



Italian Journal of Agrometeorology

Rivista Italiana di Agrometeorologia

Anno 16 - n. 1 - Gennaio 2011

Climatic scenarios and their impacts on irrigated agriculture in Emilia-Romagna, Italy <i>Giulia Villani, Fausto Tomei, Rodica Tomozeiu, Vittorio Marletto</i>	pag. 5
A proposal for a meteorological index of climate change impact <i>Luigi Perini, Luca Salvati, Marco Zitti, Sofia Bajocco</i>	pag. 17
Correlazione tra la dimensione del footprint e le variabili esogene misurate da stazioni eddy covariance in Pianura Padana, Italia <i>Daniele Masseroni, Giovanni Ravazzani, Chiara Corbari, Marco Mancini</i>	pag. 25
NOTE TECNICHE: A water balance model of Lago Azzurro (Madesimo - Lombardia - Italia) <i>Luigi Mariani, Giuseppe Sfondrini, Gabriele Cola</i>	pag. 37
Building of national database on water volume consumption for rice cultivation <i>Filiberto Altobelli, Flavio Lupia, Silvia Vanino, Iraj Namdarian</i>	pag. 45

Periodico quadrimestrale dell'Associazione Italiana di Agrometeorologia (AIAM) - ISSN 2038-5625
Reg. Tribunale di Firenze n. 5221 del 4/12/2002

Editor in Chief (Direttore scientifico):

Simone Orlandini

Dipartimento di Scienze delle Produzioni Vegetali, del Suolo e dell'Ambiente, Agroforestale (DIPSA) - Università degli studi di Firenze Piazzale delle Cascine, 18 - 50144 Firenze (FI) Tel. +39 055 32 88 257 e-mail: simone.orlandini@unifi.it

Associate editor (Direttore scientifico aggiunto):

Luigi Mariani

Dipartimento di Produzione Vegetale - Università degli studi di Milano Via Celoria, 2 - 20133 Milano (MI) Tel. +39 02 50 31 65 87 e-mail: luigi.mariani@unimi.it

Direttore responsabile:

Francesca Ventura

e-mail: francesca.ventura@unibo.it

Progetto grafico e Impaginazione:

Omega Graphics Snc - Bologna

Stampa:

LL.PE. Tipografia Persicetana, San Giovanni in Persiceto, Bologna, maggio 2011

**REDAZIONE,
ABBONAMENTI E PUBBLICITÀ**
Patron Editore

Via Badini 12, 40057 Quarto Inferiore,
Granarolo dell'Emilia, Bologna
Tel. 051.767003 - Fax 051.768252
www.patroneditore.com
info@patroneditore.com

Presidente AIAM:

Federico Spanna

e-mail: federico.spanna@regione.piemonte.it

Consiglieri:

Marco Acutis, Roberto Confalonieri, Bruno Di Lena, Pierpaolo Duce, Simone Orlandini, Donatella Spano, Francesca Ventura

Revisori dei conti:

Giovanni Dal Monte, Vittorio Marletto, Luigi Pasotti

Segreteria AIAM:

Simone Falzoi, Emanuela Forni, Tiziana La Iacona, Mattia Sanna, Irene Vercellino

e-mail: segreteria@agrometeorologia.it

Sede operativa:

c/o Regione Piemonte - Settore Fitosanitario

Via Livorno, 60 - 10144 Torino Tel. 011-4324770, 4323706
Fax 011-4323710

Sede legale:

via Caproni, 8 - 50144 Firenze

web: www.agrometeorologia.it

e-mail: ijagrometeorology@agrometeorologia.it

ABBONAMENTI

Abbonamento € 40,00 (estero € 53,00)

Fascicoli arretrati € 15,00 (estero € 19,00)

Versamento sul c.c.p. n. 000016141400 intestato all'Editore
www.abbonamenti@patroneditore.com



Field Editors

Agrienergie ed energie rinnovabili:

Anna Dalla Marta - DIPSA - Università degli studi di Firenze

Avversità e difesa:

Antonello Cossu - ARPAS – Dipartimento di Sassari - Servizio Valutazione e Analisi Ambientale

Clima e cambiamento climatico:

Alessandro Chiaudani - Agenzia Regionale Protezione e Prevenzione Ambientale del Veneto

Crescita e produzione, agrotecniche:

Roberto Confalonieri - Dipartimento di Produzione Vegetale – Università degli studi di Milano

Fenologia:

Emanuele Eccel - Fondazione Edmund Mach di San Michele all'Adige (TN)

Micrometeorologia:

Federica Rossi - Istituto di Biometeorologia del CNR

Relazioni idriche ed irrigazione:

Domenico Ventrella - CRA - Unità di Ricerca per i Sistemi Colturali degli Ambienti Caldo Aridi di Bari

Spazializzazione, GIS e remote sensing:

Gabriele Cola - Dipartimento di Produzione Vegetale – Università degli studi di Milano

Tecniche operative:

Luigi Pasotti - Assessorato Regionale all'Agricoltura e alle Foreste della Regione Sicilia

Editorial Board

Marco Acutis - Università di Milano, Milano

Giampiero Maracchi - Università di Firenze, Firenze

Arturo Alvino - Università del Molise, Campobasso

Vittorio Marletto - ARPA-Emilia Romagna, Bologna

Fabrizio Benincasa - CNR-IBIMET, Sassari

Massimo Menenti - CNR-ISPAIM, Napoli

Marco Bindi - Università di Firenze, Firenze

Francesco Morari - Università di Padova, Padova

Stefano Bocchi - Università di Milano, Milano

Andrea Pitacco - Università di Padova, Padova

Maurizio Borin - Università di Padova, Padova

Stefano Dietrich - CNR-ISAC, Roma

Paola Rossi Pisa - Università di Bologna, Bologna

Giampiero Genovese - JRC-UE, Varese

Donatella Spano - Università di Sassari, Sassari

The papers selected for this number of the Italian Journal of Agrometeorology offer a clear view of the vitality of Italian agrometeorology. The discussed topics are really interesting and cover a wide range of scientific or technical aspects. Climate change and water balance and consumption, discussed in this number, are “hot topics” not only for AIAM community, but also for all the agriculturists and the end-users of other related fields (environment, energy production, drinking water, etc.). The remaining paper deals with the problem of eddy covariance method and footprint dimension, a very important element for the realistic analysis of fluxes and gas exchange data.

Again I ask all of you to submit scientific papers and technical notes. All the contributions will be very appreciated representing a possible support for the activity of the other readers. I would like to highlight that 4 papers are written in English, allowing a better dissemination of the scientific results and, in the same time, of IJA.

I would like to conclude remembering you two important events. The 14^o National Congress of Agrometeorology, that will be organised by our colleagues in Bologna from 7th to 9th June. Theme of the Congress is “agrometeorology for the farm” (information available from the home page of the AIAM web site: <http://www.agrometeorologia.it>). The 19th International Congress of Biometeorology (ICB2011) will be held from 4th to 8th December 2011 at The University of Auckland, Auckland, New Zealand (<http://www.icb2011.com/icb2011/>). The Congress theme will be Climate and Society.

Simone Orlandini

OBIETTIVI

L'Italian Journal of Agrometeorology (Rivista Italiana di Agrometeorologia) si propone di pubblicare contributi scientifici originali, preferibilmente in lingua inglese ma anche italiana, riguardanti l'agrometeorologia, intesa come scienza che studia le interazioni dei fattori meteorologici e idrologici con l'ecosistema agricolo-forestale e con l'agricoltura intesa nel suo senso più ampio (comprendendo gli allevamenti e la pesca). Fra le aree tematiche di specifico interesse della rivista si segnalano: l'ecofisiologia, la fenologia, la crescita delle piante e la qualità e quantità della produzione, la fitopatologia, l'entomologia, le condizioni di benessere degli allevamenti, la fisica del terreno e l'idrologia, la micrometeorologia, la modellistica di simulazione e previsione, il telerilevamento, la pianificazione territoriale, i sistemi informativi geografici e le tecniche di spazializzazione, la strumentazione di misura di grandezze fisiche e biologiche, le tecniche di validazione di dati, l'agroclimatologia, la divulgazione in agricoltura e i servizi di supporto per gli operatori agricoli. La Rivista si avvale di un Comitato Scientifico, che è il garante della qualità delle pubblicazioni e che per tale scopo può avvalersi di referee esterni.

AIMS

The Italian Journal of Agrometeorology (Rivista Italiana di Agrometeorologia) publishes English or Italian written original papers about agrometeorology, that is the science which studies the interactions between meteorological, hydrological factors and the agro-forest ecosystem and with agriculture, including all the related themes (husbandry and fisheries). Among the main considered topics: ecophysiology, phenology, plant growth and quality and quantity of yield, animal comfort, phytopathology, entomology, soil physics and hydrology, micrometeorology, simulation and forecasting modelling, remote-sensing, landscape planning, geographical information system and spatialization techniques, instrumentation for physical and biological measurements, data validation techniques, agroclimatology, diffusion of information and support services for farmers. Submitted articles are reviewed by independent members of the Editorial Board or by other appropriate referee.

GUIDA PER GLI AUTORI

1. Il manoscritto inviato deve riferirsi a materiale originale, non pubblicato altrove, se non in fase strettamente preliminare. Almeno uno degli autori dovrà essere socio dell'AIAM.

2. Il manoscritto deve essere inviato esclusivamente via e-mail a: ijagrometeorology@agrometeorologia.it

La pubblicazione sull'Italian Journal of Agrometeorology è subordinata alla revisione ed all'approvazione del Comitato di Redazione, che potrà avvalersi del parere di revisori esterni per materie specifiche

3. L'articolo dovrà preferibilmente essere redatto in lingua inglese. Sono accettati lavori per le tre sezioni della rivista: rassegne bibliografiche, lavori di ricerca, note tecniche.

4. Occorre fornire Nome, Cognome, Posizione Accademico/Professionale, ente di affiliazione, indirizzo, numero telefonico e indirizzo di posta elettronica degli Autori ed indicare chiaramente l'Autore di riferimento per la corrispondenza con l'Editor.

5. Il riassunto (abstract) non deve superare le 12 righe e deve essere inviata anche una versione in lingua italiana (in lingua inglese, nel caso di manoscritto in italiano).

6. Le parole chiave (keywords): devono essere inviate anche in lingua italiana (in lingua inglese, nel caso di manoscritto in italiano).

7. Le figure, le tabelle, i grafici, le foto e le didascalie, da predisporre sia in italiano che in inglese, devono essere allegate salvandole in file diversi da quello del testo.

8. Le didascalie di tutte le immagini devono essere poste al di sotto di queste e devono essere indicate come segue: Fig.x – Nome figura, Tab.x – Nome tabella. Nel testo invece devono essere citate come: (Fig.x), (Tab.x).

9. Una versione definitiva ed impaginata dell'articolo pronto per la pubblicazione sarà inviata agli Autori, di norma una sola volta, per la segnalazione di eventuali correzioni tipografiche.

10. È prevista la stampa in quadricromia degli articoli solamente a carico degli Autori, che richiederanno direttamente all'Editore un preventivo al seguente indirizzo:
Italian Journal of Agrometeorology
Patron Editor
Via Baldini, 12
40057 Quarto Inferiore, Granarolo dell'Emilia (BO)
e-mail: periodici@patroneditore.com

11. Tutti i riferimenti citati nel testo devono essere riportati nel paragrafo "References/Bibliografia" e tutti i riferimenti presenti in "References/Bibliografia" devono essere citati nel testo.

Nel testo i cognomi degli Autori devono essere citati senza il nome e senza l'iniziale (es: "Rossi, 2003" e non "Federico Rossi, 2003" e nemmeno "F. Rossi, 2003").

Se nel testo viene citato un lavoro di due Autori, utilizzare la notazione "Bianchi and Rossi, 2003" (non utilizzare "&" tra i due nomi).

Se nel testo viene citato un lavoro con più di due Autori, utilizzare la notazione "Bianchi et al., 2003".

Per le riviste, le citazioni dovranno essere stese come segue:

Bianchi R., Colombo B., Ferretti N., 2003. Titolo dell'articolo. Nome della rivista, numero della rivista: pagine.

Per i libri:

Bianchi R., Colombo B., Ferretti N., 2003. Titolo del libro. Editore, Luogo, numero di pagine pp.

Può essere citato materiale "in stampa".

Non sono accettati riferimenti a lavori presentati in occasione di convegni, seminari e simili come poster o comunicazioni orali e non pubblicati nei relativi atti.

GUIDE FOR AUTHORS

1. Manuscript should refer to original researches, not yet published except in strictly preliminary form. At least one Author must be member of the Italian Society of Agrometeorology (AIAM).

2. Manuscript should be submitted only by e-mail to: ijagrometeorology@agrometeorologia.it
Articles of original researches findings are published in Italian Journal of Agrometeorology, subsequent to critical review and approval by the Editorial Board. External referees could be engaged for particular topics.

3. Manuscript can be written in English or Italian. Three types of paper can be submitted: original paper, review, technical note.

4. First Name, Last Name, position, affiliation, mail address, telephone and fax number of all the Co-Authors are required. Corresponding Authors should be clearly identified.

5. The abstract should be no longer than 12 typed lines and should be written in both English and Italian.

6. Keywords should be written in both English and Italian.

7. Figures, tables, graphs, photos and relative captions should be written both in English and Italian and should be attached in separate files.

8. Captions should be placed below images and should be written as: Fig.x – Caption title, Tab.x – Caption title. Images should be referred to in the text as (Fig.x), (Tab.x).

9. Proof of the paper (formatted according to the Journal style) will be sent to the Corresponding Author for proof reading just one time. Corrections can be made only to typographical errors.

10. Four colour printing of the particle is available. Authors can demand an estimate of costs to the Editor:
Italian Journal of Agrometeorology
Patron Editor
Via Baldini, 12
40057 Quarto Inferiore, Granarolo dell'Emilia (BO)
e-mail: periodici@patroneditore.com

11. All the references in the text must be reported in the "References" section and vice-versa.

In the text, only the Author(s) last name must be present, without the name or the first letter of the name (e.g. "Rossi, 2003" and not "Federico Rossi, 2003" or "F. Rossi, 2003").

If two authors are present, refer to them as: "Bianchi and Rossi, 2003" in the text (do not use "&" between the surnames).

If more than two Authors are present, refer to them as: "Bianchi et al., 2003" in the text.

For journals, references must be in the following form:

Bianchi R., Colombo B., Ferretti N., 2003. Title. Journal name, number: pages.

For books:

Bianchi R., Colombo B., Ferretti N., 2003. Book title. Publisher, publishing location, pages pp.

Manuscripts "in press" can be cited.

Posters or oral presentation can not be cited if they are not published on the relative proceedings.

Climatic scenarios and their impacts on irrigated agriculture in Emilia-Romagna, Italy

Giulia Villani^{1*}, Fausto Tomei¹, Rodica Tomozeiu¹, Vittorio Marletto¹

Abstract: We produced downscaled climatic projections (based on A1B IPCC emission scenario) for six Italian study areas, in the framework of the Italian AgrosceNari research project. The projections were analyzed in term of their impact on irrigation demand for fruit and horticultural crops in the study area of Faenza, devoted to specialized fruit cropping, and located in the Romagna sub-region, northern Italy. The climate change impacts for the period 2021-2050 on crop irrigation water needs were assessed by means of the Criteria water balance model, in the two versions available, Criteria Bdp (local) and Geo (spatial) with different levels of detail. We found in general an irrigation demand increase of about +10% comparing the 2021-2050 period with the reference years 1961-1990, but no substantial differences with more recent years, i.e. 1991-2008, mainly due to a projected increase in spring precipitation compensating the projected higher summer temperature and evapotranspiration.

Keywords: climate change, irrigation, statistical downscaling, kiwifruit.

Riassunto: All'interno del progetto nazionale di ricerca AgrosceNari, sono state prodotte proiezioni di cambiamento climatico (basate sullo scenario di emissione A1B dell'IPCC) per sei aree di studio italiane. Gli impatti delle proiezioni sono stati analizzati in termini di domanda irrigua per le colture orto frutticole nell'area di studio di Faenza, area vocata alla frutticoltura specializzata e localizzata in Romagna (Nord Italia).

Gli impatti del cambiamento climatico per il periodo 2021-2050 sui fabbisogni irrigui delle colture sono stati stimati mediante il modello di bilancio idrico Criteria, nelle due versioni disponibili: Criteria Bdp (modello puntuale) e Criteria Geo (modello spazializzato) con differenti livelli di dettaglio. In generale, si è stimato un aumento della richiesta irrigua di +10% mettendo a confronto il periodo 2021-2050 con quello di riferimento 1961-1990, ma non è stata trovata una sostanziale differenza con gli anni più recenti (1991-2008), ciò è dovuto essenzialmente al previsto incremento delle precipitazioni primaverili che compensano le più alte temperature e la maggiore domanda evapotraspirativa prevista.

Parole chiave: cambiamento climatico, irrigazione, regionalizzazione statistica, kiwi.

INTRODUCTION

According to the IPCC 4th Assessment Report “most of the observed increase in global average temperatures since the mid-20th century is very likely due to the observed anthropogenic greenhouse gas (GHG) concentration” and “continued GHG emissions at or above current rates would cause further warming” i.e global temperature increase and sea level rise.

This change would have different impacts in different planet areas such as the Northern Hemisphere, tropical and temperate regions (IPCC, 2007) but also in different sectors of human activity. More specifically agriculture, being so dependent on climate, is expected to experience with greater intensity the impacts of anthropogenic climate change, so a large number of studies have been carried out on the subject, for example on the influence of climate change on vegetal biodiversity

(Thuiller, 2005), on crop yield (Parry, 2004) and on agro-meteorological variables like evapotranspiration (Harmsen, 2009) or crop water use efficiency (Wallace, 2000).

Irrigated crops produce about 40% of total agricultural output and their yields are typically twice those of rain-fed crops. In more detail, the world irrigated surface represents the 18% of total cultivated land. Moreover the agriculture is the section that mainly uses water among human activities: irrigation water withdrawals are 70% of the total (Fischer, 2007). These data show that the water is an essential resource and to know the available quantity for agriculture in the next future is strategic for a rational plan of its use.

General studies in order to evaluate climate change impacts on global water resources (Arnell, 1999) and, in more detail, on the global irrigation water demand (Döll, 2002) were carried out. Scenarios analysis in California on the projected increase of the irrigation demand and on the rising competition between irrigation and other water use were published (Purkey, 2007). Several

^{1*} Giulia Villani, PhD student, DEIAGRA, Department of Agricultural Economics and Agricultural Engineering, e-mail: giulia.villani3@unibo.it (corresponding author).

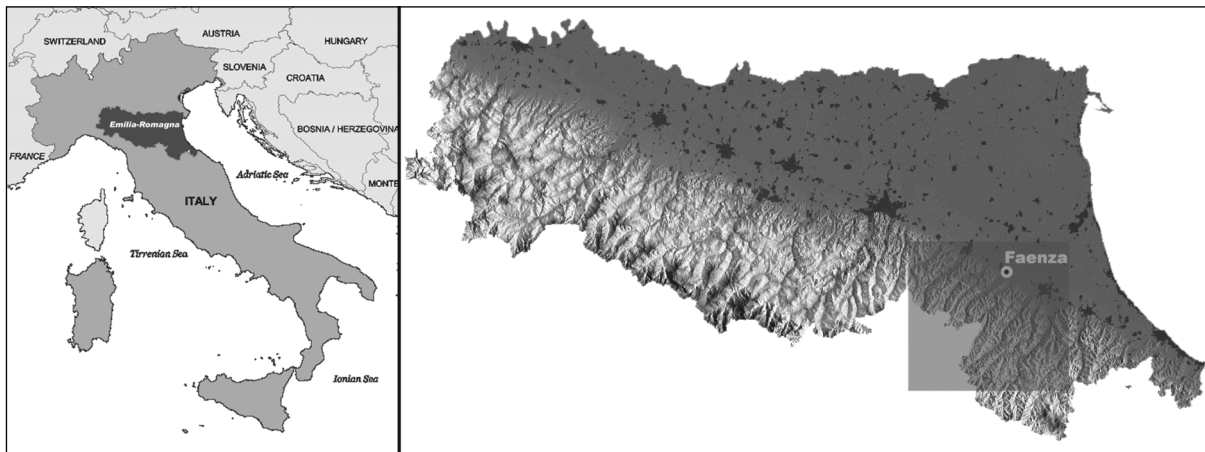


Fig. 1a - The study area.
Fig. 1a - L'area di studio.

studies and projects that evaluate the influence of climate change on irrigation at national level for countries such as Israel (Fleischer, 2007), China (Thomas, 2007), California (Schlenker, 2007) and on limited study areas (Rodríguez Díaz, 2007) were developed.

From a methodological point of view, all these studies are based on climatic projections directly derived by General Circulation Models (GCM). Scientific literature lacks studies that link climate change and irrigation, applied to local study case by means of downscaled climatic scenarios, referred to the proper scale by means of dynamic or statistical techniques.

The topic of the GCMs uncertainty is debated in the scientific community and it is discussed on the IPCC AR4 (2007); in this report it is underlined that “clouds represent a significant source of potential error in climate simulations” and that “the sign of the net cloud feedback is still a matter of uncertainty, and the various models exhibit a large spread. Further uncertainties arise from precipitation processes”.

The Coupled Global Climate Model (CGCMs) used in this work are produced in the framework of the Ensembles project, ended in December, 2009: this is a new generation of models compared to the IPCC-2007 models. One of the main aims of the Ensembles project was to quantify and reduce the uncertainty of these models improving their skill to represent physical, chemical, biological processes and feedback process.

In this study, carried out in the framework of the Agrosenari national project, the main aim is to compare current irrigation volumes in the Faenza study area, one of the five study areas of the Agrosenari project, with the likely irrigation under

climate change conditions, referred to the 2021-2050 period. For these thirty years, multi model climatic projections downscaled on the study area are available. The comparison was carried out for the main crops of the area, with a detailed analysis for the kiwifruit vine.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study area is located near Faenza (Fig. 1), a city of Romagna, a geographical subregion of the Emilia-Romagna region, in northern Italy. The analysis for this study area were focused on soil water content, irrigation methods, development of crops typical of this area. The area of Faenza is characterized by highly valued horticulture, in particular by kiwifruit orchards. Kiwifruit (*Actinidia chinensis Planch.*) is a fruit tree vine characterized

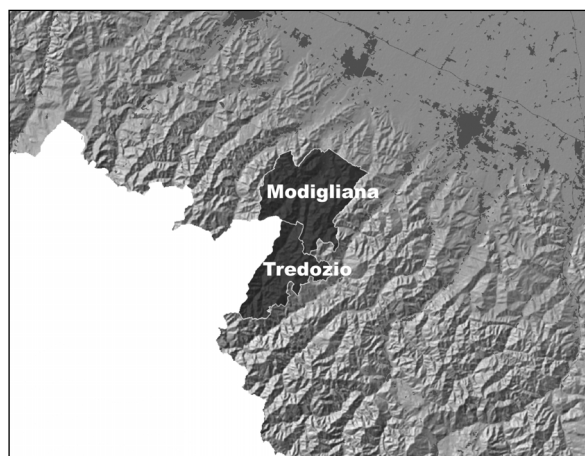


Fig. 1b - A zoom to Modigliana and Tredozio municipalities, object of the spatial analysis.
Fig. 1b - Un ingrandimento sui comuni di Modigliana e Tredozio, oggetto dell'analisi spaziale.

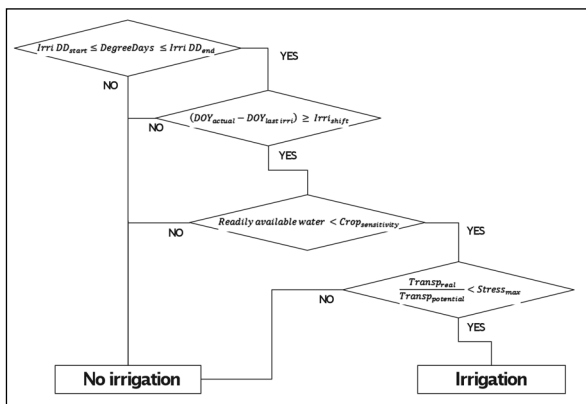


Fig. 2 - Flow chart of irrigation algorithm in Criteria (Irrigation volume= min (a, b); a = water volume needed to restore the rooted layer to field capacity; b = maximum irrigation volume).

