan L., Calvo A.M. 2007. *Aspergillus nidulans* VeA subcellular localization is dependent on the importin alpha carrier and on light. *Mol. Microbiol.*, 63, 1:242-255.
- Tolaini V., Zjalic S., Reverberi M., Fanelli C., Fabbri A.A., Ricelli A. 2010. *Lentinula edodes* enhances the biocontrol activity of *Crypsotococcus laurentii* against *Penicillium expansum* contamination and patulin production in apple fruits. *Int. J. Food Microbiol.*, doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2010.01.044.
- Tsitsigiannis D.I., Keller N.P. 2006. Oxylipins act as determinants of natural product biosynthesis and seed colonization in *Aspergillus nidulans*. *Mol. Microbiol.*, 59:882-892.
- Wasser S., Weiss A. 1999. Medicinal mushrooms as a source of antitumor and immunomodulating polysaccharides. *Intern. J. Med. Mush.*, 1:31-62.
- White S., O'Callaghan J., Dobson A.D.W. 2006. Cloning and molecular characterization of *Penicillium expansum* genes upregulated under conditions permissive for patulin biosynthesis. *FEMS Microbiol. Lett.*, 255:17-26.
- Wild P.C., Gong Y.Y. 2009. Mycotoxins and human disease: a global ignored human health issue. *Carcinogenesis*, 31, 1:71-82.
- Wilkinson J.R., Yu J., Bland J.M., Nierman W.C., Bhatnagar D., Cleveland T.E. 2007. Amino acid supplementation reveals differential regulation of aflatoxin biosynthesis in *Aspergillus flavus* NRRL 3357 and *Aspergillus parasiticus* SRRC 143. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 74, 6:1308-1319.
- Wilson R.A., Gardner H.W., Keller N.P. 2001. Cultivar-dependent expression of a maize lipoxygenase responsive to seed infesting fungi. *Mol. Plant Microbe Interact.*, 14:980-987.
- Yu J.H., Wieser J., Adams T.H. 1996. The *Aspergillus* FlbA RGS domain protein antagonizes G protein signaling to block proliferation and allow development. *EMBO J.*, 15:5184-5190.
- Yu J.H., Keller N.P. 2005. Regulation of secondary metabolism in filamentous fungi. *Ann. Rev. Phytopathol.*, 43:437-458.
- Zjalic S., Reverberi M., Ricelli A., Granito V.M., Fanelli C., Fabbri A.A. 2006. *Trametes versicolor*: a possible tool for aflatoxin control. *Int. J. Food Microbiol.*, 107, 3:243-249.