Fig. 2 - Diagramma di flusso dell'algoritmo di irrigazione in Criteria (Volume irriguo = min (a, b); a = volume irriguo necessario a portare lo strato radicato alla capacità di campo; b = massimo volume irriguo).

by high irrigation water needs, that here is studied from the point of view of its irrigation demand.

In order to calibrate a water balance and irrigation assessment model called Criteria (see below), we used data collected from 1996 to 2008 in a farm located south of Faenza, in the Zattaglia hilly area (180 m a.s.l.).

The main crop grown in the farm is the Hayward kiwifruit variety, one of the most important and productive crop raised in Italy. The farm makes use of a drip microirrigation system controlled by tensiometers located at -30, -60 and -90 cm depth. The kiwifruit irrigation season in Romagna generally starts in May and ends in October. Precipitation and the irrigation volumes were recorded by the farm owner from April until October.

The kiwifruit orchard is grown in a clay-loam, silty clay-loam soil (35% sand, 40% silt, 25% clay) named DOG1 in the official soil map of Emilia-Romagna region (Filippi and Sbarbati, 1994).

The Criteria model

The Criteria model describes the dynamics of water in agricultural soils. The model was developed by Arpa-Simc (Marletto et al., 2007) and requires as input soil and crop parameters and daily meteorological data, namely minimum and maximum temperatures, precipitation, and, if available, water table depth.

Criteria is based on the approach of Driessen (1986) and Driessen and Konijn (1992) but was improved assuming a multilayered soil and explicitly computing approximate values of daily actual evaporation, transpiration, water flows between layers, deep

drainage, runoff and subsurface runoff. In order to compute crop evapotranspiration, the Heargraves-Samani (1985) algorithm is used, because of the large diffusion of the equation and the low number of parameters needed.

Soil water flow can be described in the model either using a mono or three-dimensional numerical solution of the Richards equation (Bittelli et al., 2010) or using an empirical infiltration model, the former being more precise, though requiring a higher computational effort with respect to the latter. Crop development and the dynamics of related processes, such as the leaf area index (Lai, $m^2 m^{-2}$) and the rooting depth (m), are simulated in Criteria by means of simple empirical equations based on degree days ($^{\circ}C$) sums.

In order to assess the crop water demand, the irrigation process is controlled by some parameters such as the irrigation season duration, the irrigation shift minimum period, the maximum volume for a single irrigation, the crop coefficients reached by the crop in the maximum development, crop sensitivity values to the water stress and, if applicable, percentage of controlled stress.

The irrigation season length is kept within fixed beginning and ending dates, but the actual irrigation period starts and stops according to a degree days sum, taking into account the weather conditions of every specific year, anticipating it in warm years and delaying it in cold ones. The model interface allows the user to choose between different irrigation methods (i.e. micro irrigation, sprinkler irrigation), to introduce time shifts and maximum volumes. Irrigation dates are computed according to the soil water content, taking into account water stress sensitivity values specific for crops and phenological phases. The value of crop sensitivity to the water stress is the readily available water percentage between the wilting point and the field capacity; below this threshold water stress would start and the model, if allowed by the user, simulates an irrigation.

By means of the controlled stress percentage, it is possible to extend the stress period up to a value physiologically tolerable by the plant. Stress percentage value is computed by means of the ratio between actual and potential transpiration.

The irrigation algorithm of Criteria can be summarized in this way (Fig. 2): the model checks if the current day of simulation is included in the irrigation season, if from the last irrigation a number of days equal to the irrigation shift is progressed and if the readily available water in the rooted zone (weighted on the basis of the root density in the

Parameter	Value
LAI max [m ² m ⁻²]	3.5
Kc max [-]	1.1
Root depth [m]	1
Degree Days Thershold [°C]	5
Irrigation Degree Days start [°D]	200
Irrigation Degree Days end [°D]	3500
Irrigation shift [days]	none
Leaf tension at wilting point [hPa]	8000
Crop sensitivity [-]	0.5
Controlled stress percentage [-]	90%
Reference daily irrigation [mm]	5

Tab. 1 - Kiwifruit parameters used in Criteria calibration.
Tab. 1 - Parametri del kiwi utilizzati per la calibrazione di Criteria.

different layers of soil) is minor than the crop sensitivity value to the water stress. If all these conditions are true, irrigation could be necessary for the plant, so, if requested, a check about the controlled stress percentage of the previous day is computed.

If all the previous conditions are true, an irrigation volume is distributed. This is computed as the minimum between the predefined irrigation volume and the water volume needed to restore the rooted zone to the field capacity. This computational choice is applied in order to avoid excessive irrigations that would be converted in run-off losses. The irrigation volume is considered

seeped only in the rooted layer, so an irrigation without losses is computed.

Criteria calibration and validation on kiwifruit in the Faenza area

Arpa-Simc carried out a simulation about kiwifruit irrigation needs for the period 1996 – 2008, by means of the water balance model Criteria. For the calibration, the model was feed by precipitation and daily temperatures from station data. These data series allowed the model calibration for the crop and irrigation parameters; for the main parameters the optimal values obtained are shown in Tab. 1.

Fig. 3 shows the comparison between the yearly cumulated irrigations estimated by the model and the actual irrigations; the series are well correlated with a determination coefficient R^2 equal to 0.86.

Fig. 4 and Fig. 5 show the same comparison between the monthly cumulated irrigations, with a high correlation ($R^2= 0.93$) and an efficiency index (EI) equal to 0.67. These results show that Criteria model is able to simulate the kiwifruit irrigation water need with a high accuracy level: the model explains the 90% of the real variability. This is true also for the data distribution, in particular for the monthly cumulated real irrigations that show a maximum value of 123.3 mm and an average of 46.1 mm, the model evaluates as maximum value of 125 mm and an average of 46.5 mm.

Operational scheme and climate change impact analysis on crop irrigation water needs

Fig. 6 shows the computational scheme developed at Arpa-Simc for climate change projections downscaling and for agronomical impact projections. This scheme was devised within the European ENSEMBLES

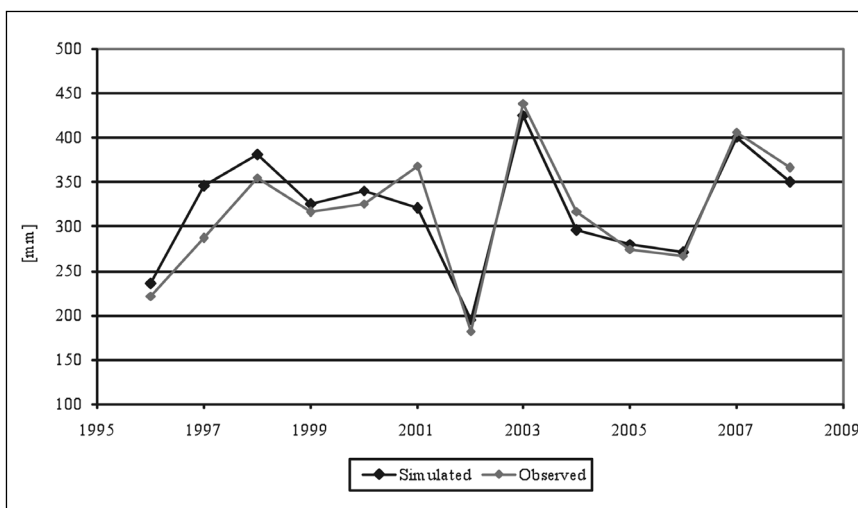


Fig. 3 - Comparison between yearly irrigation observed and simulated by Criteria ($R^2= 0.86$).
Fig. 3 - Confronto tra le irrigazioni annuali osservate e simulate da Criteria ($R^2= 0.86$).

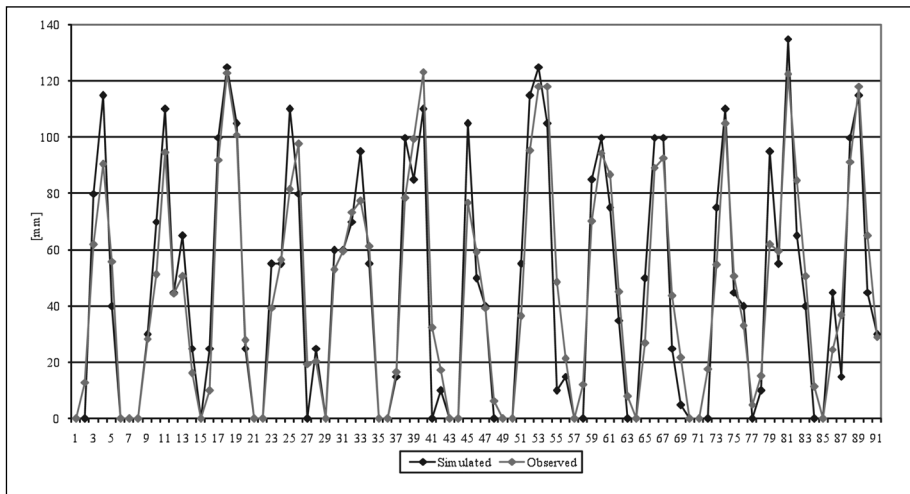


Fig. 4 - Comparison between cumulated monthly irrigation observed and simulated by Criteria ($R^2= 0.9$).
Fig. 4 - Confronto tra le irrigazioni cumulate mensili osservate e simulate da Criteria ($R^2= 0.9$).

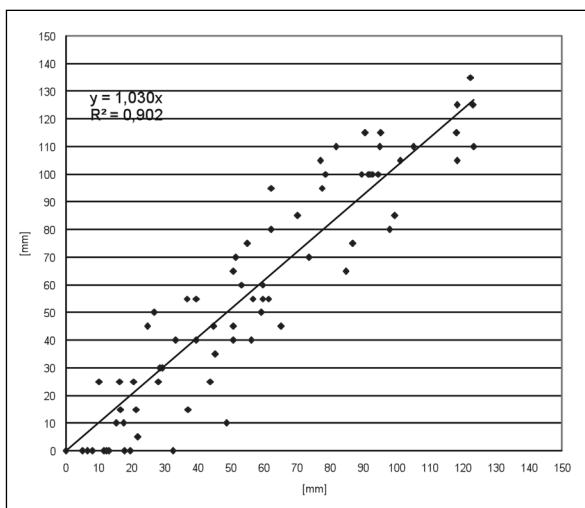


Fig. 5 - Correlation between the monthly cumulated irrigations observed and the irrigations simulated by Criteria.
Fig. 5 - Correlazione tra le irrigazioni mensili cumulate osservate e le irrigazioni simulate da Criteria.

project (Tomei et al., 2009) and it is used also in the Italian Agrosceari project (Tomozeiu et al., 2010; Villani et al., 2010).

The structure of the operational chain is the following: the soil water balance and crop development model Criteria (Marletto et al., 2007) requires as input daily meteorological data, namely temperature, precipitation and, if available, hypodermic groundwater depth. Meteorological daily data, referred to a future projection, are synthetically produced with a weather generator (WG) using as input predicted seasonal anomalies added to the local climatology. These anomalies are obtained by means of a statistical downscaling technique applied to the general circulation models simulations. The synthetic weather data produced by the WG can also be used to assess the hypodermic groundwater level using an empirical equation developed by Arpa-Simc (Tomei et al., 2010).

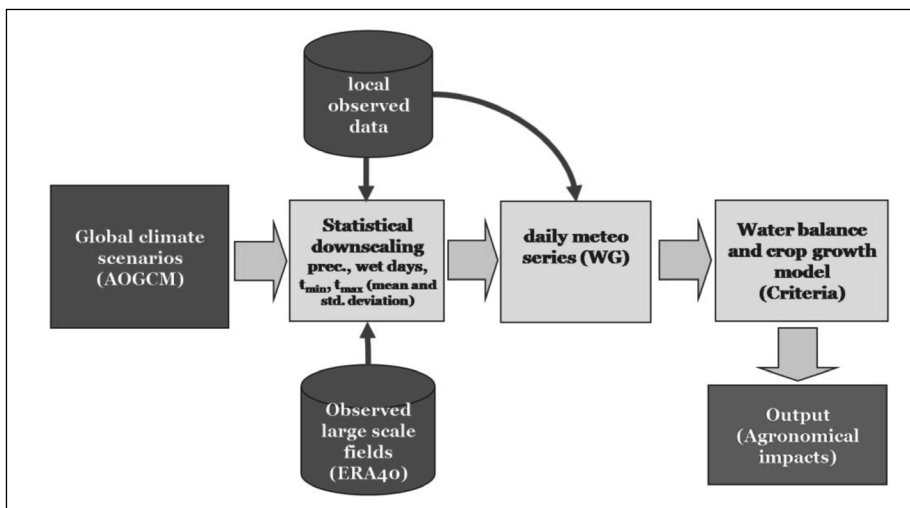


Fig. 6 - Operative scheme for agronomical forecasts.
Fig. 6 - Schema operativo per le previsioni agronomiche.

AOGCM	INSTITUTION	Atmosphere (AGCM)	Resolution1	Ocean (OGCM)/Resolution2
INGV-SINTERX-G	INGV-Italy	ECHAM4 (T106L19)	T106	OPA8.2/0.5-2°
EGMAM (run1; run2)	Freie Universitaet Berlin (Germany)	ECHAM4 (T30L39)	T30	HOPE-G/0.5-2.8°
METO-HC-HADGEM1	Met Office Hadley Centre (UK)	HadAM3 HadGAM1	2.5°x3.75°	HadGOM1/0.33-1
IPSL-CM4	Inst. Pierre Somon Laplace (France)	LMDZ-4	2.5°x3.75°	OPA8.2/0.5-2°
ECHAM5-MPI-OM	Max-Plank Institute (Germany)	ECHAM5.2.02	T63	MPI-OM /1.5°

Tab. 2 - Climatic global models used for the climate change scenarios.

Tab. 2 - Modelli climatici globali usati per gli scenari di cambiamento climatico.

By means of Criteria Geo, the geographical version of Criteria model, a further spatial analysis about the irrigation water needs in the area for the period 1961-1990 and 2021-2050 is carried out.

The distribution of the crops in the area is based on the land use map of 2008 for Modigliana and Tredozio (Fig. 1b), municipalities that are included in the 1362 CRA-CMA cell. This thematic map is derived from the PAL-Lamone project (Spisni A., 2009).

The crops in the area are classified as:

- summer herbaceous crops, simulated in Criteria as two cycle of horticultural crop from April to September;
- orchards, simulated as peaches trees;
- multiannual herbaceous crops, simulated as alfalfa;
- autumn herbaceous crops, simulated as wheat;
- vineyard;
- kiwifruit.

Climate change scenarios

In the framework of the National project Agrosenari, Arpa-Simc produced climate change scenarios of temperatures (minimum and maximum) and precipitation for years 2021-2050 from the Agricultural Research Council (CRA – CMA) dataset computed on a national grid of 30 km; one of these cells is located in the Faenza area and it is identified as cell 1362.

The emission scenario considered in this study is the A1B (a balanced emphasis on all energy sources) from the Intergovernmental Panel on Climate

Change Special Report on Emission Scenarios (IPCC SRES) (Nakićenović et al., 2000).

The climate change scenarios of temperature and precipitation at local scale for the 2021-2050 period used in this study are produced by means of the statistical downscaling (DS) technique applied to the output (predictors) from AOGCM (atmosphere-ocean coupled general circulation models) derived by ENSEMBLES project (Van der Linden, 2009). The DS technique is based on the identification of a statistical relation between the large scale field (predictors) and the local scale field (predictands). The uncertainty reduction/quantification in the DS technique has been dealt in the set-up phase of the DS model, using different predictors (single or combined), defined on different areas and different time periods (Tomozeiu et al 2007). The predictors projections (i.e. for the period 2021-2050) derived from the GCM-ENSEMBLES are applied to the selected DS scheme, in order to obtain the local scale signal.

By means of a multivariate regression, based on the Canonical Correlation (CCA) technique (Von Storch, 1995, Zorita and Von Storch, 1999) applied to the filtered predictors-predictands fields, the large scale patterns that are better correlated to the local scale patterns (CRA-CMA in this work) are identified.

The set-up of the model has been carried out by using as large scale fields the best predictors in the DS scheme deducted from the fields of temperature at 850 hPa (T850), geopotential height at 500 hPa (Z500), mean sea level pressure (MSLP), derived from ERA40 reanalysis for the 1958-2002

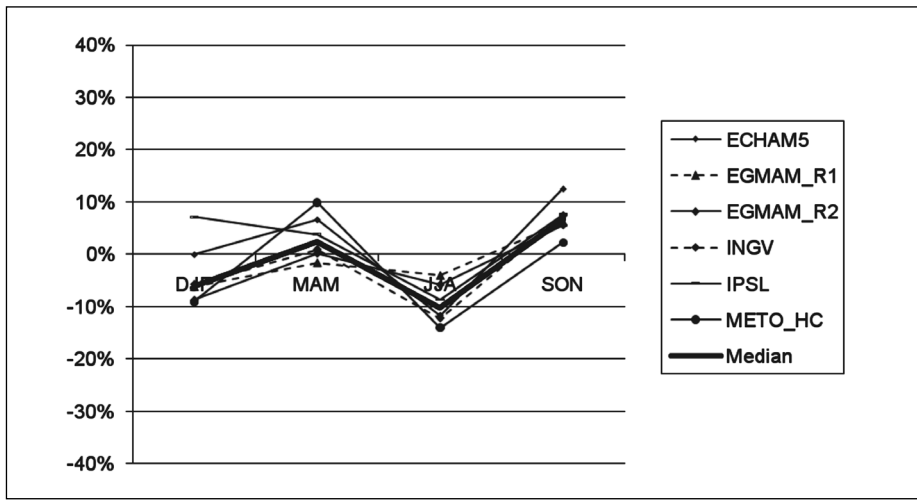


Fig. 7 - Seasonal anomalies in precipitation (%) under scenario condition in the study area of the 2021-2050 period with respect to reference period 1961-1990.
Fig. 7 - Anomalie stagionali di precipitazione (%) in scenario di cambiamento climatico nell'area di studio per il periodo 2021-2050 rispetto al trentennio di riferimento 1961-1990.

period. These fields are well represented by the global models (Anagnostopoulou et al., 2006; Johns et al. 2003, Giorgi et al., 2004; Tomozeiu et al., 2007).

The AOGCM used in the present work are provided by the following groups (Tab. 2): MPIMET (ECHAM5 model), FUB (EGMAM models with 2 runs), METO-HC (METOHC models), INGV-CMCC (SINTEX-G model) and IPSL Global Climate Modeling Group (IPSL model).

This technique allows to assess the coupled structure between large scale fields, that are more reasonably predictable by the AOGCM models, and the local scale fields (minimum and maximum temperatures, precipitations, frequency of wet days) in order to maximize the correlation between the temporal series.

These seasonal climatic projections have been used as input data for a weather generator (WG) in order to produce daily synthetic series (Tomei et al., 2009)

of precipitation and temperature related to the local climate.

WG used in this study is based on Richardson et al. (1984), modified by Campbell and Stöckle (1999). The aim is to generate daily weather data for temperature (minimum and maximum) and total precipitation from monthly climatic statistics of seven input variables: mean of maximum temperature, mean of minimum temperature, standard deviation of maximum temperature, standard deviation of minimum temperature, mean of total precipitation, fraction of wet days, difference between maximum temperatures on dry and wet days.

The difference in temperature between dry and wet days is a critical variable in order to couple temperature and precipitation, that otherwise would be uncorrelated. Days are considered wet only if the precipitation is higher than 0.2 mm, in order to remove bias due to dew deposition. For a climatic

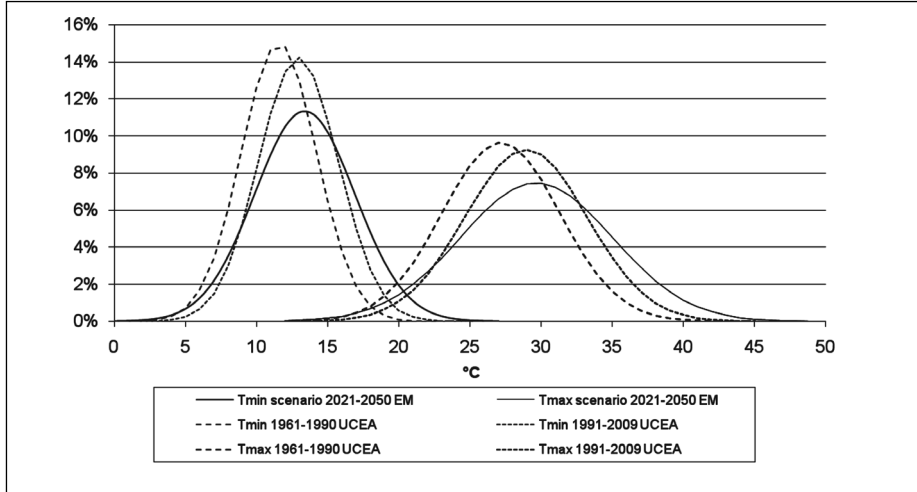


Fig. 8 - Comparison between the minimum and maximum temperatures distribution of the 2021-2050 period with respect to reference period 1961-1990, JJA season.
Fig. 8 - Confronto tra le distribuzioni delle temperature minime e massime per il periodo 2021-2050 rispetto al trentennio di riferimento 1961-1990, stagione JJA.

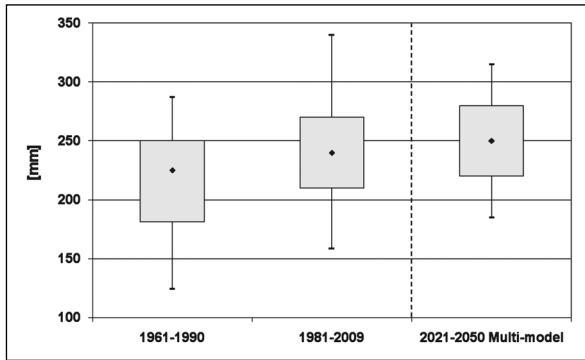


Fig. 9 - Kiwifruit water need distribution in the Faenza study area simulated by Criteria model, for the periods 1961-1990, 1981-2009 and 2021-2050 (A1B scenario). The box represents the data included between the 25th and 75th percentiles, the diamond is the median and the whiskers are the 5th and 95th percentiles.

Fig. 9 - Distribuzione del fabbisogno irriguo del kiwi nell'area di studio di Faenza simulata dal modello Criteria, per i periodi 1961-1990, 1981-2009 e 2021-2050 (scenario A1B). I box rappresentano i dati compresi tra il 25° e il 75° percentile, il rombo rappresenta la mediana e i whisker sono il 5° e 95° percentile.

statistic, input data must be averaged on a significant period (30 years at least).

For the six AOGCMs 50 WG runs are produced, it means that for this study 300 years of data are produced. It is clear that the time series doesn't have statistical relevance, each of that year is a sample equally probable representative of the A1B scenario for the 2021-2050 period.

RESULTS

Analysis of the climate change projections in the Faenza area

Fig. 7 shows the seasonal climate change projections in total precipitation for the study area of Faenza (1362 CRA-CMA cell) for the four seasons considered here (DJF, MAM, JJA, SON), as results from the statistical downscaling applied to the output of five AOGCMs (gray lines). The Ensemble mean is also represented in Fig. 7 (black line).

As could be noted, all the models show a decrease in winter and summer precipitation, for the period

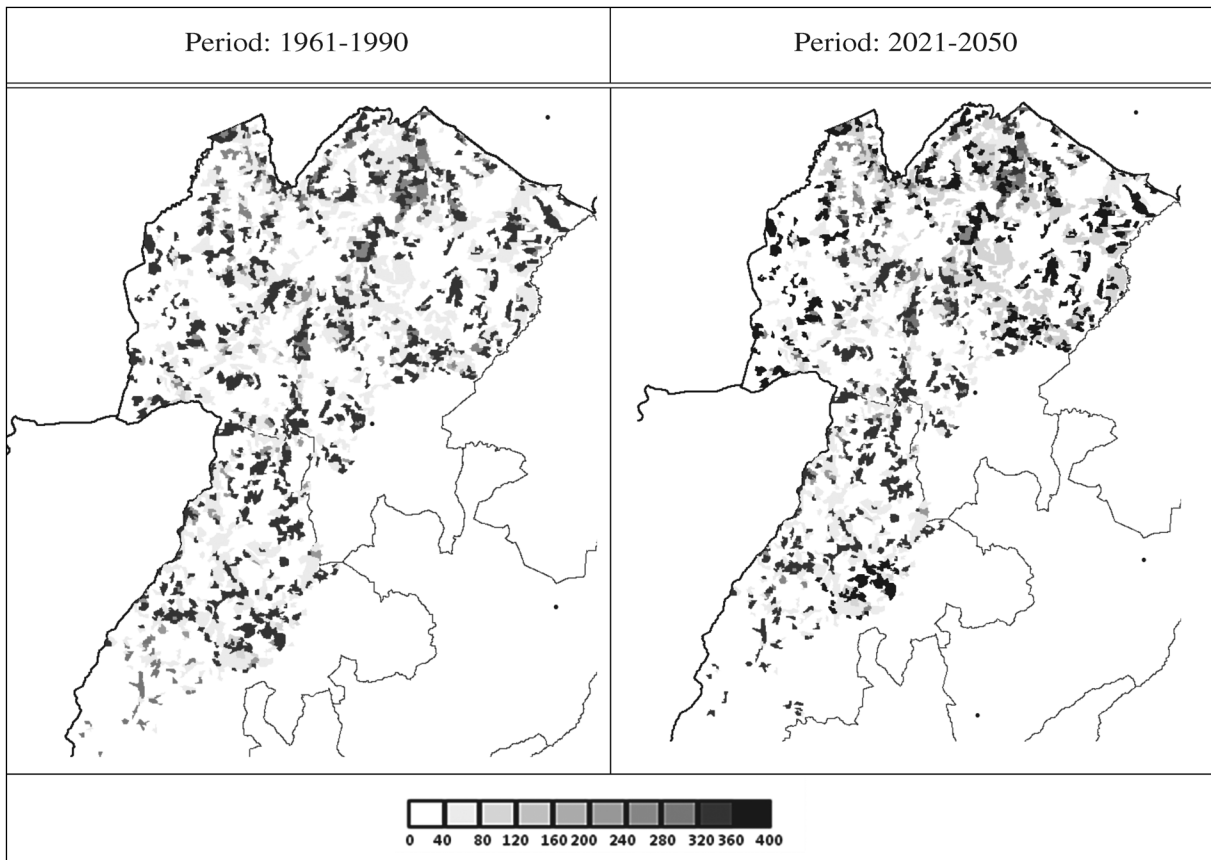


Fig. 10 - Irrigation water need simulation (mm) for the crops on the agricultural land use map of the 2008 for Modigliana and Tredozio municipalities.

Fig. 10 - Simulazione dei fabbisogni irrigui (mm) per le colture rilevate dalla mappa di uso del suolo del 2008 per i comuni di Modigliana e di Tredozio.

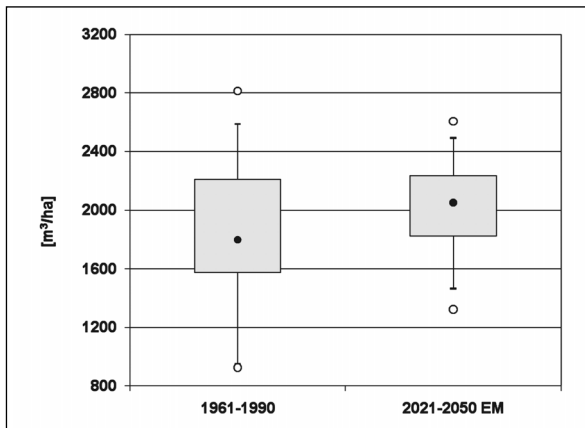


Fig. 11 - Average water need distribution comparison for 1961-1990 and 2021-2050 periods on the basis of 2008 agricultural land use map.

Fig. 11 - Confronto tra la distribuzione del fabbisogno irriguo medio dell'area per i periodi 1961-1990 e 2021-2050 sulla base della mappa di uso del suolo agricolo del 2008.

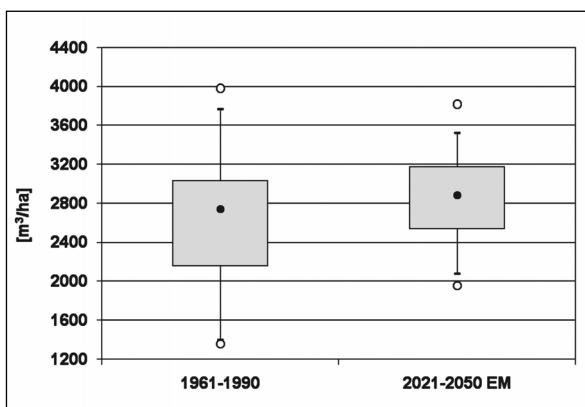


Fig. 12 - Kiwifruit water need distribution comparison for 1961-1990 and 2021-2050 periods on the basis of the 2008 agricultural land use map.

Fig. 12 - Confronto tra la distribuzione del fabbisogno irriguo del kiwi dell'area per i periodi 1961-1990 e 2021-2050 sulla base della mappa di uso del suolo agricolo del 2008.

2021-2050 with respect to 1961-1990. This decrease is around 10% in winter and similar values are detected in summer. Spring shows a slight increase, otherwise in autumn a more intense increase (about +10%) is projected.

As concerns the temperature (Fig. 8), the projections show that increases could be expected to occur under scenario conditions for all seasons, overall for JJA, in both minimum and maximum values. The magnitude of change in JJA season is 2.5°C for maximum temperature and 1.8°C for minimum temperature. The Fig. 8 shows also that CRA-CMA data referred to the last period (1991-

2009) are close to the values projected by the models.

Local analysis of kiwifruit irrigation water need in the Faenza area

Kiwifruit irrigation water needs were estimated by means of Criteria model, in the study area of Faenza for the period 1961-2009 with local data from CRA-CMA analysis and for the period 2021-2050 with climate change projections as described above (Fig. 9). CRA-CMA analysis data were divided into two periods partially overlapped: the reference climate period (1961-1990) and the last available 29-year period (1981-2009). Fig. 9 shows the irrigation water need distribution during the three periods analyzed. For the 2021-2050 period with respect to the 1961-1990 period, a general increase of more than 10% is projected with a more intense increase for the 5th percentile. The comparison between the last observed period (1981-2009) and the projections shows a slight increase of the crop water demand with the exceptions of the 95th percentiles that shows a decrease. It is important to consider the difference in the number of samples of the two distributions: the observed data are composed by a maximum of 30 samples whereas the projections are composed by 300 samples, this is the probable reason of the lower variability of the distribution under scenario condition.

Spatial analysis of the irrigation water need of the crops in the Faenza area

The results of spatial analysis on the irrigation water need for the crop in the area are presented. The maps in Fig. 10 show that for all the areas, with the exception of these covered by autumn herbaceous crops that are rain fed, in the period 2021-2050, the irrigation water need is projected to increase of about 10% with respect to 1961-1990 for each range of the classification.

This projection can be detailed by the next three graphs: Fig. 11 represents the box and whiskers distribution of irrigation water need averaged for all the crops, Fig. 12 shows the irrigation water need for the kiwifruit and Fig. 13 for the summer herbaceous crops. All the figures show the comparison between 1961-1990 and 2021-2050 periods.

For all the three cases, the trend in the values distribution is similar: in the projection period the values of minimum and 5th percentile increase of about +40% with respect to the reference period, the 25th percentile and the median increase of

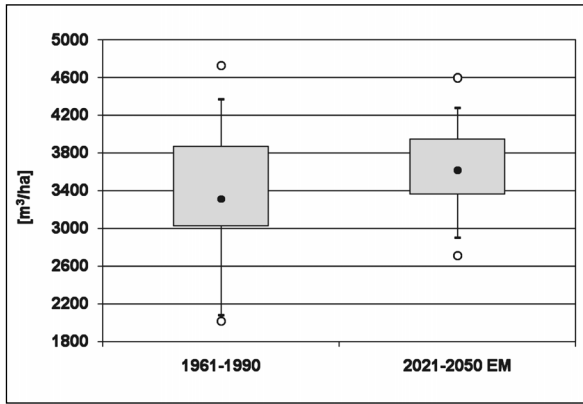


Fig. 13 - Summer horticultural crop water need distribution comparison for 1961-1990 and 2021-2050 periods on the basis of the 2008 agricultural land use map.

Fig. 13 - Confronto tra la distribuzione del fabbisogno irriguo delle colture estive erbacee dell'area per i periodi 1961-1990 e 2021-2050 sulla base della mappa di uso del suolo agricolo del 2008.

about +10%, the 75th percentile is stable and the higher values (95th percentile and the maximum value) slightly decrease or are stable.

This increase is clearly connected with the projected increment in temperatures and with the consequent increase in evapotranspiration demand. The projected slight decrease of summer precipitation in the study area causes a further increase of this phenomenon for crops with growth cycle in spring and summer such as kiwifruit and summer herbaceous crops; these two projections explain the increase in the lower percentiles and median values of the distribution but an intense change in the average irrigation volume is not expected to occur because the increment of spring precipitations in the area partially compensates the two phenomena described above.

The increment of spring precipitation produces two compensative effects: the first is decrease in the irrigation water need for the crops with spring growth cycle, the second one is and a storage effect in soils at the beginning of the summer season. Therefore a higher frequency of years with a high irrigation demand is projected instead of a general dramatic increase of irrigation demand.

CONCLUSIONS

By means of Criteria model and the climate change projections properly downscaled it is possible to study the possible future evolution of irrigation in the Faenza area (Emilia-Romagna,

Italy). The model was calibrated on observed data, then used to compute the irrigation water demand for the crops in the area for the reference period (1961-1990) and for the future (2021-2050). The work was carried out both on local (station) and geographically extended approaches.

The results show that, notwithstanding the projected increase in temperatures and the consequent increase in evapotranspiration demand, an intense change in the average irrigation volume is not expected to occur, because of the projected spring precipitation increase. Anyway in the future a higher frequency of years with higher than average irrigation demand can be expected. Further studies are needed to test the projections for other effects such as direct effect of increased CO₂ concentration, varying air humidity and so on.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out in the framework of the Italian applied research programme Agroscevari (www.agroscevari.it) financed by the Italian Ministry of Agricultural and Forest Policies (Mipaaf) and managed by the National Agricultural Research Council (CRA). The work of Giulia Villani was supported by a PhD grant from the University of Bologna.

REFERENCES

- Anagnostopoulou C., Tolika K., Flocas H.A., Maheras P., 2006. Cyclones in the Mediterranean region: present and future climate scenarios derived from General Circulation model (HadAM3P), *Advances in Geosciences*, 7: 9-14.
- Arnell N.W., 1999. Climate change and global water resources. *Global Environmental Change*, 9: S31-S49.
- Bittelli M., Tomei F., Pistocchi A., Flury M., Boll J., Brooks E.S., Antolini G., 2010. Development and testing of a physically based, three-dimensional model of surface and subsurface hydrology. *Advances in Water Resources*, 33 (1): 106-122.
- Döll P., 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climatic Change*, 54: 269-293.
- Driessen P. M., 1986. *The water balance on the soil* in Modelling of agricultural production: weather, soil and crops. Van Keulen, H. and Wolf, J. (eds.). PUDOC, Wageningen, 479 pp.
- Driessen P. M., Konijn N. T., 1992. Land-use systems analysis. Wageningen Agricultural University, 230 pp.

- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri R.K and Reisinger A. (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Filippi N., Sbarbati L., 1994. I suoli dell'Emilia-Romagna. Note illustrative (383 pp.), *Legenda* (46 pp.) e *Carta dei suoli alla scala 1: 250.000*. Regione Emilia-Romagna, Servizio Cartografico, Ufficio Pedologico, Bologna.
- Fischer G., Tubiello F.N., van Velthuisen H., Wiberg D.A., 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990–2080, *Technological Forecasting and Social Change*, 74: 1083–1107.
- Fleischer A., Lichtman I., Mendelsohn R., 2008. Climate change, irrigation, and Israeli agriculture: Will warming be harmful? *Ecological Economics*, 65: 508–515.
- Giorgi F., Bi X., Pal J.S., 2004. Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. I. Present-day climate 1961–1990. *Climate Dynamics*, 22: 733–756.
- Hargreaves G. H., Samani Z. A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1 (2): 96–99.
- Harmsen E.W., Miller N.L., Schlegel N.J., Gonzalez J.E., 2009. Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico. *Agricultural Water Management*, 96:1085–1095.
- Johns T.C., Gregory J.M., Ingram W.J., Johnson C.E., Jones A., Lowe J.A., Mitchell J.F.B., Roberts D.L., Sexton D.M.H., Stevenson D.S., Tett S.F.B., Woodage M.J., 2003. Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios. *Climate Dynamics*, 20: 583–612.
- Marletto V., Ventura F., Fontana G., Tomei F., 2007. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. *Agricultural and forest meteorology*, 147: 71–79.
- Nakicenovic N. et al. 2000. *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp.
- Parry M.L., Rosenzweig C., Iglesias A., Livermore M., Fischer G., 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14:53–67.
- Purkey D.R., Joyce B., Vicuna S., Hanemann M.W., Dale L.L., Yates D., Dracup J.A., 2008. Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change*, 87: S109–S122.
- Richardson C.W., Wright D.A., 1984. WGEN: A model for generating daily weather variables. USDA, ARS, publication ARS-8.
- Rodriguez Diaz J. A., Weatherhead E. K., Knox J. W., Camacho E., 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Reg Environ Change*, 7: 149–159.
- Schlenker W., Hanemann W.M., Fisher A.C., 2007. Water availability, degree days, and the potential impact of climate change on irrigated agriculture in California. *Climatic Change*, 81: 19–38.
- Spisni A., 2009. Analisi dei dati telerilevati per il monitoraggio del kiwi nella valli del Lamone e del Marzeno. *Arpa rivista*, 3: 32–34.
- Stöckle C.O., Campbell G.S., Nelson R., 1999. *ClimGen manual*. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA., 28 pp.
- Thomas A., 2008. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. *Global and Planetary Change*, 60: 306–326.
- Thuiller W., Lavorel S., Araujo M.B., Sykes M.T., Prentice I.C., 2005. Climate change threatens plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102: 8245–8250.
- Tomei F., Villani G., Pavan V., Pratizzoli W., Marletto V., 2009. Report on the quality of seasonal predictions of wheat yield and irrigation needs in Northern Italy. Ensembles Project, 6th Eu R&D Framework Programme, Research Theme 6, Assessments of Impacts and Climate Change, available as Deliverable 6.22 from www.ensembles-eu.org.
- Tomei F., Antolini G., Tomozeiu R., Pavan V., Villani G., Marletto V., 2010. Analysis of precipitation in Emilia-Romagna (Italy) and impacts of climate change scenarios. *Proceedings of Statistics in hydrology Working Group (STAHY-WG) International workshop*, Taormina. 23–25 May 2010.

- Tomozeiu R., Cacciamani C., Pavan V., Morgillo A., Busuioc A., 2007. Climate change scenarios for surface temperature in Emilia-Romagna (Italy) obtained using statistical downscaling models. *Theoretical and Applied Climatology*, 90, 25-47.
- Tomozeiu R., Tomei F., Villani G., Pasqui M., 2010. Climate change scenarios of temperature and precipitation over five Italian regions for the period 2021-2050 obtained by statistical downscaling models. *Proceedings of European Congress of European Meteorology Society (EMS)*, Zurich, 13-17 September 2010.
- Van der Linden P., Mitchell J.F.B., 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, Met Office Hadley Centre, UK, 160 pp.
- Villani G., Tomozeiu R., Tomei F., Marletto V., 2010. Scenari di cambiamento climatico e loro impatto sull'agricoltura irrigua romagnola. *Proceedings of National of Italian Agrometeorology Association (AIAM)*, Bari, 9-10 June 2010.
- Von Storch H., 1995. Spatial Patterns: EOFs and CCA in Analysis of Climate Variability. *Application of Statistical Techniques*, H. von Storch and A. Navarra (eds.), Springer Verlag, 227-258.
- Wallace J.S., 2000. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82: 105-119.
- Zorita E., von Storch H., 1999. The analogue method as simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *Journal of Climate*, 12: 2474-2489.

A proposal for a meteorological index of climate change impact*

Luigi Perini^{1*}, Luca Salvati², Marco Zitti¹, Sofia Bajocco¹

Abstract: *In the last decades worldwide marked signals of climatic anomalies, observed at both global and local scale, have been recognized by several scientific studies. In such a framework, the weather events, as well as the intrinsic variability of the atmospheric phenomena, seem to converge towards medium and long-term trends that differ from the average climatic reference. The aim of this paper was to analyze at Italian level the trend of selected meteorological variables (temperature and precipitation) in order to provide a composite index of climate change. In particular, we focused our study on T_{min}, T_{max} and total amount of rainfall data. Through statistical methods based on the elaboration of long-term climatic series, we derived a short-term scenario and computed the deviation of each abovementioned variable from the climatic reference period (1961-1990). By means of a Standardized Climate Change Index (SSCI), we quantifies the variability related to temperature and precipitation both singularly and jointly. Results are discussed in the light of improvement in land management and mitigation actions to face the effects of the actual climate variability.*

Keywords: *Climate change, Trend, Standardized index, Climatic variability, Italy*

Riassunto: *Le evidenze scientifiche concordano sul significato dei segnali di atipicità climatica occorsi negli ultimi decenni sia a scala globale che locale. In un tale quadro, le manifestazioni meteorologiche, così come la naturale variabilità degli stessi eventi atmosferici, sembrano convergere verso tendenze di medio-lungo periodo che prospettano scenari anche molto diversi dai parametri climatici medi di riferimento. Lo scopo di questo lavoro è quello di analizzare il trend del cambiamento climatico in Italia e quantificare la variazione delle principali variabili meteorologiche (Temperatura minima e massima, precipitazioni). A tal fine, ipotizzando uno scenario di breve periodo, determinato con metodi statistici a partire dalle serie storiche del passato, sono stati calcolati gli scostamenti di ciascuna variabile dal periodo di riferimento climatico (1961-1990). Attraverso un Indice Standardizzato di Cambiamento Climatico (SSCI), è stata infine quantificata la variazione climatica delle singole grandezze e quella complessiva. I risultati sono letti in un'ottica di gestione del territorio e di supporto alla definizione di misure di adattamento/mitigazione.*

Parole chiave: *Cambiamenti climatici, Tendenze, Indice standardizzato, Variabilità climatica, Italia*

INTRODUCTION

Scientific evidences confirm atypical climate signals at global and local scale during the past few decades. In such framework, the meteorological events and the weather variability converge on long-term trends prefiguring future scenarios very different from the current reference climatic parameters. The phenomenon is mainly characterized by a significant increase in temperature (global warming) often associated with a decrease of precipitation and/or serious alteration of the rainfall regimes. The average surface temperature has increased by 0.74°C over the last 100 years, mainly due to the contribution of the years between 1995 and 2007 which proved to be the warmest since 1850 to present. In consideration of further temperature rises, that according to IPCC should be equal to 0.2°C for each of the next two

decades, it is possible to assume that temperature will increase, between 1.8°C and 4.0°C, up to 6.4°C, at the end of the century (IPCC, 2007).

Over the past 2000 years the climate has experienced alternating phases of “cold” and “hot”, with deep effects on ecosystems and society equilibrium (Naurzbaev and Vaganov, 2000). According to other studies, the temperature trend over the last 2000 years was characterized by an uninterrupted downward trend until the middle of the twentieth century when there was a reversal remarked in the four decades between 1950 and 2000, the warmest of the whole period (Kaufman et al., 2009).

Signals of climate change have been highlighted in the early years of last century in North America (Huntington Vishera and Sargent, 1922), while the first research on the historical changes of the Italian climate is dated back decades ago and regarded the study of the scope of the main rivers (Melicchia, 1939) subsequently followed by other several studies (e.g., Piervitali et al. 1997; Schönwiese and Rapp, 1997; Ambrosetti and Barbanti, 1999; Brunetti et al., 2000; Brunetti et al., 2001; Simolo et al., 2010).

^{1*} Corresponding author: Dr. Luigi Perini, e-mail: luigi.perini@entecra.it.

Research Unit for Climatology and Meteorology applied to Agriculture (CRA-CMA), Rome - Italy.

² Centre for Soil-Plant Relationships, (CRA-RPS), Rome - Italy

* Research activity funded by 'Agrosceari' project.

Compared to the past, however, the connotation mostly distinguishing the current climate trends is represented by an unusually fast change as witnessed, in particular, by the increase in temperature.

Climate change and some of its consequences are more pronounced in marginal areas where the environmental equilibrium is fragile and the demographic pressure is high. According to official estimates provided by the United Nations High Commissioner for Refugees, the “climate refugees”, or people forced to leave their places due to floods, droughts and other environmental factors, currently amount to about 24 million, but are likely to increase up to 200 million according to estimates projected to 2050 (UNHCR, 2002).

Beyond the consequences, sometimes catastrophic, on the natural environment and/or on the socio-economic structures of the several Countries (Imeson and Emmer, 1992; Kirschbaum and Fischlin, 1996; UNEP, 2002; Baric and Gasparovic, 1992; Few et al., 2004; Myers N., 1993; Rosenzweig et al., 1993), climate change is evident throughout the Mediterranean basin and also in Italy with clear implications related to heat waves, heavy rains, floods, landslides, long drought periods, etc. (Allen et al., 2010; Allen and Diaz, 1996; Aru, 1984; Hollis et al., 1992; Kirschbaum and Fischlin, 1996; MEDALUS II, 1996; Myers, 1993; WCED, 1987).

Regarding the agricultural-forestry sector, the particularity of the Italian vulnerability mainly depends on the production addressed to specialized and typical crops, of highest quality and strongly related to the territory. In order to be economically convenient, this kind of production, requires optimal climatic conditions and massive investments in terms of economic, technological and natural resources (Rogers and Dahlman, 1993; Rosenzweig and Hillel, 1993; Rosenzweig et al., 1993; Rosenzweig and Tubiello, 1997; Reilly, 1996; FAO, 2003). In this way, beyond the risks due to bad weather events, it is very easy to exceed the thresholds of sustainability and generate an environmental pressure able to trigger land degradation processes. The immediate and future consequences of climate changes are not easy to predict because there are several scaling factors and not well defined interrelationships between each climatic variables and the climatic factors (landscape, topography, vegetation, latitude, etc.). Probably, if the current rainfall and temperature trends will continue, alterations of the hydrological cycle will be likely to occur, with destabilization of the ecosystem equilibrium and reduced availability of water for the human needs (Kaczmarek, 1996; Carter et al., 1994; Bolin et al., 1986; Baric and Gasparovic, 1992). Also, the frequencies of extreme events (floods, droughts, hurricanes, heat waves, heavy rain) will increase, while the rise of sea

levels (due in large part to the melting of glaciers) will determine the salinization of coastal aquifers (EPA, 1989; FEMA, 1991; Milliman, 1992; Milliman et al., 1992; Titus, 1998; FEMA, 2000; IPCC, 2007).

Considering the nonlinearity of the environmental dynamics phenomena, the climate change measurement can help to better understand the extent of its impact and to mitigate its effects. The aim of this study is therefore to propose a procedure for a quantitative assessment of the impact of climate change in Italy at the local level and on a national scale detail, using temperature and precipitation as variables. The results of this study will be discussed by several point of view: ecological, geographical and territorial.

MATERIALS AND METHODS

The main difficulties regarding the climate change analysis and related consequences is the prediction of future climate change scenarios (CCS). In this study in order to outline a likely future climate, we used a projection of the observed data: this assumption is based on the probability, at least for the near future, that climate change is inherently described by the variability of past. The meteorological database was built starting from daily series of temperature and precipitations data (1961-2007) of about 3000 weather stations collected by the National Agricultural Information System (SIAN). Final data derived from geostatistical procedures of spatialization (Perini et al., 2007) and are related to 544 points regularly scattered all over the Country (grid 30 x 30 Km). Starting from the evidences of climate change from the thermo-precipitation trends, we classified each year of the historical series (1961-2007) on the basis of average annual temperature and total annual precipitation.

The method refers to a statistical multivariate analysis known as cluster analysis which allows to recognize and to classify objectively the elements of a universe or a statistically significant sample (Rizzi, 1985; Arabie et al., 1996). From available information, we obtained a partition of the years in five groups climatically homogeneous in order to select the one with highest average temperatures and with lower annual precipitations (Perini et al., 2007).

Using the period 1961-1990 as climatic reference, among the five cluster identified, we considered the one characterized by the most relevant thermal deviation (+0.8°C). This selected cluster includes almost all the most recent years and has been used to represent the condition of stronger heating of the Italian territory (Tab. 1).

We repeated the cluster analysis using the total annual precipitation as discriminating variable. In this case, the aggregation of driest years showed (at national level) a

Annual mean temperature

years	distance from centroid	minimum value (°C)	maximum value (°C)	mean value (°C)	standard deviation
1961	0.28	0.5	19.0	13.8	4.2
1988	0.26	0.4	19.7	13.8	4.3
1990	0.21	0.7	19.8	14.0	4.3
1992	0.28	0.5	19.3	13.8	4.3
1994	0.43	0.8	20.1	14.3	4.3
1997	0.26	0.9	19.1	13.9	4.2
1998	0.34	0.6	19.2	13.7	4.2
1999	0.27	0.2	19.7	13.8	4.5
2000	0.21	0.8	19.6	14.1	4.3
2001	0.26	1.0	19.9	14.0	4.4
2002	0.25	0.6	19.2	13.8	4.2
2003	0.72	1.5	20.0	14.5	4.1

Tab. 1 - Descriptive statistics of the warmest years cluster.
Tab. 1 – Statistiche descrittive relative al cluster degli anni più caldi.

mean annual precipitation equal to 645 mm, about 175 mm less than the reference climatology 1961-1990. Results demonstrated a substantial consistency between the two different classifications of the years: the driest years coincide almost entirely (over than 80%) with the warmest years.

According to the results of the cluster analysis, we drew the Italian climatic scenario (CCS) for the near future (next 15-20 years) through a climatology calculated on the basis of the group of years identified by the temperature-based analysis and listed in Tab. 1. Furthermore, we calculated the absolute deviations from the climatic reference (1961-1990) values. However, for an heterogeneous and complex environment as the Italian territory, the absolute climate variation could not give an exact perception of the actual change, especially at local scale or when it is necessary to compare several zones each other. For example, a climatic decrease of 200 mm/year is a macroscopic change, but it could have a low environmental impact (or social impact) where precipitations continue to exceed the ecological (or human) needs. In other circumstances (e.g. in arid or semi arid zones), just a lack of few millimeters can lead to disastrous effects. Undoubtedly, the cumulate impacts from two or more variables (e.g., temperatures and precipitation) are more difficult to predict due to their non-linear effects.

In order to solve such difficulties, the values of changes of temperature (estimated in degree Centigrade) and precipitation (estimated in millimeters) were standardized on a scale of values between 0 and 1 according to the following algorithm:

$$SCCI = [(x - \min) / (\max - \min)]$$

where:

- SCCI = Standardized Climate Change Index;
- x = deviation value of the considered variable;

- min = minimum deviation of the considered variable;
- max = maximum deviation of the considered variable.

For each grid node we calculated the Standardized Index for temperature (SCCI_t) and the Standardized Index for precipitation (SCCI_p).

The above-mentioned indices allow to quantify the relative magnitude of climate change at local level through a relative comparison among the different Italian regions. In order to build a composite index (SCCI_{tp}), we combined the previous indices using the geometric mean method which allows to combine variables with non-linear or not proportional cumulative effects.

The calculation of the indices for each grid node and GIS tools allowed to draw thematic maps according to geographical partitions (Northwest, Northeast, South, Central and Islands) and elevation belts (inland mountain, coastal mountains, inland hills, coastal hills, plains).

RESULTS

The results confirmed the empirical evidence about the correlation between hot years and dry years. Despite some outliers, a negative and statistically significant relationship ($p < 0.001$) was found between temperature and precipitation, as clearly shown by Fig. 1.

At national level, the short-term climate change scenario (CCS) is characterized by an annual mean temperature (about 14.0°C) that is almost 1°C higher than the conventional reference climate (IPCC, 2007). This scenario fits very well the global warming phenomenon. Analysing the intrinsic meaning of these results it is possible to dare some suppositions about the complex interactions among the various climatic variables, their seasonal trends and, in general, their interrelation with environment.

Regarding minimum temperature (Tab. 2), the increase appears higher than the maximum temperature one. In

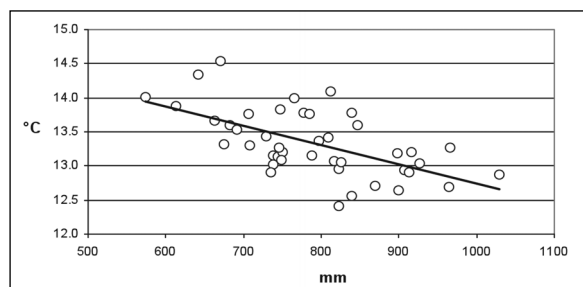


Fig. 1 - Relationship between mean annual precipitation (mm) and mean annual temperature (°C) in Italy ($T_{med} = -0.003 + 15.572$; $R^2 = 0,35$; $p < 0.001$).

Fig. 1 - Relazione fra il totale delle precipitazioni anno (mm) e la media delle temperature (°C) in Italia ($T_{med} = -0.003 + 15.572$; $R^2 = 0,35$; $p < 0.001$).

minimum temperature (°C)								
Italian zones	winter		spring		summer		autumn	
	climate	CCs	climate	CCs	climate	CCs	climate	CCs
	Northern	-2.4	-1.1	3.8	4.6	12.1	13.1	5.8
Central	2.3	3.8	6.8	7.5	15.3	16.3	9.8	10.4
Southern	5.7	7.2	9.4	9.9	18.2	19.2	13.0	13.5
Islands	7.1	8.5	9.9	10.4	18.5	19.3	14.3	14.8

Tab. 2 – Mean minimum temperature of climate reference period (1961-1990) and Climate Change scenario (CCs) by geographical area.

Tab. 2 - Temperatura minima media della climatologia di riferimento (1961-1990) e dello scenario di cambiamento climatico (CCs) per partizione geografica.

maximum temperature (°C)								
Italian zones	winter		spring		summer		autumn	
	climate	CCs	climate	CCs	climate	CCs	climate	CCs
	Northern	4.6	5.8	13.2	14.8	22.8	24.0	14.5
Central	10.0	11.6	16.8	18.0	27.1	28.4	19.3	19.7
Southern	12.7	14.5	18.2	19.2	28.3	29.7	21.4	22.1
Islands	14.1	15.8	18.7	19.9	28.7	30.1	22.5	23.3

Tab. 3 – Mean maximum temperature of climate reference period (1961-1990) and Climate Change scenario (CCs) per geographical partition.

Tab. 3 - Temperatura massima media della climatologia di riferimento (1961-1990) e dello scenario di cambiamento climatico (CCs) per partizione geografica.

particular, winter is the season with the most striking changes, especially in the Northern and Central zones of Italy where winter temperatures increase up to +1.5°C respect to the reference climate (1961-1990). Also in the remaining parts of Italy the scenario values for the minimum winter temperature show a considerable growth, but with different intensity; for instance, in the Islands (Sicily and Sardinia) the deviation from the reference climate is about +1.4°C. Also in summer, Northern and Central Italy appear quite affected by sensible increases, while for the other seasons (spring and autumn), the minimum temperature increases are generally less important.

As for the maximum temperatures (Tab. 3), the widest changes involve mainly the winter season and, secondly, summer, spring and autumn. The highest climatic deviations are mainly found in the Southern Italy (up to 1.8°C during winter), but in Northern Italy we can observe the highest values (+1.2°C).

With regard to precipitation, the results highlight a general decrease at national level. Also this feedback is consistent with the global warming trends (Tab. 4). At the national level, the mean annual loss of precipitations amounts to about 130 mm. The most involved seasons are winter and spring, that regard the typical Mediterranean climate, generally represent the most rainy period in the year. As an example, in spring time, the largest reductions of precipitation occur both in

precipitation (mm)								
Italian zones	winter		spring		summer		autumn	
	climate	CCs	climate	CCs	climate	CCs	climate	CCs
	Northern	220	179	264	184	263	204	282
Central	278	239	199	163	140	96	282	269
Southern	286	237	166	119	78	47	248	203
Islands	232	219	129	90	34	22	193	180

Tab. 4 – Mean total precipitation of climate reference period (1961-1990) and Climate Change scenario (CCs).

Tab. 4 - Precipitazioni medie totali della climatologia di riferimento (1961-1990) e dello scenario di cambiamento climatico (CCs).

Northern and Southern Italy (-30% and -27% respectively), while in summer time, although the percentage values appear higher (-38% in the Southern Italy; -35% in the Islands), the absolute leak of precipitation is quantified by few millimeters only.

As concerns the elaboration of the Standardized Climatic Change Index (SCCI), we aggregated the values of the index for altitudinal belts and Italian macro zones. As for temperature, the highest scores of climate changes, as shown by Tab. 5, were found in the Islands (Sicily and Sardinia) where SCCIt is generally higher than other zones, with values between 0.62 (mountain) and 0.65 (hill). Other important increases regard mountains in Northern Italy (0.60), hills (0.58) and lowlands (0.64) in Southern Italy, and plains (0.54) in Central Italy.

Lowlands and hills in the Northern Italy appear to be less involved by temperature changes than other regions, and are characterized by the lowest SCCIt scores (≤ 0.40).

As for precipitation, the highest values of standardized index (SCCIp) were found generally in the mountainous areas with scores between 0.37 and 0.20. Concerning the geographical zones, the results show a more considerable reduction of precipitation in Northern Italy, followed by Central Italy, Southern Italy and Islands. Overall, the SCCIp spreads around the Country and the most common values range mainly

Italian Zones	mountain			hill			plain		
	SICCt	SICCp	SICCtp	SICCt	SICCp	SICCtp	SICCt	SICCp	SICCtp
	Northern	0.60	0.37	0.47	0.40	0.34	0.37	0.35	0.26
Central	0.54	0.37	0.45	0.48	0.26	0.35	0.54	0.32	0.42
Southern	0.55	0.31	0.41	0.58	0.30	0.42	0.64	0.29	0.43
Islands	0.62	0.20	0.35	0.65	0.19	0.35	0.63	0.21	0.36

Tab. 5 - Standardized Climatic Change Index (SCCI) by geographical partition and altitudinal belts (SICCt = for temperature; SICCp = for precipitation; SICCtp = for both temperature and precipitation).

Tab. 5 - Indice Standardizzato di Cambiamento Climatico (SCCI) per ripartizione geografica e fasce altitudinali (SICCt = per temperatura; SICCp = per precipitazione; SICCtp = per temperatura e precipitazioni).

between 0.2 and 0.4. The analysis, however, show that the strongest reductions in annual precipitation (SCCIp between 0.4 and 0.8) hit around 9% of the Northern Italy territory and 5% of the Southern Italy regions. Finally, considering the cumulate index (SCCItp), it is possible to observe important climate change signals in mountain areas then in lowlands; while, by the geographical point of view, the most affected regions are, in order: Southern Italy, Central Italy, Northern Italy, Islands. In general, at national level, the most frequent values of the SCIItp range between 0.2 and 0.4. In the Southern, almost 25% of the area denotes SCIItp values between 0.4 and 0.6. The largest changes (SCIItp between 0.8 and 1.0) involve negligible fraction of the territory, also in the Northern and in the Central Italy.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The climate change as predicted by the IPCC (2007), draws different scenarios at the regional level. At medium latitudes, where the Mediterranean basin is located, the most important signals include increasing temperatures, reduced rainfall, increased intensity and frequency of extreme events (Carter et al., 1994; Corre, 1992; Hollis et al., 1992; Imeson and Emmer, 1992; IPCC, 2007; Few et al., 2004; Magrin et al., 2007; Nicholls et al., 2005; Oxfam International, 2007; Thomas et al., 2004; UNEP, 2002; UNFCCC, 2006a,b,c,d; UNFCCC, 2007a,b,c,d,e; Houghton, 1997).

Some consequences of such phenomena are mainly related to reduced water availability, increasing risk of flooding, increase in intensity and duration of drought, deterioration of soil quality, increasing frequency of fires, acceleration of the processes of erosion and loss of wetlands in coastal areas. These effects could lead to serious unbalances both for the natural ecosystems and the traditional socio-economic organizations.

In the global context of climatic changes, the results of this study confirm the general climatic trends of Italy both in terms of reduction of precipitation and increase of temperature. As regards the short term evaluations, the comparison with the reference climate scenario (period 1961-1990) showed a considerable spatial and seasonal heterogeneity that match with the complexity and variety of the Italian environments. The main evidences raised from this study are: (i) a substantial increase in winter temperature especially in Northern and Central Italy; (ii) a strong decrease in winter and spring precipitation in Northern and Southern Italy, and in summer, particularly in Southern Italy and in the Islands; (iii) the concentration of the most significant climatic changes, as concerns temperature, in both the lowlands of Southern Italy and the uplands from Northern Italy.

However, absolute climatic change values do not express the different meanings that such variations assume in different environment conditions.

In fact, for instance, same absolute values of temperature increase may have variable impacts if we consider agro-ecosystems adapted to low or high temperatures. The mentioned increase of 1.5°C in northern Italy, where mean winter minimum temperature corresponds to -2.4°C, strongly alters the equilibrium of natural and semi-natural local biocenosis; the same increase in southern Italy, where mean winter minimum temperature corresponds to 5.7°C, will have a weaker impact on local well-adapted agro-ecosystems.

To overcome such limits, the proposed methodology relativizes the absolute climatic change values (both for temperature and precipitations), producing an index able to provide site-specific measures and suitable for regional comparisons.

Furthermore, the use of a normalized index, independent from the different variables units measure, allows to cumulate the effects of more than one climatic variable, synthesizing the climate change impacts.

The climatic shift toward warmer and drier conditions may have substantial consequences for the natural environment, human life conditions and economic activities. For instance, through a natural resilience, ecosystems may react to changing conditions and find new equilibrium that, in extreme, may affect the species distribution and, for example, modify the areal distribution of species and/or introduce alien species. When ecosystems are forced to be driven by human aims, such as in agriculture, man itself has the responsibility to find solutions for adaptation in order to preserve natural resources (water, soil, biodiversity, etc.) and to reconcile economic and production needs. In agriculture, higher temperatures than in the past can promote biological processes of growth and the development of crop producing good yields. This represents a positive aspect of climate change, also coupled with lower incidence of cold temperatures and frost. Regarding these events, especially in spring time, the probability of frost occurrences has almost halved in 50 years (Ranuzzi and Perini, 2002).

Higher temperatures, due to a most favourable thermal regime, could determine an early start and a quick conclusion of the growing crop cycles. However, this could represent a serious hazard for the potential risk of spring frosts, that, though less frequent than in the past, may affect the vegetation during the most vulnerable phenological stages (e.g., flowering and early vegetative) with consequences on the final crop yields (Perini et al., 2007). These risks are particularly real in the Northern Italy where agriculture is an activity derived by a long

adaptation to past environmental conditions, which are significantly different from those envisaged for the near future in this study. Regarding precipitation, the reduction in winter-spring rains particularly affects the recharge of water resources leading to a strict limitation for the next growing seasons. In addition, the non-linear combination of reduced rainfall and increasing temperatures emphasizes the individual effects of each variable, with particularly serious consequences in Southern Italy where the exasperation of the normal hot-dry climatic conditions, especially in summer, promotes degradation and soil erosion, ignition and propagation of fires, and lack of water resources both for the vegetation and human utilisation. Furthermore, it is important to consider that the temperature and precipitation changes may modify the environmental conditions necessary for some typical Italian productions, with all the socio-economic consequences related to such modifications.

In conclusion, the quantification and standardization of the anomalies resulting from climate change provide a better understanding of its consequences, allowing to assess their impacts and to compare the different territorial situations at regional and local scale. In addition, a more analytical knowledge of climatic change, may be useful in planning adaptation/mitigation measures, especially at the local scale, in order to preserve both natural resources and economic priorities. It is therefore important to focus attention and efforts on the most critical consequences for Italy, which could increase the territorial vulnerability in terms of water resources, hydro-geological risk, land degradation processes and biodiversity loss.

REFERENCES

- Allen C.D., Macalady A.K., Chenchoumi H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kizberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259 (4): 660-684.
- Allen C., Diaz B., 1996. Rangelands in a changing climate: impacts, adaptations, and mitigation. In: Watson, R.T., and others (eds). *Climate Change 1995: Adaptations and Mitigation of Climate Change, Scientific-Technical Analyses of Impacts*. Report of IPCC Working Group II, Cambridge, Cambridge University Press: 130-158.
- Ambrosetti W., Barbanti L., 1999. Deep water warming in lakes: an indicator of climate change. *Journal of Limnology*, 58 (1):1-9.
- Arabie P., Hubert L., Soete G.D., eds., 1996. *Clustering and Classification*. World Scientific, Singapore.
- Aru A., 1984. Aspects of desertification in Sardinia - Itlay. In: *Desertification in Europe. Proceedings of the Information Symposium in the EEC Programme on Climatology*, Mytilene, Greece. Cited in: Imeson and Emmer, 1992.
- Baric A., Gasparovic F., 1992. Implications of climate change on the socio-economic activities in the Mediterranean coastal zones. In: Jeftic, L., Milliman, J. D. and Sestini, G. (eds). *Climatic Change and the Mediterranean*, London: Edward Arnold: 129-174.
- Bolin B., Doos B.R., Jager J., Warrick R.A., 1986. *The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystems*. SCOPE 29. Chichester: Wiley and Sons.
- Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., 2000. Variations of Temperature and Precipitation in Italy from 1866 to 1995. *Theoretical and Applied Climatology*, 65 (3-4): 165-174.
- Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., 2001. Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in northeastern Italy. *International Journal of Climatology*, 21 (7): 861-871.
- Carter T.R., Pary M.L., Harasawa H., and Nishioka S., 1994. IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations. IPCC Working Group II. Available from: Department of Geography, University College, London.
- Corre J-J., 1992. Implications des changements climatiques etude de cas: Le Golfe du Lion (France). In: Jeftic, L., Milliman, J. D. and Sestini, G. (eds). *Climatic Change and the Mediterranean*, London: Edward Arnold: 328-427.
- Di Giuseppe E., Vento D., Epifani C., Esposito S., 2005. Analysis of dry and wet spells from 1870 to 2000 in four Italian sites. *Geophysical Research Abstracts*, Vol.7, 07712, 2005; European Geosciences Union, Vienna 24/29 Aprile 2005.
- EPA, 1989. *The Potential Effects of Global Climate Change on the United States*. Report to Congress. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. EPA 230-05-89-052.
- FAO, 2003. *World agriculture: towards 2015/2030 – An FAO Perspective*, Bruinsma (ed.). FAO, Rome and Earthscan. London.
- FEMA, 2000. *Evaluation of Erosion Hazards*. The H. John Heinz III Center for Science, Economics and the Environment <<http://www.heinzctr.org/publications/>>
- FEMA, 1991. *Projected Impact of Relative Sea Level Rise on the National Flood Insurance Program (PDF)* October 1991.
- Few R., Ahern M., Matthies F., Kovats S., 2004. *Floods, health and climate change: a strategic review*.

- Working Paper No. 63. Tyndall Centre for Climate Change Research.
- Giavante S., Di Giuseppe E., Esposito S., 2009. Flat steps models for the analysis of temperature and precipitation of Italian time series from 1961 to 2007. *Statistical Methods for the analysis of large data-sets - Book of short papers*, Università G. D'Annunzio Chieti-Pescara 23-25 settembre 2009. Società Italiana di Statistica, Padova: Cleup.
- Hollis G. E., 1992. Implications of climatic changes in the Mediterranean Basin: Garaet el Ichkeul and Lac de Bizerte, Tunisia. In: Jeftic, L., Milliman, J. D. and Sestini, G. (eds). *Climatic Change and the Mediterranean*, London: Edward Arnold: 602-679.
- Houghton J., 1997. *Global Warming: the Complete Briefing*. Cambridge University Press, 251 pp.
- Huntington E., Sargent Visher S., 1922. *Climatic changes - their nature and causes*. New Haven Yale University Press.
- Imeson A. C., Emmer I. M., 1992. Implications of climate change on land degradation in the Mediterranean. In: Jeftic L., Milliman J. D., Sestini G. (eds). *Climatic Change and the Mediterranean*, London: Edward Arnold: 95-128.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Parry, Martin L., Canziani, Osvaldo F., Palutikof, Jean P., van der Linden, Paul J., and Hanson, Clair E. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1000 pp.
- Kaczmarek Z., 1996. Water resources management. In: Watson R. T. et al. (eds). *Climate Change 1995: Adaptations and Mitigation of Climate Change, Scientific-Technical Analyses of Impacts. Report of IPCC Working Group II*. Cambridge, Cambridge University Press: 469-486.
- Kaufman D.S., Schneider D.P., McKay N. P., Ammann C.M., Bradley R.S., Briffa K.R., Miller G. H., Otto-Bliesner B.L., Overpeck J.T., Vinther Bo M., 2009. Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling. *Science*, 325: 1236-1239.
- Kirschbaum M., Fischlin A., 1996. Climate change impacts on forests. In: Houghton, J. T. et al., (eds). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Report of IPCC Working Group I*. Cambridge, Cambridge University Press: 95-130.
- Le Roy Ladurie E., 2004. *Histoire humaine et comparée du climat. Canicules et glaciers*, Fayard, Paris.
- Magrin G., Gay García C., Cruz Choque D., Giménez J. C., Moreno A. R., Nagy G. J., Nobre C., Villamizar A., 2007. Latin America. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., van der Linden P. J. and Hanson C. E. (eds). Cambridge University Press. Cambridge, UK.: 581-615.
- MEDALUS II, 1996. *Mediterranean Desertification and Land Use. Executive Summary Phase II*. Commission of European Communities DG XII.
- Melicchia A., 1939. *Variazioni climatiche nella Pianura padana e loro rapporto col regime del Po*. Consiglio Nazionale delle Ricerche - Comitato Nazionale per la Geografia. Vol II Ricerche sulle variazioni storiche del clima italiano. Nicola Zanichelli Editore, Bologna.
- Milliman J. D., 1992. Sea-level response to climate change and tectonics in the Mediterranean Sea. In: Jeftic, L., Milliman, J. D. and Sestini, G. (eds). *Climatic Change and the Mediterranean*. London: Edward Arnold: 45-57.
- Milliman J. D., Jeftic L., Sestini G., 1992. The Mediterranean Sea and climate change - an overview. In: Jeftic L., Milliman J. D., Sestini G. (eds). *Climatic Change and the Mediterranean*. Edward: London Arnold: 1-14.
- Myers N., 1993. Environmental refugees in a globally warmed world. *BioScience*, 43 (11): 752-761.
- Naurzbaev M.M., Vaganov E.A., 2000. Variation of early summer and annual temperature in east Taymir and Putoran (Siberia) over the last two millennia inferred from tree rings. *Journal of Geophysical Research* 105: 7317-7326.
- Nicholls R. J., 2004. Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*. 14: 69-86.
- Oxfam International, 2007. *Adapting to Climate Change: What's Needed in Poor Countries, and Who Should Pay*. Oxfam Briefing Paper 104. Oxfam International Secretariat. Oxford, UK., 47 pp.
- Perini L., Salvati L., Ceccarelli T., Motisi A., Marra F.P., Caruso T., 2007. *Atlante agroclimatico - Scenari di cambiamento climatico*. UCEA, Roma. Collana Climagri n. 52 (Atlante + CD). ISBN 88-901472-8-8, 72 pp.
- Perini L., Ranuzzi M., 2002. Analisi delle temperature e delle precipitazioni piovose in Italia negli ultimi decenni. *Atti del Convegno "Clima, Precipitazioni, agricoltura" nell'ambito della giornata mondiale dell'alimentazione*, Roma 22 novembre 2002: 15-25.
- Piervitali E., Colacino M., Conte M., 1997. Signals of climatic change in the Central-Western.

- Mediterranean basin. *Theor. Appl. Climatol.*, 58, 211-219.
- Reilly J., 1996. Agriculture in a changing climate. In: Watson, R. T., and others (eds). *Climate Change 1995: Adaptations and Mitigation of Climate Change, Scientific-Technical Analyses of Impacts*. Report of IPCC Working Group II. Cambridge, Cambridge University Press 429-167.
- Rizzi A., 1985. *Analisi dei dati: applicazioni dell'informatica alla statistica*. La Nuova Italia Scientifica, Roma.
- Rogers H. H., Dahlman R. C., 1993. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment. *Vegetatio*, 104/5: 117-131.
- Rosenzweig C., Parry M. L., Fischer G., and Frohberg K., 1993. *Climate Change and World Food Supply*. Research Report No. 3. Oxford: Environmental Change Unit.
- Rosenzweig C., et al., 1993. *Climate Change and World Food Supply*. Research Report No. 3. Oxford: Environmental Change Unit.
- Rosenzweig C., Tubiello F. N., 1997. Impacts of global climate change on Mediterranean agriculture: current methodologies and future directions. An introductory essay. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1 (3): 219-232.
- Scholze M., Knorr W., Arnell N., Prentice C., 2005. A climate change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 103(35): 13116-13120.
- Schönwiese C. D., Rapp J., 1997. *Climate Trend Atlas of Europe based on observations 1891-1990*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 228 pp.
- Simolo C., Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., Speranza A., 2010. Understanding climate change-induced variations in daily temperature distributions over Italy. *Journal of Geophysical Research - Atmosphere*, 115.
- Thomas C. D., Cameron A., Green R. E., Bakkenes M., Beaumont L. J., Collingham Y. C., Erasmus B. F. N., Siqueira de M. F., Grainger A., Hannah L., Hughes L., Huntley B., Jaarsveld Van A. S., Midgley G. F., Miles L., Ortega-Huerta M. A., Peterson A. T., Phillips O. L., Williams S. E., 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*. 427 (8): 145-148.
- Titus, J., 1998. *Rising Seas, Coastal Erosion, and the Takings Clause: How to Save Wetlands and Beaches Without Hurting Property Owners (PDF)* (121 pp, 2.0MB) *Maryland Law Review*, vol. 57, no. 4: 1279-1399.
- UNEP, 2002. *Africa Environment Outlook: Past, Present and Future Perspectives*. United Nations Environment Programme. <<http://www.grida.no/aeo/>>
- UNHCR, 2004. *Statistical yearbook 2002*. <<http://www.unhcr.org/4a07e87d6.html>>
- UNFCCC, 2007a. *Vulnerability and adaptation to climate change in small island developing states – Background paper for the expert meeting on adaptation for small island developing States*. UNFCCC Secretariat. Bonn, Germany. <http://unfccc.int/files/adaptation/adverse_effects_and_response_measures_art_48/application/pdf/200702_sids_adaptation_bg.pdf>
- UNFCCC, 2007b. *Background paper – Impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Asia*. UNFCCC Secretariat. Bonn, Germany. <http://unfccc.int/files/adaptation/methodologies_for_vulnerability_and_adaptation/application/pdf/unfccc_asian_workshop_background_paper.pdf>
- UNFCCC, 2007c. *Report on the African Regional Workshop on Adaptation*. FCCC/SBI/2007/2. UN Office at Geneva, Switzerland, 15 pp. <<http://unfccc.int/resource/docs/2007/sbi/eng/02.pdf>>
- UNFCCC, 2007d. *Report on the expert meeting on adaptation for small island developing States*. FCCC/SBI/2007/11. UN Office at Geneva, Switzerland, 17 pp. <<http://unfccc.int/resource/docs/2007/sbi/eng/11.pdf>>
- UNFCCC, 2007e. *Report on the Asian Regional Workshop on Adaptation*. FCCC/SBI/2007/13. UN Office at Geneva, Switzerland, 16 pp. <<http://unfccc.int/resource/docs/2007/sbi/eng/13.pdf>>
- UNFCCC, 2006a. *United Nations Framework Convention on Climate Change: Handbook*. UNFCCC Secretariat. Bonn, Germany. <<http://unfccc.int/resource/docs/publications/handbook.pdf>>
- UNFCCC, 2006b. *Background paper – Impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Latin America*. UNFCCC secretariat. Bonn, Germany. <http://unfccc.int/files/adaptation/adverse_effects_and_response_measures_art_48/application/pdf/200609_background_latin_american_wkshp.pdf>
- UNFCCC, 2006c. *Background paper on Impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Africa*. UNFCCC Secretariat. Bonn, Germany. <http://unfccc.int/files/adaptation/adverse_effects_and_response_measures_art_48/application/pdf/200609_background_african_wkshp.pdf>
- UNFCCC, 2006d. *Report on the Latin American Regional Workshop on Adaptation*. FCCC/SBI/2006/19. UN Office at Geneva. Switzerland, 10 pp. <<http://unfccc.int/resource/docs/2006/sbi/eng/19.pdf>>
- WCED, 1987. *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.

Correlazione tra la dimensione del footprint e le variabili esogene misurate da stazioni eddy covariance in Pianura Padana, Italia

Daniele Masseroni^{1*}, Giovanni Ravazzani,¹ Chiara Corbari¹, Marco Mancini¹

Abstract: *This article aims to compare the footprint size, estimated by a hybrid model, with the main exogenous variables measured by eddy covariance station. The empirical equations that have been obtained in this article comes from the analysis of the data measured by Livraga (LO) station, and then validated using the data by Landriano (PV) station. The eddy stations are located in a maize field in Po Valley. Furthermore, we want to define some universal relations between the footprint size and these variables and, if necessary, to use the dimensionless variables. The hybrid model is based on a combination of Lagrangian stochastic models and dimensional analysis. The advantage that this study can bring is to have an estimation about the dimension of the representative area that affects the measure of detectors, starting with the knowledge of simple parameters that can be measured easily. The practical purpose is to give, during the time of the project, the correct position of the eddy covariance station in the field, without using expensive instrumentations such as sonic anemometer and gas analyzer. Although, the results of direct comparisons between the footprint and exogenous variables are not very satisfactory, while the comparison between exogenous variables and stability parameter of the atmosphere is particularly interesting. From this comparison we obtained some empirical relations that can be applied to different sites.*

Keywords: footprint, exogenous variables, eddy covariance.

Riassunto: *Questo articolo si propone di confrontare la dimensione del footprint, stimata mediante un modello ibrido, con le principali variabili esogene misurate da stazione eddy covariance. Per questo studio si sono utilizzati i dati sperimentali della stazione eddy di Livraga (LO) e i risultati sono stati poi validati con i dati della stazione di Landriano (PV). Entrambe le stazioni sono collocate in campi coltivati a mais in Pianura Padana. Si vuole, inoltre, tentare di definire alcune relazioni universali tra la dimensione del footprint e queste variabili ricorrendo, se necessario, all'adimensionalizzazione delle grandezze in gioco. Il modello ibrido è basato sulla combinazione di modelli stocastici Lagrangiani e analisi dimensionale. Il vantaggio che può condurre questo studio è quello di poter fornire una stima della dimensione dell'area di influenza di sensori rilevatori di flussi evapotraspirativi a partire dalla conoscenza di semplici parametri facilmente misurabili, con l'obiettivo pratico di poter valutare in fase di progetto il corretto posizionamento della strumentazione eddy covariance senza l'ausilio di strumentazione costosa come l'anemometro sonico o il gas analyzer. Sebbene i risultati dei confronti diretti tra il footprint e le variabili esogene siano poco soddisfacenti, sono di particolare interesse i confronti di queste ultime con il parametro di stabilità atmosferica, fornendo delle relazioni empiriche applicabili anche a siti differenti da quello di studio.*

Parole chiave: footprint, variabili esogene, eddy covariance.

INTRODUZIONE

Si definisce footprint la dimensione dell'area di influenza dei sensori rilevatori di flussi evapotraspirativi. Anche se in realtà si parla di area rappresentativa, i modelli più semplici rimandano ad una dimensione caratteristica di quest'area che è rappresentata da una sorta di raggio medio. Il footprint è quindi dimensionalmente espresso in metri e si estende lungo la direzione preferenziale di spirale del vento.

La corretta misura del footprint è di fondamentale importanza per il corretto posizionamento delle stazioni micrometeorologiche che utilizzano la tecnica eddy covariance (Lee et. al., 2004) per la misura

dei flussi evapotraspirativi. Esistono differenti modelli che permettono di stimare la dimensione del footprint. I più semplici sono quelli Euleriani (Gash, 1985; Dyer, 1962; Van Ulden, 1978) che si basano sulla teoria della diffusione (Sutton, 1947). Il problema della chiusura dell'equazione di bilancio di massa impone necessariamente la parametrizzazione del coefficiente di diffusione turbolenta, difficile da determinare sperimentalmente. Inoltre la semplicità di alcuni modelli è legata alla loro limitata applicabilità alle differenti condizioni di stabilità atmosferica. Per esempio il modello di Gash (1985) si basa su una soluzione approssimata dell'equazione della diffusione valida per profilo di velocità costante e solamente in condizioni neutre che si verificano poco frequentemente e prevalentemente durante l'alba e

* Corresponding author e-mail: daniele.masseroni@mail.polimi.it

¹ Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture viarie, e Rilevamento del Politecnico di Milano.

il tramonto come mostrato in Fig. 1. Più complessi sono, invece, i modelli Lagrangiani mono, bi e tridimensionali (Hsieh et al., 1997; Rotach et al., 1996; Kljun, 2002) che possono essere applicati sia in condizioni stabili che in condizioni convettive dell'atmosfera. I risultati prodotti da questi modelli sono più attendibili rispetto a quelli generati dai modelli Euleriani in quanto tengono in considerazione non solo parametri medi ma anche quelli turbolenti. Questi ultimi vengono modellati attraverso funzioni *random* (per esempio Gaussiane) di caratteristiche differenti in funzione delle diverse condizioni di stabilità atmosferica nelle quali si vuole modellare la propagazione delle particelle. La dimensione del footprint è strettamente legata alle condizioni di turbolenza atmosferica che si verificano all'interno dell'atmospheric boundary layer (ABL) (Foken, 2008). Mentre i modelli Euleriani propongono una descrizione prevalentemente deterministica della turbolenza usando relazioni di similarità per i termini di covarianza, i modelli Lagrangiani si sforzano di attenersi maggiormente alla realtà del fenomeno utilizzando equazioni stocastiche per lo sviluppo dei modelli. Una trattazione esaustiva sulle diverse tipologie di modelli maggiormente utilizzati per lo studio della dispersione delle sostanze in atmosfera e la loro applicazione pratica si può trovare in Sozzi (2002). Un buon compromesso tra la semplicità dei modelli Euleriani e l'ingente onere computazionale dei modelli Lagrangiani è dato dai modelli ibridi (Hsieh, 1999). Il modello Hsieh (1999), che per semplicità chiamerò modello H, è dato da una combinazione di modelli stocastici Lagrangiani e analisi dimensionale. La versatilità di tale modello risiede nella possibilità di poterlo applicare in condizioni neutre, stabili ed instabili dell'atmosfera (Tab. 1).

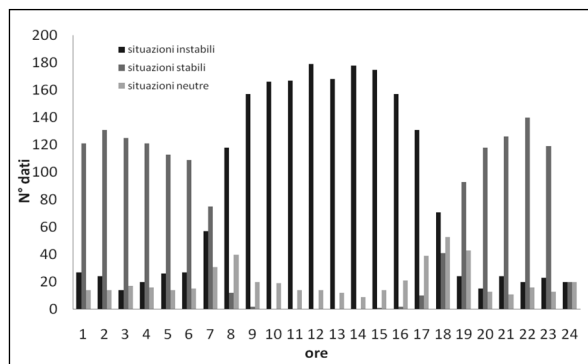


Fig. 1 - Suddivisione dei dati misurati dalla stazione eddy nelle differenti classi di stabilità atmosferica e loro numerosità in funzione delle classi orarie.

Fig. 1 - Data measured by eddy station and their subdivision in the different classes of atmospheric stability during hour of day.

Condizioni dell'atmosfera	N° dati	[%] sul totale
Instabili [$z_u/L < -0.04$]	1988	49.0
Stabili [$z_u/L > 0.04$]	1579	38.9
Neutre [$-0.04 < z_u/L < 0.04$]	490	12.1

Tab. 1 - Percentuale di dati in condizioni stabili, instabili e neutre dell'atmosfera misurati dalla stazione di Livraga nel periodo tra il 25/05/2010 e il 28/10/2010.

Tab. 1 - Number of data in stable, instable and neutral condition of atmosphere measured by Livraga eddy covariance station from 25/05/2010 to 28/10/2010.

Come viene mostrato nell'articolo di Hsieh (1999), il modello H, confrontato sia con i risultati ottenuti dal modello Euleriano di Gash (1985) sia con quelli del modello Lagrangiano di Thomson (1987) e infine con alcuni dati sperimentali, fornisce una corretta stima del footprint.

Non si trovano per il momento in letteratura dei confronti diretti tra il footprint e variabili esogene quali per esempio la temperatura superficiale del suolo, l'umidità superficiale del suolo, la radiazione ad onde lunghe uscente del terreno etc. L'obiettivo di questo lavoro è quello di comparare le dimensioni del footprint, ricavate dal modello H, con le variabili esogene sopra elencate ed eventualmente trovare delle relazioni generali che possano, anche in maniera approssimativa, dare una stima della dimensione del footprint. Questo è estremamente importante nella fase di progetto di una stazione micrometeorologica eddy covariance. Infatti se l'obiettivo è la misura dei flussi evapotraspirativi di una coltivazione, è necessario che la stazione sia posizionata all'interno del campo in modo tale che il footprint non si estenda al di là dei confini del campo stesso. Se così fosse si avrebbe che la misura dei flussi non sarebbe più caratteristica della sola coltivazione in esame ma anche di ciò che è coltivato nei campi adiacenti producendo così un errore sul dato misurato. Fornire anche solo approssimativamente la dimensione del footprint relativa ad un dato sito coltivato risulta essere estremamente importante per capire se la dimensione del campo è idonea oppure no al posizionamento della stazione eddy covariance.

IL MODELLO H

Il modello H è un modello monodimensionale che esprime la dimensione del footprint lungo la sola coordinata x che è quella relativa alla direzione preferenziale di spirale del vento. La stima del flusso scalare è fornita attraverso l'Eq. 1.

$$\frac{F(x; z_m)}{S_0} = e^{-\frac{1}{k^2 x} D z_m^p |L|^{(1-p)}} \quad \text{Eq. 1}$$

Il footprint è dato dall'Eq. 2.

$$f(x, z_m) = \frac{1}{k^2 x^2} \cdot D \cdot z_u^P \cdot |L|^{1-P} \cdot e^{\left(\frac{1}{k^2 x} D z_u^P |L|^{1-P}\right)} \quad \text{Eq. 2}$$

k è la costante di Von Karman pari a 0.4, z_m rappresenta la quota di misura, L la lunghezza di Monin-Obukov (M-O) z_u (Garratt, 1999), rappresenta una lunghezza di scala, D e P sono chiamati costanti di similarità e dipendono dalle condizioni di stabilità atmosferica. Questi sono determinati in virtù della teoria di similarità di M-O (Brutsaert, 2005).

$D = 0.28$; $P = 0.59$ per condizioni instabili (convettive) dell'atmosfera;

$D = 0.97$; $P = 1$ per condizioni neutre dell'atmosfera;

$D = 2.44$; $P = 1.33$ per condizioni stabili dell'atmosfera.

Per determinare se l'atmosfera si trova in condizioni stabili, instabili o neutre è necessario utilizzare il parametro di stabilità L . L è dato dall'Eq. 3. La lunghezza di M-O, presa in valore assoluto, rappresenta la quota in cui si ha il bilanciamento tra la turbolenza di origine meccanica e la turbolenza di origine termica. Situazioni convettive presentano valori di L negativi, mentre le situazioni stabili valori positivi. Inoltre il modulo di L aumenta all'avvicinarsi dell'adiabaticità, tendendo a $+\infty$ se l'avvicinamento avviene da situazioni stabili e a $-\infty$ se da situazioni convettive (Sozzi et al., 2002).

$$L = \frac{-u_*^3 \cdot T}{k \cdot g \cdot w' T'} \quad \text{Eq. 3}$$

Dove g è l'accelerazione di gravità, u_* è la friction velocity determinata dall'Eq. 4 T è la temperature dell'aria espressa in Kelvin. $w' T'$ rappresenta la covarianza tra la componente turbolenta della velocità dell'aria e la componente turbolenta della temperatura.

$$u_* = \left(\overline{u' w'^2} + \overline{v' w'^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{Eq. 4}$$

È importante sottolineare che le quantità $\overline{w' T'}$, $\overline{u' w'}$ e $\overline{v' w'}$ sono direttamente elaborate dalle strumentazioni dedicate ad acquisizioni eddy covariance e quindi risultano essere note a priori.

Per ovviare al problema della lunghezza di M-O che può assumere valori molto elevati all'avvicinarsi delle condizioni di adiabaticità, nel modello H si utilizza il rapporto

$$\frac{z_u}{L}$$

per capire quando l'atmosfera si trova in condizioni stabili, instabili oppure neutre. z_u è determinata dall'Eq. 5.

$$z_u = z_m \cdot \left[\ln \left(\frac{z_m}{z_0} \right) - 1 + \frac{z_0}{z_m} \right] \quad \text{Eq. 5}$$

Dove z_0 rappresenta la rugosità del terreno. Una relazione approssimata per z_0 è data dall'Eq. 6 (Foken, 2008).

$$z_0 = 0.1 \cdot h_v \quad \text{Eq. 6}$$

Dove h_v rappresenta l'altezza della vegetazione.

È importante sottolineare che se le misurazioni vengono eseguite con strumentazione fissa (ad esempio su traliccio), durante la fase di crescita della pianta di mais è necessario tenere in considerazione del *displacement* (Foken, 2008) che può essere assunto pari a $2/3$ l'altezza della vegetazione. L'altezza di misura (z_m) dovrà quindi essere opportunamente scalata della quantità di *displacement* che varierà durante le fasi di crescita fenologica della pianta. Allo stesso tempo anche la rugosità cambierà in funzione delle diverse altezze della pianta.

Se:

$$\frac{z_u}{L} < -0.04$$

l'atmosfera si troverà in condizioni instabili;

$$-0.04 \leq \frac{z_u}{L} \leq +0.04$$

l'atmosfera si troverà in condizioni neutre;

$$\frac{z_u}{L} > +0.04$$

l'atmosfera si troverà in condizioni stabili.

Ora, si è a conoscenza di tutti i termini necessari da inserire nell'Eq1 e 2, che opportunamente invertite permettono di ricavare il valore di x .

$$\frac{F(x; z_m)}{S_0}$$

può essere concepito come il rapporto tra il flusso misurato nel punto (x, z_m) del dominio di calcolo, rispetto all'intera quantità di flusso emesso dell'intero campo S_0 ($g \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). S_0 risulta essere incognito, ma non è un problema in quanto a noi interessa il rapporto delle due grandezze e non le singole variabili separatamente. Il rapporto

$$\frac{F(x; z_m)}{S_0}$$

risulterà quindi essere confinato tra i valori di 0 e 1. Imponendo arbitrariamente un valore di

$$\frac{F}{S_0}$$

invertendo l'Eq.1 e risolvendola in termini di x , si è in grado di determinare la dimensione del footprint. Ricavate le x , successivamente, si applicherà l'Eq. 2 per la determinazione di $f(x, z_m)$ che rappresenta il peso che ogni metro lineare di campo evapotraspirante ha sulla misura di flusso alla stazione. Tutti gli approfondimenti relativi al modello H sono contenuti in Hsieh (1999).

LA STAZIONE EDDY COVARIANCE

La misurazione delle variabili esogene e dei parametri necessari all'applicazione del modello H avviene attraverso l'utilizzo di una stazione micrometeorologica eddy covariance (Fig. 2). La stazione è posta all'interno di un campo coltivato a mais nel comune di Livraga (LO). Le coordinate geografiche sono: latitudine 45.11 N, longitudine 9.34 E, altitudine 60 m s.l.m. I dati che sono stati utilizzati per il calcolo del footprint ed i successivi confronti coprono il periodo che intercorre dal 25/05/2010 al 28/10/2010.

La stazione possiede strumenti di Classe 1 per la misura della più variegata gamma di parametri sia in aria che nel sottosuolo (Fig. 3). L'anemometro sonico tridimensionale (Young Model 81000) per la misura delle tre componenti cartesiane della velocità del



Fig. 2 - La stazione eddy covariance di Livraga (LO).
Fig. 2 - Eddy covariance station of Livraga (LO).

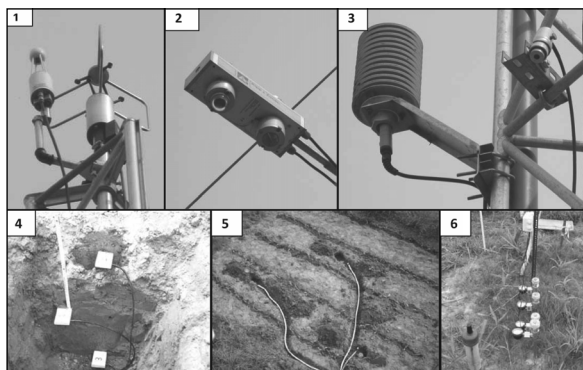


Fig. 3 - Strumentazione della stazione eddy covariance: 1-anemometro sonico tridimensionale e gas analyzer; 2-radiometro a quattro componenti; 3-termoigrometro e IRTS per la misura della temperatura superficiale del suolo; 4-sonde di umidità; 5-heat flux plate per la misura dei flussi di calore attraverso il suolo; 6-tensiometri.

Fig. 3 Eddy covariance instruments: 1-sonic anemometer and gas analyzer; 2-radiometer; 3-termoigrometro and IRTS to measure surface temperature; 4-umidità probes; 5-heat flux plate to measure heat flux in the soil; 6-tensiometer.

vento, il gas analyzer (LI-COR 7500) per la misura della concentrazione di vapore acqueo e anidride carbonica in atmosfera, il radiometro (CNR 1 Kipp & Zonen) per la misurazione della radiazione ad onde corte e lunghe incidente dal sole e dall'atmosfera, e riflessa e/o emessa dalla superficie del suolo, l'IRTS (Infra Red Temperature Skin) della categoria IRR-P Apogee Instruments per la misura della temperatura della superficie del suolo, il termo igrometro (HMP45C Campbell Scientific) per la misura dell'umidità e della temperatura dell'aria e la PAR (Photosynthetically Active Radiation) della categoria LI-COR 190 per la misura della componente della radiazione solare responsabile della fotosintesi delle piante, sono messi a differenti altezze su un traliccio alto 5 m. Alla sommità del traliccio sono collocati il gas analyzer e l'anemometro sonico, a circa 4,80 m la PAR, a 4 m il radiometro e l'IRTS, a circa 3,30 m il termo igrometro. Le sonde di umidità (CS616 Campbell Scientific), l'heat flux plate (HFP01SC Hukseflux) per la misura dei flussi di calore nel suolo, le termocoppie (105 T Campbell Scientific) sono poste sotto la superficie del suolo. Le sonde di umidità sono del tipo TDR (Time Domain Reflectometer) e permettono di calcolare il contenuto volumetrico di acqua nel terreno sfruttando la tecnica della *riflettometria nel dominio del tempo*. Infine la stazione è dotata di un pluviometro a bascula (ARG 100 Campbell Scientific) per il calcolo della pioggia.

I dati misurati dai vari strumenti (ciascuno dei quali caratterizzato da una propria frequenza di acquisizione) sono immagazzinati in un data logger (CR

5000 Campbell Scientific) e mediati su scala di 30 minuti. Il data logger è in grado anche di eseguire le prime operazioni riguardanti il calcolo delle covarianze necessarie per la stima dei flussi.

Estremamente importante è la manutenzione e la pulizia della stazione al fine di garantirne il corretto funzionamento. Soprattutto la strumentazione ad alta frequenza (l'anemometro sonico e il gas analyzer) richiedono una cura particolare. L'anemometro calcola la velocità del vento nelle tre componenti cartesiane attraverso il tempo di transito di segnali acustici tra un sensore emettitore ed uno ricevente. È importante che tra i due sensori non si interponga nessun ostacolo (ragnatele o quant'altro) al fine di ottenere una buona qualità del dato. Il gas analyzer misura la concentrazione di vapore acqueo e di anidride carbonica in atmosfera sfruttando l'invio di segnali infrarossi attraverso un cammino ottico. Nella fase di post processing è in primis necessario scartare i dati misurati dall'anemometro e dal gas analyzer in corrispondenza dei giorni piovosi. È da tenere presente che molto probabilmente anche nelle prime ore del mattino, durante il momento di formazione della rugiada, è possibile che si generi una patina d'acqua sul vetrino del gas analyzer e quindi i dati potrebbero essere affetti da errore.

Un altro aspetto di fondamentale importanza che è necessario tenere in considerazione è che la stazione eddy covariance funziona solamente in presenza di turbolenza atmosferica. In condizioni di adiabaticità (condizioni neutre) i termini di covarianza ($\overline{w'T}$, $\overline{w'q}$) tendono a zero cosicché risulta essere impossibile calcolare correttamente i flussi di calore latente e sensibile.

È presente nel comune di Landriano (PV) un'altra stazione micrometeorologica eddy covariance dotata della stessa strumentazione di quella di Livraga. Questa è stata utilizzata per validare le relazioni empiriche ricavate con i dati sperimentali di Livraga. Anche la stazione di Landriano è collocata all'interno di un campo coltivato a mais con caratteristiche simili a quelle di Livraga e comunque sempre in Pianura Padana. La distanza tra i due è rappresentata dalla mappa di Fig. 4 ed è circa in linea d'aria di 50 Km.

METODO

Come detto in precedenza, non tutti i dati della stazione eddy covariance possono essere utilizzati per l'obiettivo di questo lavoro. Prima di tutto è necessario scartare i dati misurati dalla stazione in corrispondenza dei giorni piovosi. In tali giorni la strumentazione di aria, e soprattutto il gas analyzer e l'anemometro sonico, sono fortemente compromessi nelle loro misurazioni in quanto il segnale in-

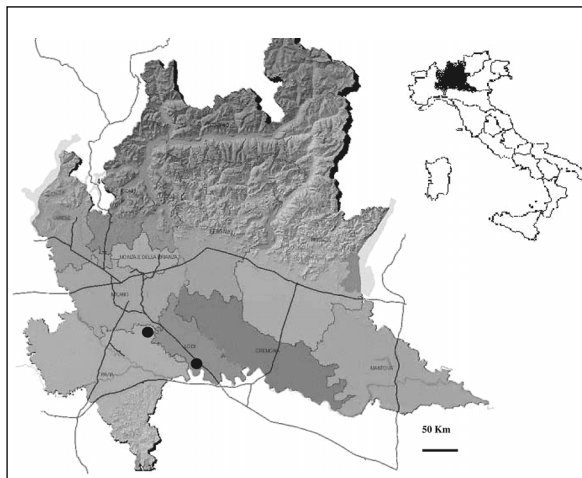


Fig. 4 - CTR della Lombardia. In nero sono indicati i siti di posizionamento delle stazioni eddy.

Fig. 4 - CTR of Lombardia. The black points are the eddy stations sites.

frarosso (del gas analyzer) e il segnale acustico (dell'anemometro) possono essere alterati dalla presenza di gocce di pioggia sui sensori emettitori e riceventi. La presenza di un pluviometro a bascula permette l'identificazione di tali giorni e mediante una procedura post processing delle informazioni si possono eliminare i dati che molto probabilmente sono affetti da errore.

Successivamente è necessario suddividere i dati in 5 categorie in corrispondenza delle differenti fasi di crescita fenologica delle piante di mais. La prima fase detta *fase di inizio*, dove l'apparato radicale della pianta è poco sviluppato, si estende dal 152esimo al 177esimo giorno giuliano. La seconda fase detta *fase di sviluppo* si protrae dal 178esimo al 191esimo giorno giuliano e lo sviluppo della pianta è del tutto prominente. La terza fase detta *fase di mezzo* che va dal 192esimo al 249esimo giorno giuliano ed infine la fase di *senescenza* dal 250esimo al 284esimo giorno giuliano quando poi la pianta viene raccolta. I restanti giorni dell'anno riguardano condizioni in cui nel campo non vi è la presenza della vegetazione e li si possono classificare come ultima categoria denominata *assenza di vegetazione*. La suddivisione dei dati in queste classi di sviluppo è necessaria per l'applicazione corretta della Eq. 5 che deve tener conto del *displacement* e della rugosità che sono entrambi funzione dell'altezza della pianta. Per semplicità si è tentato di dare una relazione empirica di crescita della pianta in funzione del giorno giuliano. Per fare ciò si è plottato l'altezza della vegetazione in corrispondenza dei giorni giuliani di misura. Come mostrato in Fig. 5 la crescita della pianta avviene esponenzialmente fino al

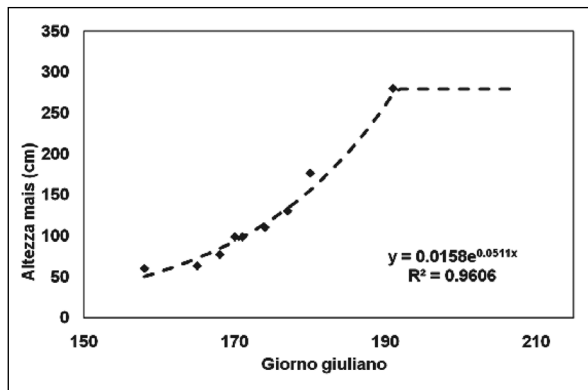


Fig. 5 - Curva di crescita della pianta di mais in funzione del giorno giuliano.

Fig. 5 - Relationship between plant height and Julian day.

191esimo giorno giuliano, dopo di che si mantiene costante alla quota di circa 280 cm. L'Eq. 7 descrive la crescita del mais in funzione del giorno giuliano (l'altezza è espressa in cm).

$$\begin{cases} h_v = 0.0158 \cdot e^{0.0511 \cdot gg} \rightarrow 152 < gg < 191 \\ h_v = 280 \rightarrow 191 \leq gg \leq 284 \end{cases} \quad \text{Eq. 7}$$

Noto l'andamento di crescita della vegetazione è possibile ricavare la rugosità tramite l'Eq. 6 e da questa l'Eq. 5. Attraverso l'utilizzo dell'anemometro sonico si è poi in grado di determinare le variabili che permettono di calcolare la lunghezza di Monin-Obukov che associata all'Eq. 5 determina il parametro di stabilità necessario per l'applicazione corretta dell'Eq. 1 e 2.

Per ogni valore di z_u e L , che si otterrà inserendo nell'Eq. 3 e 5 i parametri misurati dalla stazione, si avrà una curva del footprint (Fig. 6) che esprime il peso che ogni metro lineare di campo evapotraspirante ha, sulla

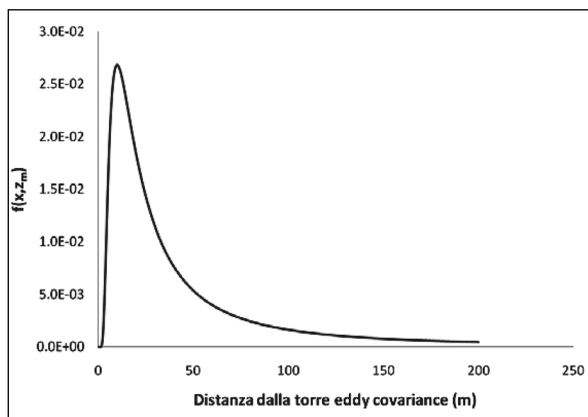


Fig. 6 - Curva del footprint $f(x, z_m)$ [m^{-1}] ottenuta per il 215esimo gg giuliano. $L = -35$ m, $h_v = 280$ cm, $|U| = 1.7$ m/s.

Fig. 6 - Footprint curve $f(x, z_m)$ [m^{-1}] calculated for the 215th Julian day. $L = -35$ m, $h_v = 280$ cm, $|U| = 1.7$ m/s.

misura del flusso percepito alla stazione. Per caratterizzare questa curva che sarà continuamente diversa per ogni istante di tempo, si è scelto un punto caratteristico corrispondente al picco, e che permette di capire quale sia la distanza dalla torre laddove si trova il punto più rappresentativo che influenza la misura del sensore rilevatore. Per ogni misurazione della stazione eddy covariance non si avrà più una curva del footprint ma solamente un punto che caratterizza tale curva e che permette comunque lo studio della sua variabilità.

Come primo passo si è proceduto ad un confronto diretto tra le variabili esogene e la dimensione del footprint (espressa attraverso il punto di picco della curva di Eq. 2) per capire se esiste una qualche relazione funzionale di dipendenza diretta. Tale confronto può essere affrontato dimensionalmente ricorrendo alla funzione di correlazione tra le varie variabili esogene considerate e la dimensione del footprint. Le variabili esogene che si sono utilizzate per il confronto si suddividono in due categorie: le *variabili esogene caratteristiche del suolo* e le *variabili esogene caratteristiche dell'atmosfera*. Nel primo gruppo sono annoverate la temperatura superficiale del suolo ($T_{sup, suolo}$), la radiazione ad onde lunghe uscente dal suolo ($R_{l, out}$), l'umidità superficiale del suolo; nel secondo la velocità media orizzontale (U) (nella direzione preferenziale di spira del vento) la componente verticale della velocità del vento (W) e la pressione atmosferica. Per quanto riguarda le variabili caratteristiche del suolo si è scelto di analizzare la temperatura superficiale e il calore proveniente da quest'ultimo in quanto risultano essere le cause principali della turbolenza di origine convettivo e degli spostamenti delle masse d'aria dal basso verso l'alto. L'umidità invece è un parametro legato strettamente all'evapotraspirazione con l'obiettivo di verificare se il footprint risente in qualche modo della variazione del contenuto d'acqua presente nello strato superficiale del suolo. Per quanto riguarda le variabili esogene caratteristiche dell'atmosfera, la velocità media orizzontale è relazionata alla friction velocity generatrice di un attrito superficiale di origine meccanico, mentre la componente verticale della velocità del vento esprime con quale velocità le masse d'aria riscaldate dal calore del suolo si dirigono verso l'alto. La pressione atmosferica, che è equivalente al peso della massa di aria sovrastante ad un determinato punto di misura, potrebbe influenzare la dimensione del footprint.

Il secondo passo è consistito nell'analisi del parametro di stabilità, valutato attraverso il rapporto

$$\frac{z_u}{|L|}$$

con l'obiettivo di stimarne il valore utilizzando le variabili esogene caratteristiche del suolo e dell'at-

mosfera. Riarrangiando l'Eq. 1 si può ottenere l'Eq. 8 che esprime la relazione tra due gruppi adimensionali:

$$\frac{x}{|L|}$$

e il parametro di stabilità

$$\frac{z_u}{|L|}$$

$$\frac{x}{|L|} = \frac{-1}{k^2 \cdot \ln\left(\frac{F(x; z_m)}{S_0}\right)} \cdot D \cdot \left(\frac{z_u}{|L|}\right)^P \quad \text{Eq. 8}$$

Mentre z_u è facilmente determinabile, L per essere calcolata necessita della conoscenza di due parametri u^* , $\overline{w^3 T}$ misurati attraverso l'anemometro sonico tridimensionale. può anche essere vista come il rapporto tra la turbolenza generata meccanicamente dallo scorrimento del fluido (aria) rispetto alla superficie rugosa e la turbolenza di origine termica generata dal riscaldamento della superficie del suolo. Al fine di fornire una stima della misura del footprint in fase progettuale, con l'obiettivo di evitare l'utilizzo dell'anemometro sonico tridimensionale per la stima dei parametri necessari al calcolo della lunghezza di Monin-Obukov, si è proceduto all'identificazione di alcune curve empiriche per la caratterizzazione di u^* e $\overline{w^3 T}$. Affinché tali relazioni si possano considerare idonee anche per altri siti, si sono confrontate queste curve con i dati ot-

tenuti dalla stazione micrometeorologica eddy covariance di Landriano (PV), anch'essa dotata della medesima strumentazione della stazione di Livraga e posizionata sopra una coltivazione di mais. La conoscenza dei termini L e z_u permette il calcolo del valore di x per mezzo dell'Eq 8, fissati D e P per le condizioni di stabilità/instabilità atmosferica e scelto arbitrariamente il valore di

$$\frac{F(x; z_m)}{S_0}$$

RISULTATI E DISCUSSIONI

In Fig.7 si mostrano le relazioni tra le variabili esogene caratteristiche del suolo e la posizione del punto di picco della curva del footprint definita dall'Eq. 2. Si nota che in linea generale la maggior concentrazione dei punti sperimentali è collocata nell'intorno di bassi valori del footprint, tra 0 e 50 m. Si nota tuttavia per T_{sup_suolo} e R_{l_out} un leggero incremento della dimensione del footprint in corrispondenza di bassi valori della temperatura e della radiazione. A questo incremento tuttavia coincide una notevole dispersione delle misure che invece non si manifesta per valori di temperatura e radiazione prossimi agli estremi superiori. Del tutto inconsistente è la dipendenza con l'umidità superficiale del suolo che per ogni classe manifesta sempre una dispersione del footprint molto elevata. Inoltre il range di umidità del terreno presente durante tutti i giorni di analisi è piuttosto limitato (la maggior parte dei dati è concentrata tra valori di umidità compresi tra 15 % e 40 %). Questo è dovuto al fatto che le irrigazioni mantengono il ter-

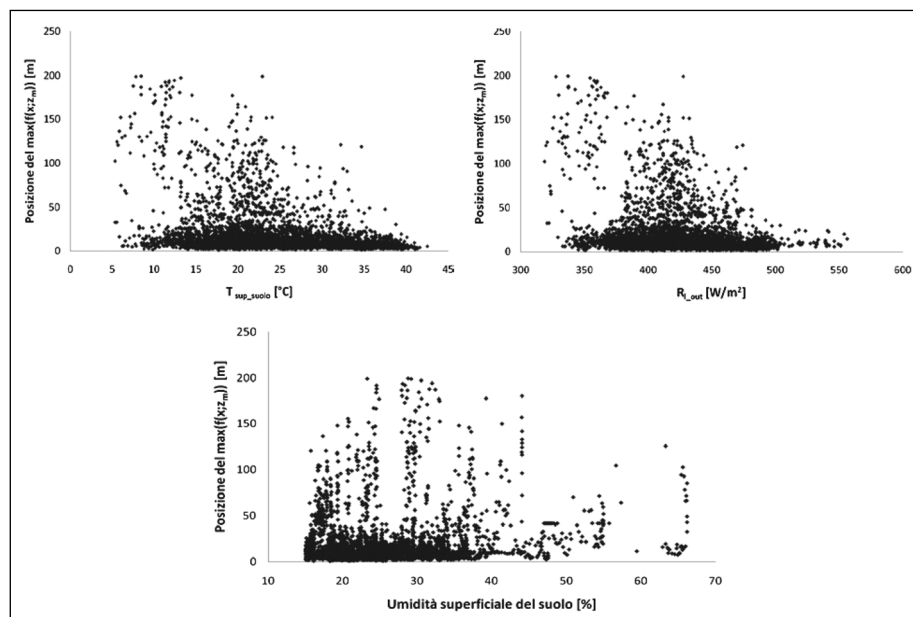


Fig. 7 - Variabili esogene caratteristiche del suolo. Confronti della posizione del picco del footprint rispettivamente con la temperatura superficiale del suolo, la radiazione ad onde lunghe uscente dal suolo e l'umidità superficiale del terreno. Fig. 7 - Soil exogenous variables. Comparison between the position of the maximum of the footprint curve with infrared outgoing radiation and soil moisture.

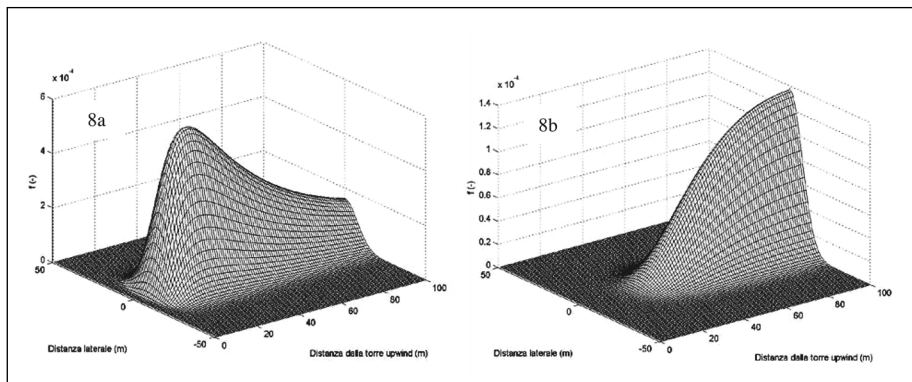


Fig. 8 - Footprint bidimensionale per un caso ideale con campo di dimensione 100 m. a) condizioni fortemente convettive $L=-50m$; b) condizioni fortemente stabili $L=50m$.

Fig. 8 - Bidimensional flux footprint for an ideal case with a field of 100 m. a) strong convective condition $L=-50 m$; b) strong stable condition $L=50m$.

reno in condizione tale da evitare che la pianta raggiunga la situazione di stress idrico durante la stagione estiva, quando la siccità potrebbe inaridire eccessivamente il terreno. La mancanza di informazioni sull'umidità in condizioni limite sia di completa saturazione del campo che di siccità spiccata, impedisce di trarre delle considerazioni di carattere generale sull'influenza dell'umidità superficiale del terreno sulla dimensione del footprint. Il leggero trend caratteristico della temperatura superficiale e del calore uscente dal suolo può essere spiegato se si pensa che all'aumentare del riscaldamento della superficie del suolo si ha un aumento dei fenomeni convettivi. All'aumentare della connettività le condizioni instabili dell'atmosfera dominano e i rimescolamenti delle masse d'aria sono maggiori e più frequenti. I vortici saranno più intensi, frequenti e di grandi dimensioni. La velocità di crescita del rapporto

$$\frac{F(x; z_m)}{S_0}$$

rispetto ad x sarà più elevato, con la conseguente diminuzione del valore della x del picco di $f(x; z_m)$. I punti più rappresentativi della misura dei flussi percepiti dai sensori dedicati, saranno a poca distanza dalla torre micrometeorologica. Viceversa per condizioni stabili cioè per

$$\frac{dT_{aria}}{dz} < 0$$

la turbolenza è interamente generata dalla rugosità superficiale, con vortici di piccole dimensioni e uniformi tra loro. La velocità di crescita del rapporto

$$\frac{F(x; z_m)}{S_0}$$

è molto più bassa rispetto alle condizioni convettive: i valori di $f(x; z_m)$ sono più bassi e il picco si allontana dalla torre di misura come mostrato in Fig.8 per un campo ideale di dimensione pari a 100 m per $L = -50m$ (Fig.8a) e $L = 50m$ (Fig.8b).

In Fig. 9 sono riportate le relazioni tra la posizione

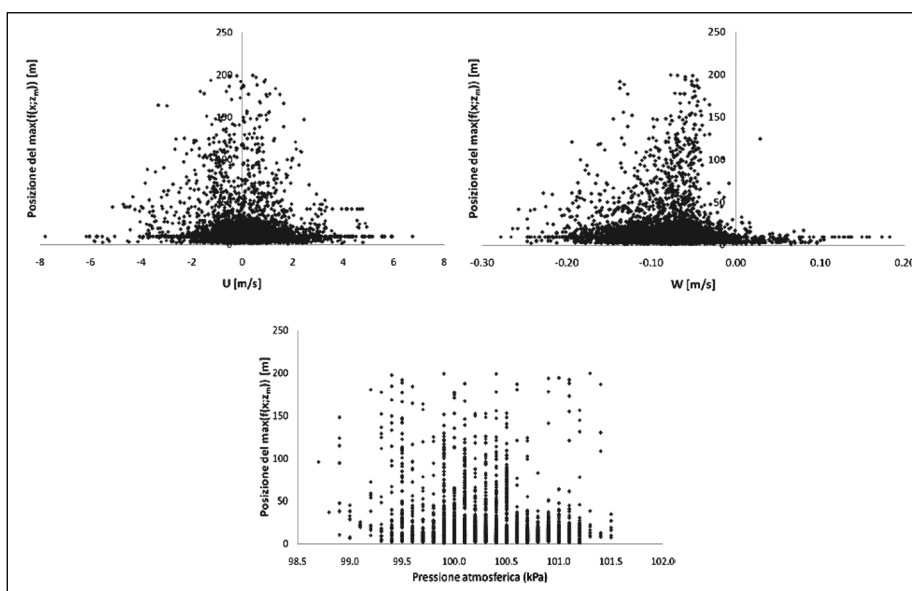


Fig. 9 - Variabili esogene caratteristiche dell'atmosfera. Confronti della posizione del picco del footprint rispettivamente con la componente orizzontale della velocità del vento nella direzione preferenziale di spirale, la componente verticale della velocità del vento e la pressione atmosferica. *Fig. 9 - Atmosphere exogenous variables. Comparison between the position of the maximum of the footprint curve with the preferential planar component of wind velocity, vertical component of wind velocity and atmosphere pressure.*

del picco di $f(x; z_m)$ e le variabili esogene caratteristiche dell'atmosfera. Per quanto riguarda la componente U della velocità del vento si nota in primis che i punti sperimentali sono circa simmetrici all'asse delle ordinate. Questo indica che principalmente non è importante l'influenza della direzione di spira del vento sulla misura della dimensione del footprint ma la sua intensità. Si evidenzia il fatto che ad elevati valori di U la posizione del picco rispetto la torre micrometeorologica diminuisce mentre a bassi valori di U , x aumenta considerevolmente. Questo è sempre legato alle condizioni di turbolenza che sicuramente saranno più spiccate maggiore è l'attrito prodotto dal vento. Caratteristico è l'andamento di W . In questo caso non vi è la simmetria con l'asse delle ordinate bensì la presenza quasi esclusiva di termini negativi. I termini negativi di W indicano spostamenti di masse d'aria dall'alto verso il basso conseguenza dei rimescolamenti delle masse d'aria in situazioni convettive a gradiente

$$\frac{dT_{aria}}{dz} < 0$$

Anche in questo caso per connettività molto spiccate e quindi per valori molto elevati del modulo di W , si ha che la dimensione del footprint diminuisce mentre per valori bassi di W il footprint aumenta. Dalla distribuzione dei dati sperimentali si nota però un valore critico nell'intorno di -0.05 m/s che rappresenta il passaggio da condizioni convettive di forte rimescolamento a condizioni neutre e poi stabili. Per condizioni stabili dell'atmosfera, a conseguenza del gradiente termico verticale positivo, le masse d'aria si spostano solo dal basso verso l'alto e mai viceversa in quanto incontrano, lungo il loro cammino, strati d'aria sempre più freddi. In questo caso la turbolenza è intermante dettata dalla velocità del vento medio e dallo shear per mezzo della friction velocity e il picco risulta essere più distante dalla torre di misura. Come per l'umidità del suolo anche per la pressione atmosferica i trend sono del tutto inesistenti. In Tab. 2 si riportano gli indici di correlazione ottenuti tra le variabili esogene caratteristiche del suolo e dell'atmosfera e la dimensione del footprint per le varie fasi di sviluppo fenologico della pianta di mais. L'indice di correlazione parziale è stato ottenuto correlando la dimensione del footprint (x), stimata attraverso il modello H, con le misure di ciascuna grandezza caratteristica dell'atmosfera o del suolo solo in corrispondenza di una sola fase fenologica di sviluppo della pianta di mais. L'indice di correlazione totale è stato determinato correlando tutti i valori di x con

tutti i valori della grandezza caratteristica dell'atmosfera o del suolo indipendentemente dalle fasi di sviluppo fenologico della pianta di mais.

Variabili esogene caratteristiche del suolo (indici di correlazione rispetto alla posizione del picco di $f(x, z_m)$)			
	Fasi fenologiche	Indice correlazione parziale	Indice correlazione totale
T_{sup-suolo}	Fase iniziale	-0.405	-0.295
	Fase di sviluppo	-0.453	
	Fase di mezzo	-0.281	
	Senescenza	-0.226	
	Assenza	-0.336	
R_{l-out}	Fase iniziale	-0.408	-0.268
	Fase di sviluppo	-0.447	
	Fase di mezzo	-0.264	
	Senescenza	-0.248	
	Assenza	-0.390	
Umidità	Fase iniziale	-0.044	0.183
	Fase di sviluppo	0.352	
	Fase di mezzo	-0.036	
	Senescenza	-0.044	
	Assenza	0.364	

Variabili esogene caratteristiche dell'atmosfera (indici di correlazione rispetto alla posizione del picco di $f(x, z_m)$)			
	Fasi fenologiche	Indice correlazione parziale	Indice correlazione totale
U	Fase iniziale	-0.075	-0.093
	Fase di sviluppo	-0.114	
	Fase di mezzo	-0.007	
	Senescenza	-0.107	
	Assenza	-0.143	
W	Fase iniziale	0.105	0.019
	Fase di sviluppo	0.037	
	Fase di mezzo	-0.024	
	Senescenza	-0.047	
	Assenza	0.149	
P_{atmosferica}	Fase iniziale	-0.115	-0.120
	Fase di sviluppo	-0.269	
	Fase di mezzo	-0.082	
	Senescenza	0.021	
	Assenza	0.046	

Tab. 2 - Correlazioni tra le variabili esogene e la dimensione del footprint.

Tab. 2 - Correlation between exogenous variables and footprint dimension.

In virtù dell'Eq.8 plottando i dati sperimentali in termini di

$$\ln\left(\frac{x}{|L|}\right)$$

in funzione di

$$\ln\left(\frac{z_u}{|L|}\right)$$

si ottiene un andamento ben definito dalla curva sperimentale rappresentata in Fig. 10. In questo caso la x del rapporto

$$\frac{x}{|L|}$$

sarà quella del picco di $f(x; z_m)$. L'approssimazione lineare di Fig.10 non stupisce in linea di massima in quanto l'Eq. 8 fornisce già la relazione esatta tra

$$\frac{x}{|L|}$$

e

$$\frac{z_u}{|L|}$$

Tuttavia in questo caso si tengono in considerazione contemporaneamente le condizioni di stabilità, instabilità e neutralità dell'atmosfera, indipendentemente dai valori di D , P e

$$\frac{F(x; z_m)}{S_0}$$

Per dare una stima di x è comunque necessario conoscere il valore di L . Analizzando i parametri che permettono di calcolare la lunghezza di Monin-Obukov (u^3 , $\overline{w'T}$ e T_{aria}) si nota, come mostrato in Fig.11 a e b, che u^3 e $\overline{w'T}$ possono essere sostituiti da semplici relazioni polinomiali in funzione rispettivamente di U e di

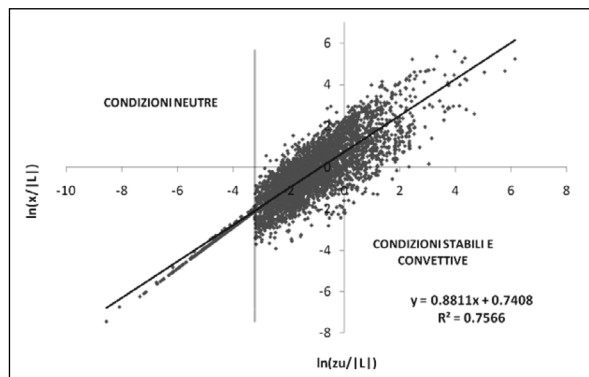


Fig. 10 - Approssimazione lineare tra il $\ln(x/|L|)$ e il logaritmo del parametro di stabilità.

Fig. 10 - Linear approximation between $\ln(x/|L|)$ and stability parameter logarithm.

$R_{L,out} \cdot R_{L,out}$ è divisa per la densità dell'aria e per il calore specifico al fine di avere un'omogeneità dimensionale con la covarianza $\overline{w'T}$. Siccome T_{aria} è possibile misurarla con un termometro e z_u è interamente funzione della quota di misura e dell'altezza della vegetazione per mezzo delle Eq. 5, nota la velocità media del vento e la radiazione ad onde lunghe che fuoriesce dal suolo sono in grado di stimare la lunghezza di Monin-Obukov mediante l'Eq.3 (dove in questo caso la T_{aria} è espressa in °C) e da questa il valore del footprint moltiplicando il secondo membro dell'Eq. 8 per $|L|$. Stimando i valori del footprint per mezzo delle relazioni polinomiali indicate in Fig. 10 e 11 e confrontandoli con quelli ottenuti sperimentalmente, si nota che le approssimazioni introdotte permettono una buona stima del footprint su scala giornaliera (Fig. 12). Vi è la presenza di una maggiore uniformità tra il footprint teorico (cioè quello stimato mediante le relazioni empiriche) e quello sperimentale in concomitanza della presenza della vegetazione (nella fase di massimo sviluppo) e durante il periodo estivo. Viceversa il footprint nei giorni di crescita del mais e quando la coltivazione è stata mietuta ri-

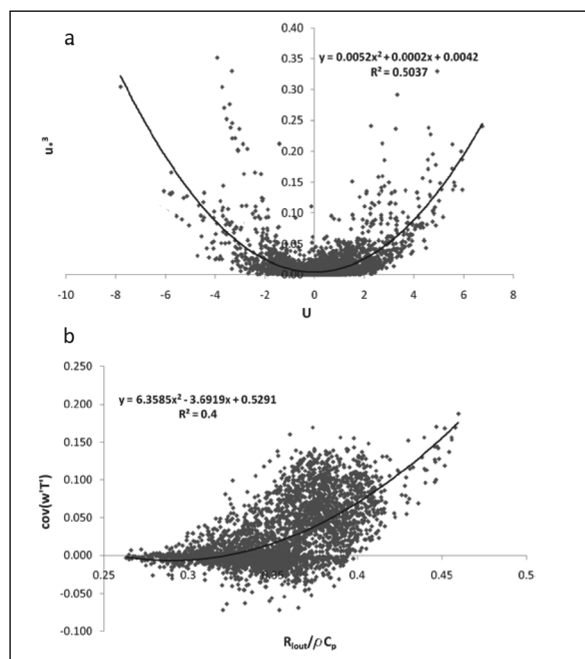


Fig. 11 - a) u^3 (m^3/s^3) funzione di U (m/s); b) $cov(w'T)$ [m^2/s] funzione di

$$\frac{R_{L,out}}{\rho C_p} [m^2/s].$$

Fig. 11 - a) u^3 (m^3/s^3) function of U (m/s); b) $cov(w'T)$ [m^2/s] function of

$$\frac{R_{L,out}}{\rho C_p} [m^2/s]$$

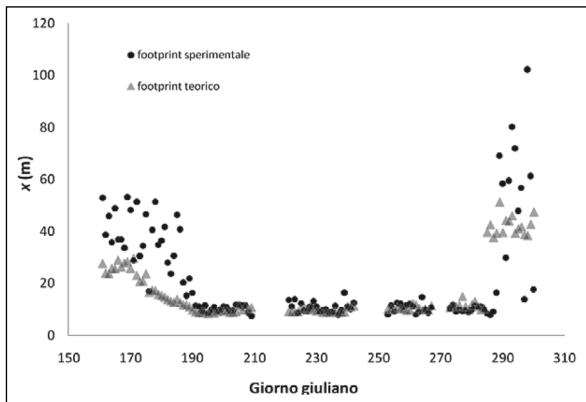


Fig. 12 - Confronto tra il footprint stimato con le relazioni empiriche e quello ottenuto con i dati sperimentali di Livraga. Media su scala giornaliera.
Fig. 12 - Comparison between daily average flux footprint calculated with empirical relation, and experimental footprint measure in Livraga site.

sulta possedere una dispersione dei valori molto elevata. La stima del footprint per mezzo delle relazioni empiriche, in questi periodi, risulta essere più scadente anche se comunque risponde in linea generale ai trend di crescita dei dati sperimentali.

Per validare i coefficienti delle relazioni indicate in Fig. 10 e 11 si sono utilizzati i dati sperimentali misurati per lo stesso periodo (25/05/2010 - 28/10/2010) dalla stazione eddy covariance di Landriano (PV). Come mostrato in Fig. 13 a e b le curve teoriche ottenute applicando le relazioni empiriche ricavate dai dati di Livraga, interpolano in maniera soddisfacente anche i dati di Landriano. Calcolando il footprint per mezzo dell'equazione mostrata in Fig. 10, si ottiene che anche per i dati di Landriano vi è una buona concordanza tra il footprint sperimentale e quello teorico (Fig. 14).

CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti in questo lavoro si può concludere che il footprint prevalentemente è una grandezza dipendente dalle caratteristiche dinamiche (turbolente) dell'atmosfera ed è poco influenzato dalle variabili esogene come l'umidità del terreno e la pressione atmosferica. Più influenti sono la temperatura superficiale del suolo e il calore che proviene da esso ($R_{L,out}$) che intervengono a generare vortici convettivi e l'istaurarsi di condizioni di instabilità atmosferica.

Si è riusciti inoltre ad ottenere equazioni empiriche semplici per dare una stima della dimensione del footprint in fase di progetto utilizzando solamente strumentazione di costo nettamente inferiore all'anemometro sonico tridimensionale necessario per misurare grandezze come u_z e $\overline{w'T}$. Tali relazioni, ottenute da dati sperimentali di Livraga sono comunque

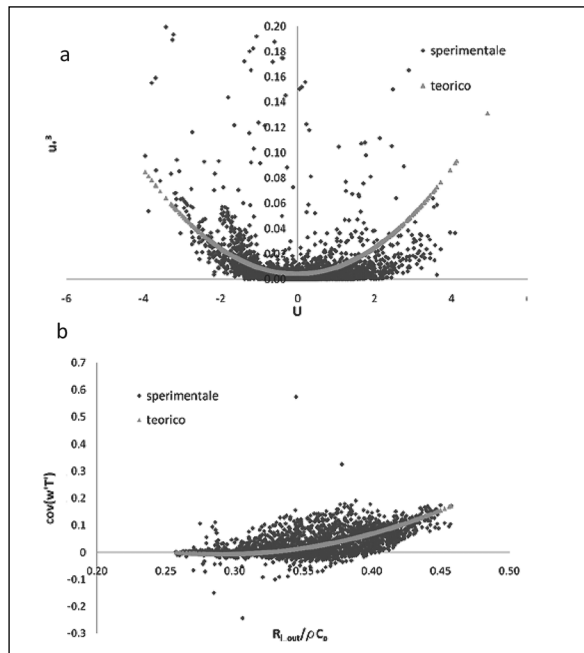


Fig. 13 - a) u_z^3 (m^3/s^3) funzione di U (m/s) ; b) $cov(w'T)$ [$m \text{ } ^\circ C/s$] funzione di

$$\frac{R_{e,out}}{\rho C_p} \text{ [m } ^\circ C/s].$$

Dati sperimentali di Landriano (PV).

Fig. 13 - a) u_z^3 (m^3/s^3) function of U (m/s) ; b) $cov(w'T)$ [$m \text{ } ^\circ C/s$] function

$$\frac{R_{L,out}}{\rho C_p} \text{ [m } ^\circ C/s]$$

Experimental data of Landriano (PV).

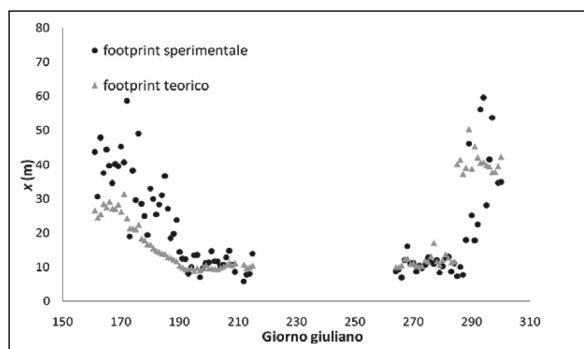


Fig. 14 - Confronto tra il footprint stimato con le relazioni empiriche per i dati di Livraga e quello ottenuto con i dati sperimentali di Landriano. Media su scala giornaliera.

Fig. 14 - Comparison between flux footprint calculated with empirical relation obtained by Livraga measure, and experimental footprint measure in Landriano site. The footprint dimension is averaged on 24 hour.

estendibili anche ad altri campi di mais caratteristici della Pianura Padana come dimostrato dal confronto con il footprint ottenuto per le misure della stazione

eddy di Landriano. Questo si pensa che sia in parte dovuto al fatto che le coltivazioni di mais nella Pianura Padana sono, fisicamente, molto simili tra loro soprattutto per quanto riguarda lo sviluppo e la crescita. Ciò comporta che la rugosità e la grandezza di scala z_u , per entrambi i siti, siano pressoché uniformi. Infine molto probabilmente le condizioni di turbolenza dell'atmosfera non cambiano radicalmente nei due siti in quanto morfologicamente simili tra loro seppur con caratteristiche pedologiche e posizioni geografiche differenti. Siccome la $R_{L,out}$ e la T_{aria} sono strettamente legate alle temperature superficiali del suolo come mostrato in Fig. 15, le relazioni empiriche introdotte precedentemente possono prevedere uno sviluppo anche in seno alle acquisizioni remote sensing di immagini termiche del suolo per una determinata parcella. Nota la temperatura superficiale del suolo e indicativamente il campo di velocità media del vento del sito preso in esame, sarà possibile dare una stima della dimensione del footprint permettendo di capire se le dimensioni del campo da studiare sono idonee all'area rappresentativa degli strumenti di misura, e quale possa essere la corretta posizione della torre micrometeorologica eddy covariance.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato sviluppato all'interno del progetto ACQWA EU/FP7 (grant number 212250) "Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of Water" e del progetto ACCA finanziato dalla Regione Lombardia in collaborazione con l'Università di Milano "Misura e modellazione matematica dei flussi di Acqua e Carbonio negli agro-ecosistemi a mais". Un ringraziamento all'Ing. Paolo Capelli per la collaborazione nel trattamento dei dati e delle elaborazioni numeriche.

BIBLIOGRAFIA

Brutsaert W., 2005. Hydrology An introduction. Cambridge University Press.

Dyer A., 1962. The adjustment of profiles and eddy fluxes. Quarterly journal of royal meteorological society, 89: 276-280.

Foken T., 2008. Micrometeorology. Springer.

Garratt J., 1999. The atmospheric boundary layer. Cambridge university press.

Gash J., 1985. A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurement. Boundary Layer Meteorol., 35: 409-414.

Hsieh C., Katul G., Chi T., 1999. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. Adv. Water Resour., 23: 765-772.

Hsieh C., Katul G., Schieldge J., Sigmon J., Knoerr K., 1997. The Lagrangian stochastic model for fetch

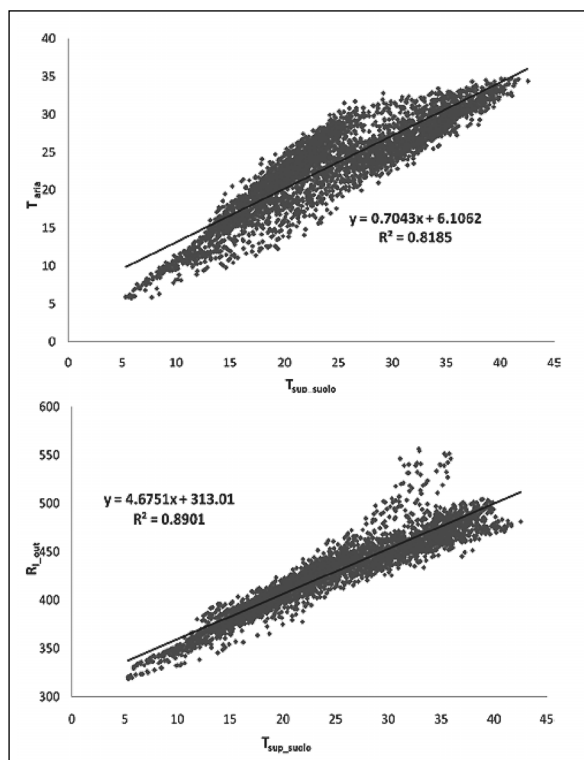


Fig. 15 - Relazione tra la T_{aria} ($^{\circ}C$) e la $R_{L,out}$ (W/m^2) rispetto alla temperatura superficiale del suolo $T_{sup,suolo}$ ($^{\circ}C$).
Fig. 15 - Relation between T_{aria} ($^{\circ}C$) and $R_{L,out}$ (W/m^2) compared to the surface soil temperature $T_{sup,suolo}$ ($^{\circ}C$).

and latent heat flux estimation above uniform and nonuniform terrain. Water resources research, 33: 427-438.

Kljun N., Rotach W., Schmid H., 2002. A 3D backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary layer stratifications. Boundary Layer Meteorol., 103: 205-226.

Lee X., Massman W., Law B., 2004. Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. Springer-Verlag.

Rotach M., Gryning S., Tassone C., 1996. A two dimensional Lagrangian Stochastic Dispersion Model for Daytime condition. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 122: 367-369.

Sozzi R., Valentini M., Georgiadis T., 2002. Introduzione alla turbolenza atmosferica. Bologna: ed. Pitagora.

Sutton O. 1947. The problem of diffusion in the lower atmosphere. Quarterly journal of royal meteorological society, 73: 257-281.

Thomson D., 1987. Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows. J Fluid Mech, 180: 529-556.

Van Ulden A., 1978. Simple estimates for vertical diffusion from sources near the ground. Atmosphere Environment, 12: 2125-2129.

A water balance model of Lago Azzurro (Madesimo - Lombardia - Italia)

Luigi Mariani^{1*}, Giuseppe Sfondrini², Gabriele Cola¹

Abstract: *The water balance of a little Alpine lake (Lago Azzurro - Madesimo - Lombardia - Italia) fed by a catchment of 1.2 km² and subject to temporary emptying in years characterized by summer drought has been modeled. The lake develops from a fractured rocks aquifer, with groundwater stored in fractures, joints, bedding planes and cavities of the rock mass located at the foot of the Pizzo Groppera mountain. The model is based on the daily resolution of two continuity equations (water balances of both the catchment soils and the aquifer). The results show that the risk of emptying is increased after the climate change of the end of the 80s, perhaps enhanced by land use changes observed in the area (new ski runs). Emptying phenomena observed in 1994, 2004, 2005 and 2006 are correctly simulated. The establishment of a quantitative monitoring of lake level and meteorological variables (first of all snow and rainfall) is crucial to obtain the data-sets useful to validate the proposed model and to obtain future answers to our questions.*

Key words: *water balance, alpine lake, lago azzurro, change point*

Riassunto: *Viene presentato e discusso il bilancio idrico di un piccolo lago alpino (Lago Azzurro - Madesimo - Lombardia - Italia) alimentato da un bacino idrografico di 1,2 km² e soggetto a svuotamenti temporanei in anni caratterizzati da siccità estiva. Il lago è l'espressione di un acquifero ospitato da un complesso sistema di rocce fratturate, nel quale cioè le acque sotterranee sono ospitate in fratture, articolazioni, piani di assestamento e cavità della massa rocciosa situata ai piedi del Pizzo Groppera. Il modello è basato sulla risoluzione quotidiana di due equazioni di continuità (bilanci idrici dei suoli del bacino e dell'acquifero). I risultati mostrano che il rischio di svuotamento è aumentato dopo il cambiamento del clima che ha avuto luogo della fine degli anni '80 ed un contributo al rischio potrebbe essere venuto dai cambiamenti nell'uso del suolo e legati alla costruzione di nuove piste di sci. Gli svuotamenti segnalati da testimoni locali negli anni 1994, 2004, 2005 e 2006 sono stati correttamente simulati. Tuttavia l'attivazione di un controllo quantitativo del livello del lago e delle variabili meteorologiche (in primis neve e pioggia) è fondamentale al fine di ottenere i data-set necessari per validare il modello proposto e per ottenere future risposte alle nostre domande.*

Parole chiave: *bilancio idrico, lago alpino, lago azzurro, change point*

1. INTRODUCTION

This work is referred to Lago Azzurro (Azure Lake - 1850 m a.s.l.) a little Alpine lake located near Madesimo (Lombardia - Italy). Lago Azzurro belongs to the cultural heritage of Italy since Giosuè Carducci, the main Italian poet of the second half of the 19th century, consecrated it with the homonymous "Lago Azzurro" poem in 1888.

One of the main concerns regarding this lake is represented by the reoccurring summer emptying; local people reported that the lake was completely empty as a consequence of summer drought in some summers of the past (some summers of 50s years and, later, in 1994, 2004, 2005 and 2006).

In the light of this, FAI (Fondo Italiano per l'Ambiente - Italian Environment Fund) sponsored a specific research project (coordinated by Università degli Studi di Milano - Dipartimento di Scienze della Terra) aimed to detect the causes of

water shortage and define management strategies to overcome it. The study was founded on the following general activities:

geo-morphological and hydrological analysis of the lake basin by means of specific field surveys carried out by CNR and Università degli Studi di Milano - Dipartimento di Scienze della Terra
dynamical modeling of lake water level to describe its level variability.

In this general context, the work hereafter presented was specifically aimed to develop a lake water level mathematical model parametrized with data representative of the lake environment.

However, the possibility of a mathematical approach to lake water level shows some important constraints and more specifically:

(i) reference time series of meteorological data for the site are not available and the series generated from other stations are prone to relevant uncertainties mainly due to complex relief effects (Barry, 1992).

(ii) the incomplete understanding of the subsoil water system (in terms of depth and behavior) limits the calibration of the model.

(iii) The absence of quantitative historical series of

^{1*}Corresponding author email: luigi.mariani@unimi.it

¹ Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale.

² Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra.

the lake water level disables calibration and validation of the model.

Nevertheless the modeling approach to lake water level can be useful for exploratory purposes in order to (i) summarize the knowledge obtained by research groups involved in the project and (ii) highlight the lack of knowledge to plan future research and monitoring activities in order to overcome it.

2. MATERIAL AND METHODS

The lake water balance model was developed in standard Pascal language and works with a daily time step. The lake is considered as the product of a fractured rocks aquifer (Singhal and Gupta, 2010), with groundwater stored in the fractures, joints, bedding planes and cavities of the rock mass located at the foot of Pizzo Groppera mountain. The aquifer is fed by rainfall and melting snow gathered in the catchment (figure 1).

The model is based on the resolution of two specific water balance equations (continuity equations) respectively referred to the catchment soils and the aquifer, where the output of the catchment soils reservoir feeds the aquifer one. All the terms of water balances are expressed in millimeters.

2.1 Atmospheric driving variables

Lago Azzurro climatic normal (period 1971-2000) is characterised by a yearly mean temperature of 4.0°C, with an average temperature of -3.2°C for January and 12.2°C for July. The precipitation (yearly mean value of 1285 mm), is characterized by a summer maximum and a winter minimum, byproducts of the Alpine effects on the Oceanic regime of Central Europe.

The hydrological model is driven by daily maximum and minimum temperature (t_x , t_n) and daily precipitation (rr). Data referred to the study area (period 1951-2008) were estimated on the base of data gauged by meteorological stations listed in table 1.

The inhomogeneous space distribution of meteorological

Tab. 1 - Meteorological stations used for this work.

Tab. 1 - Stazioni meteorologiche usate per questo lavoro.

Station	Acronym	owner	eight (m asl)	Distance from Lago Azzurro (km)
Chiavenna	CHIV	ex Hydrographic Service	330	11.7
Lago Truzzo	TRUZ	ex Hydrographic Service	2100	7.8
Stuetta	STUE	ex Hydrographic Service	1900	5.2
Monte Spluga lake	SPLUG	ARPA Lombardia	1900	5.7
San Bernardino	SBER	MeteoSwiss (Gts)	1620	14.4
Borghetto	BORG	Università degli Studi di Milano - Laboratorio Valchiavenna	2010	5.7

stations justify the decision to rebuilt Lake temperatures on the base of the available data coming from the station closest to the lake previously homogenized by means of specific altitudinal thermal gradients (Belloni and Pelfini, 1987), avoiding any spatial interpolation.

2.2 Model architecture and parametrization

During the project, specific geological and geomorphological surveys were carried out to gather specific data for model parametrization (people listed in the acknowledgments, personal communications). The lake, with a maximum depth of 8 m, is considered as the product of an aquifer with a cylindrical shape (15 m deep, diameter of 500 m). Since the 75% of the aquifer is occupied by fractured rocks, only the 25% remaining vacuum can be filled with water. The lake is supplied by a catchment of 1.2 km² extending from the lake level (1850 m a.s.l.) until a maximum altitude of 2524 m a.s.l. (figure 1). The catchment is fed by water coming from the melting of snow and from useful rain (rru), this latter estimated subtracting 1 mm to total daily precipitation (Mariani, 2002). The total water input is first stored in the soil reservoir (Mariani and Cola, 2006) and subsequently drained to the aquifer of the lake. The prevalent vegetation of the basin is represented by (i) man managed larch forest (*Larix decidua* L.), (ii) man managed grasslands that during winter are used as ski runs and (iii) spontaneous herbaceous plants growing in



Fig. 1 - Picture of Azzurro lake filled (october 2008) and empty (source: CAI - Lo scarpone, marzo 2007 - date of the picture undeclared).

Fig. 1 - Immagine del Lago Azzurro pieno (ottobre 2008) e vuoto (fonte: CAI - Lo Scarpone, marzo 2007 - data della foto non indicata).

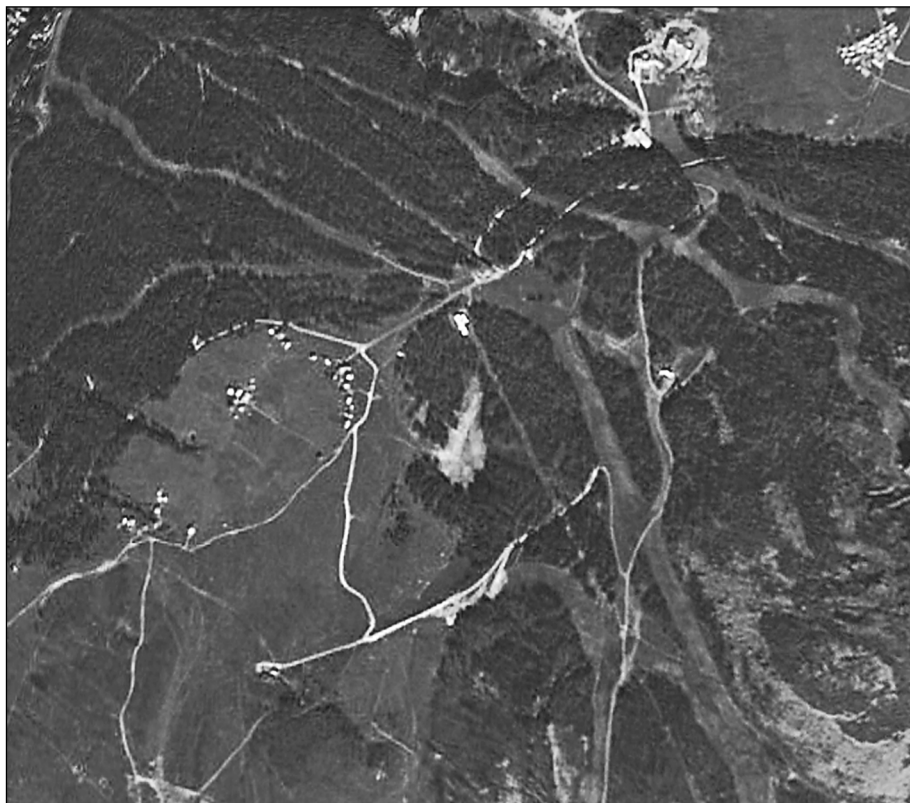


Fig. 2 - In the centre of this summer picture is Lago Azzurro, surrounded by larches. The lake is empty (source: Google Earth - date of the picture undeclared). Also evident are the ski runs (pathways without trees) and the Pizzo Groppera mountain (on the right of the lake).
Fig. 2 - Al centro dell'immagine è il Lago Azzurro, circondato da larici, in un tipico svuotamento estivo (fonte: Google Earth - data della foto non dichiarata). Sono inoltre evidenti i percorsi delle piste da sci (tracciati privi di vegetazione arborea) e il Pizzo Groppera (sulla destra del lago).

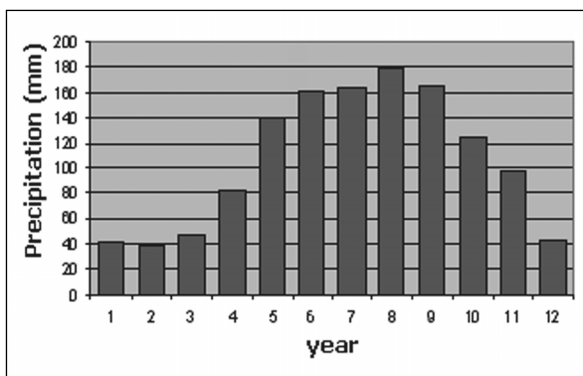


Fig. 3 - Mean precipitation regime of Lago Azzurro (1951-2008).

Fig. 3 - Regime precipitativo medio del Lago Azzurro (1951-2008).

the upper catchment, above the timberline. The change in land use with the increased destination to ski runs has partially changed the natural morphology of the basin and could be evaluated as a possible determinant of the water shortage for the lake.

The catchment soils water balance refers to a total maximum soil water reservoir (difference between field capacity and wilting point - AWC) of 30 mm which represents a reasonable value for the soils of the area (Comolli R., personal communication).

The calculation of evapotranspirational losses is based on a reference daily evapotranspiration (ET₀) estimated with the Hargreaves and Samani method (Hargreaves and Samani, 1985; Allen et al., 1998). Lai (Leaf area index) is simulated with the empirical

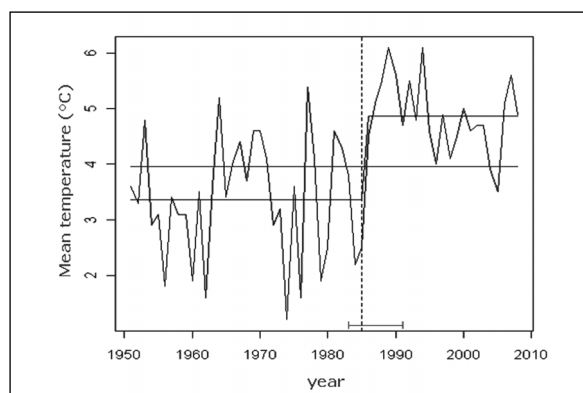


Fig. 4 - Change point analysis on 1951-2008 time series of annual average temperatures (Bai and Perron test of Strucchange library - R Cran). The discontinuity of the 80s is evident (most likely year of the breakpoint is 1985 and with a 95% confidence the breakpoint falls between 1983 and 1991).
Fig. 4 - Analisi di discontinuità eseguita sulla serie storica 1951-2008 delle temperature medie annue (test di Bai e Perron). È evidente la discontinuità degli anni '80 (anno più probabile: 1985; con una confidenza del 95% la discontinuità cade fra il 1983 e il 1991).

algorithm $Lai=0.1+\Sigma Tu/500$ based on the cumulated daily thermal units ΣTu from January the 1st. Daily thermal units Tu are estimated subtracting a suitable minimum cardinal temperature (C_m) from the daily mean temperature Td and negative Tu values are neglected. A standard C_m value of 5° C suitable for many herbaceous and woody species of the Alpine area (Larcher, 1996; Korner, 2006) has been adopted.

The maximum evapotranspiration ETM for the specific plants of the studied area (larch trees and grasses) has been calculated with the formula $ETM = ET0 * kc$ where the empirical relation $kc = Lai/5.5$ was adopted to obtain the kc crop coefficient.

The catchment soil water exceeding field capacity is partly (35%) lost through the deep fractures of the rocks while the remaining feeds the aquifer, modulated by an efficiency coefficient ($eff1$). An $eff1$ value of 1 has been adopted for the period 1951 - 1999 while since 2000 a reduced 0.80 value (people listed in the acknowledgments, personal communications) accounts for the reduction caused by changes in surface morphology occurred in recent years after the land use change (ski runs).

The catchment soils water content WC for the day d (mm) has been modeled by means of the following continuity equation:

$$WC_d = WC_{d-1} + rru + Sm - ETM$$

where the daily snow-melt Sm (mm) is discussed in the next paragraph.

If WC_d exceeds AWC (30 mm), the water excess (We) is used as input for the aquifer and AWC value is assigned to WC_d .

On the other hand the aquifer water level WA for the day d (mm) has been modeled by means of the following continuity equation:

$$WA_d = WA_{d-1} + We - El - Dr - Se$$

The losses of the aquifer included in the water

balance are evaporation from the lake surface El , obtained multiplying $ET0$ for 1.3 (Mariani, 2002), drainage from the lower limit of the aquifer Dr and surface efflux Se , referred to water exceeding the maximum capacity of the aquifer, testified by the presence of an ephemeral emissary of the lake basin, active only during water excess periods. A empirical value of 50 mm is assumed for the daily water drainage Dr (people listed in the acknowledgments, personal communications). This approach was decided in order to overcome the unavailability of hourly data that prevent the adoption of hourly water infiltration approaches like the one based on the Morel-Seytoux' equation (Chahinian et al., 2005) that was formerly intended to be applied.

2.3 Model of snow accumulation and fusion

Snowfall represents about the 40% of the yearly total precipitation at the average altitude of the lake catchment (Cati, 1981).

Rainfall is here considered snowy when the average daily temperatures is below 0 °C. In this case an accumulation of 1 cm of snow per mm of fallen water is adopted. Considering the whole catchment area, since air temperature varies with altitude, also the fraction of snow on total precipitation will vary with it. For this purpose a vertical temperature gradient of -0.5 ° C/100 m of altitude has been adopted with reference to the temperature at the lake level.

Inversely, snow fusion will occur when the daily mean temperature is above 0 °C, with a fusion of 2 mm of liquid water (2 cm of snow) adopted for each °C of temperature exceeding 0 °C.

2.4 Sensitivity analysis

To evaluate the overall system stability of the lake system to climate variability, a sensitivity analysis was applied imposing a constant additive value of

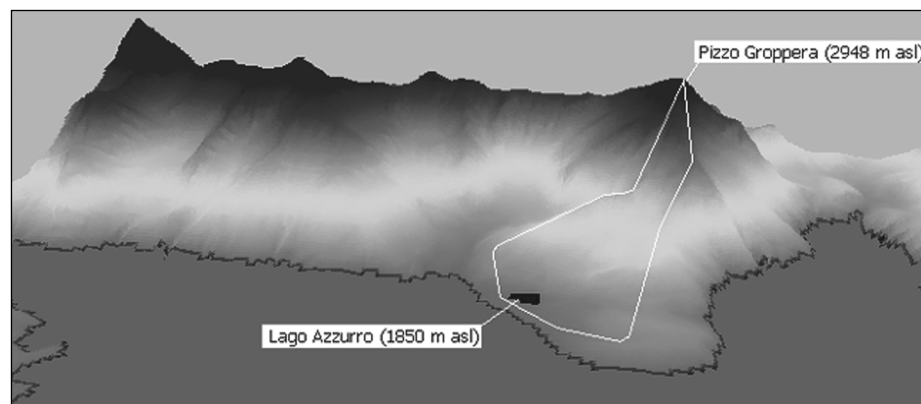


Fig. 5 - 3 D model of the lake and the catchment limits (white line).

The black baseline is the isoline of 2000 m a.s.l.

Fig. 5 - Modello tridimensionale di massima del lago e dei limiti del bacino imbrifero che lo alimenta (linea bianca). L'isolinea dei 2000 m s.l.m. è riportata in nero.

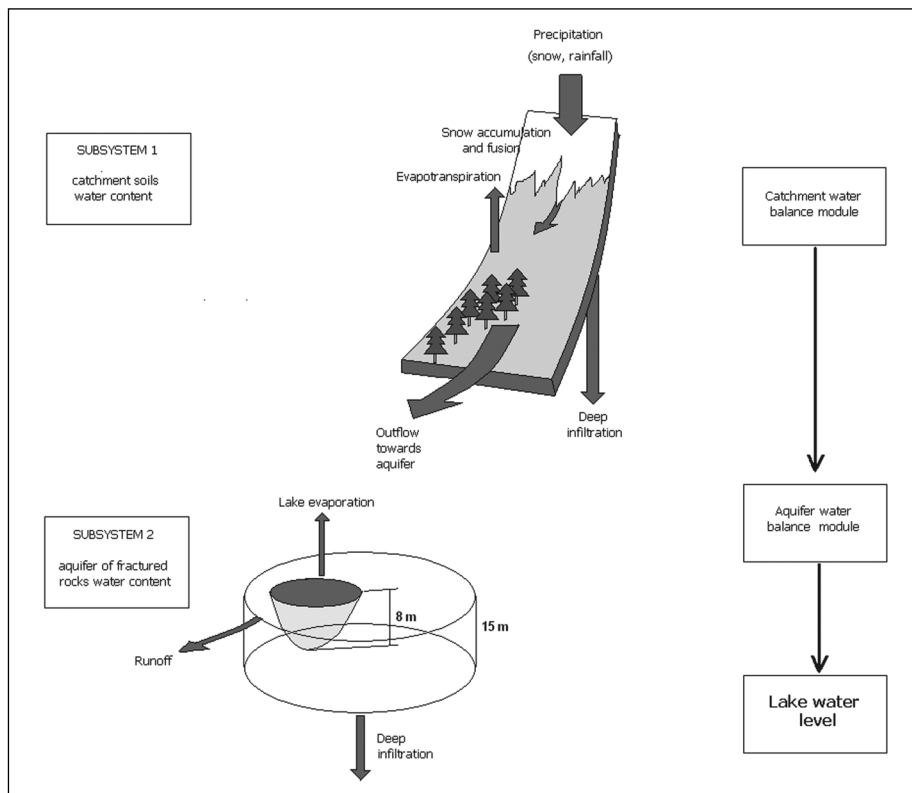


Fig. 6 - Schematic model of water balance of the Lago Azzurro system. The system is composed by two subsystems and a daily water budget is carried out for each of them.

Fig. 6 - Schema del modello di bilancio idrico del sistema che comprende il Lago Azzurro. Il sistema risulta composto da due sottosistemi per ognuno dei quali viene eseguito il bilancio.

+5°C to maximum and minimum daily temperatures and alternatively a constant of 0.9 to daily precipitation. A further sensitivity evaluation was carried out by means of a Monte Carlo approach which details are discussed in the “results” section of the paper.

RESULTS

All model results, obtained with the above described parametrization using daily thermal - pluviometric time series, are daily values referred to the period from 1 January 1951 to 31 December 2008.

Simulation of lake water level is summarized in figure 7. It should be noted that the lake faced periods of complete emptying during 1994, 2004, 2005, 2006 as confirmed by local witnesses. After

the 2004-2006 period, characterized by hot summers with low precipitation, the lake returned to a normal level in 2008 due to the abundant and well distributed summer rainfall.

Figures 8, 9, 10, 11 represent some intermediate variables generated by the model and useful to understand the existing links between physical and biological features of the system.

Some interesting evaluations can be carried out on relations between model results and climate variability. In the 80s of the 20th century, the Euro-Mediterranean climate has experienced the effects of an abrupt change of phase of the Atlantic circulation (Werner et al., 2000). This phenomenon, mainly resulted in an increase of about +1 / +1.5 °C in annual average temperature, is also highlighted

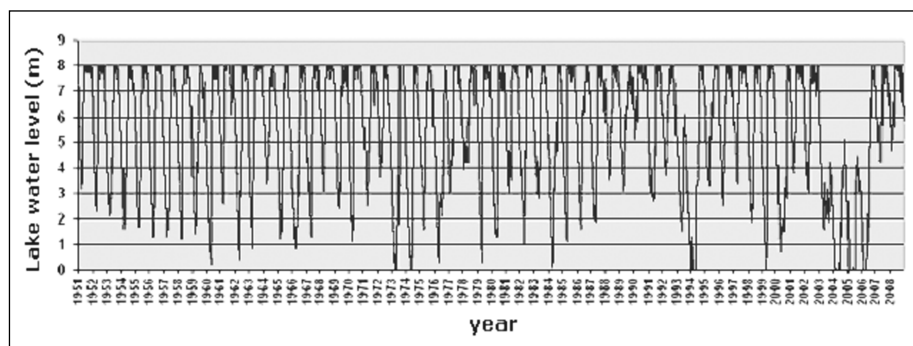


Fig. 7 - Simulation of Lago Azzurro depth (0 m=empty; 8 m=maximum depth).

Fig. 7 - Profondità del Lago Azzurro simulata con il modello di bilancio idrico (0 m=vuoto; 8 m=massima profondità).

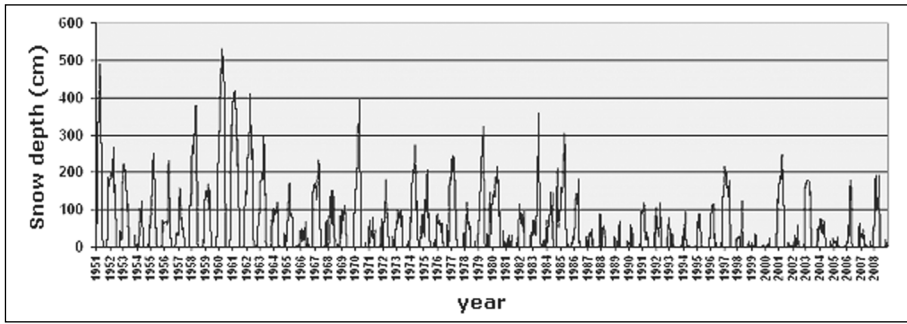


Fig. 8 - Mean snow depth in the lake catchment.
Fig. 8 - Altezza media simulata della neve nel bacino di alimentazione del lago.

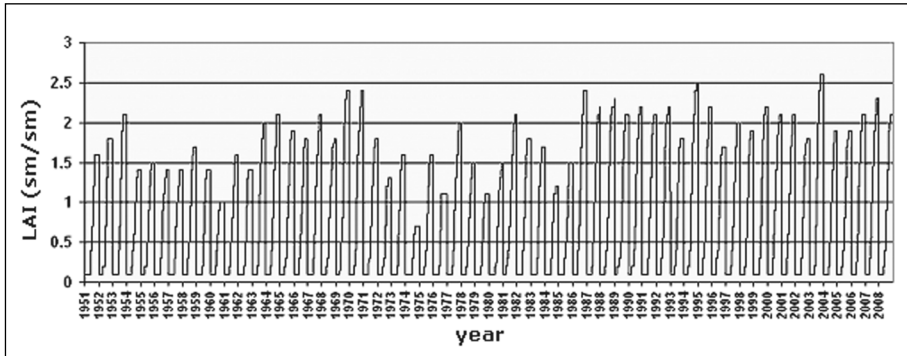


Fig. 9 - LAI behaviour of the lake catchment.
Fig. 9 - Andamento del LAI nel bacino del lago.

by the discontinuity analysis of yearly mean temperature time series of the Lago Azzurro area (figure 4) and is also reflected in some model outputs like snow depth (Figure 8) or LAI values (Figure 9).

A working hypothesis is that the milder climate could have negatively affected the lake water level through increased evapotranspirational losses and reduced precipitation incoming as snow. In order to assess the validity of this hypothesis, the model has been fed with a warmer meteorological scenario (maximum and minimum temperatures 5 °C higher than at present). In these conditions lake water level (Figure 12) is not significantly affected. Conversely, the model shows that precipitation is the main determinant of the lake level since a 10% decrease of daily rainfall gives a significant level reduction (Figure 13).

In the light of the model reaction to precipitation, a sensitivity analysis based on a Montecarlo approach was adopted to evaluate the overall system stability to climate variability. More specifically a random number generator was adopted to produce values characterized by a statistical distribution with mean 1 and standard deviation 0.67 (Gaussian noise). These values were used as multipliers for precipitation data to assess 1000 synthetic daily precipitation time series, used to feed the model to produce 1000 “perturbed” outputs.

The results of the Montecarlo approach are shown in Figure 14. It is interesting to say that after the 80’s climate change, areas between +1 and -1 standard deviation lines have become more wider, showing a decrease of system stability to external perturbations.

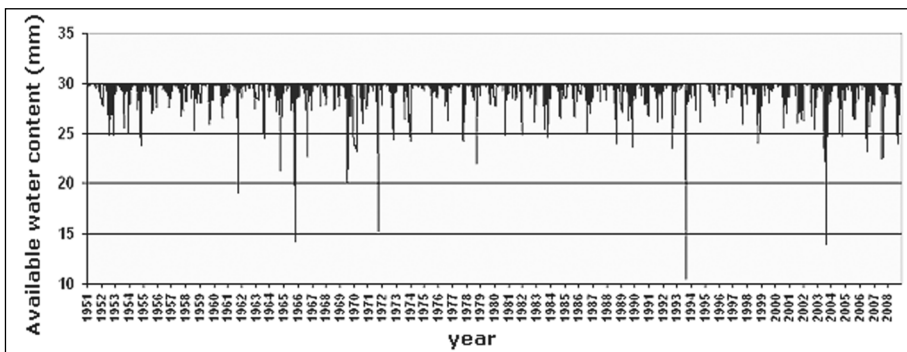


Fig. 10 - Soil water balance of the lake catchment.
Fig. 10 - Bilancio idrico del suolo del bacino simulato dal modello.

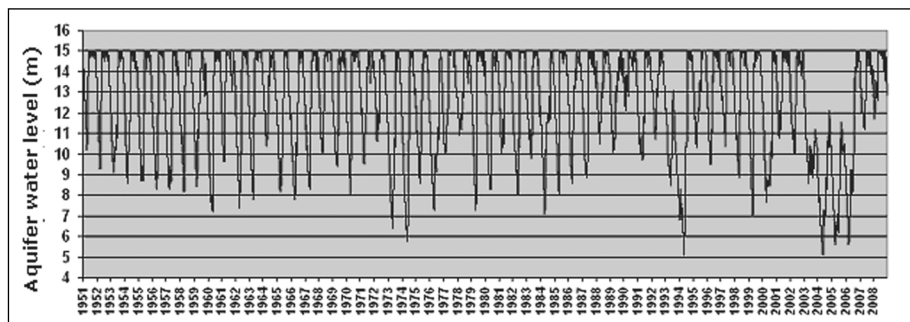


Fig. 11 - Aquifer water level.

Fig. 11 - Livello della falda acquifera del lago simulata dal modello.

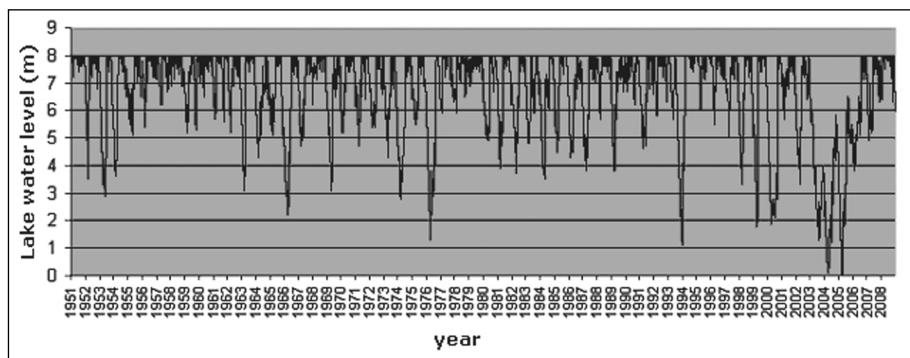


Fig. 12 - Lake water level (scenario with an additive factor of +5°C applied to maximum and minimum daily temperatures).

Fig. 12 - Andamento del livello del lago nello scenario con temperature massime e minime giornaliere aumentate di 5°C.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The model has given some preliminary evaluations about the impacts of climate variability and environmental changes on the level of a small alpine lake. In particular the effect of the climate change of the '80s has been analyzed and discussed and the increased sensitivity of the lake system to meteorological forcings has been highlighted. The possible effect of land use changes (new ski runs) has been also evaluated.

Nevertheless the lack of observational time series of meteorological and hydrological data for the lake area made it impossible to reach conclusions of regulatory type. In this respect it can be said that the availability of such data is mandatory in order to define correct management practices for hydrological systems, as stated for example by Refsgaard and Henriksen (2004). We believe that the future availability of such

data will permit a standard validation process for our modeling approach.

ACKNOWLEDGMENTS

For information about the Lago Azzurro and the surrounding territory we wish to thank Alfredo Bini, Alfredo Lozej, Andrea Merri, and Marco Masetti (Università degli Studi di Milano – Dipartimento Scienze della Terra), Alessio Conforto (Università degli Studi di Milano – Stazione Valchiavenna), Mirco Boschetti and Mauro Musanti (IREA CNR), Roberto De Franco, Giancarlo Biella, Grazie Caielli, Graziano Boniolo, Antonio Morrone, Adelmo Corsi and Barbara Aldighieri (IDPA – CNR).

REFERENCES

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Evapotranspiration - Guidelines for computing

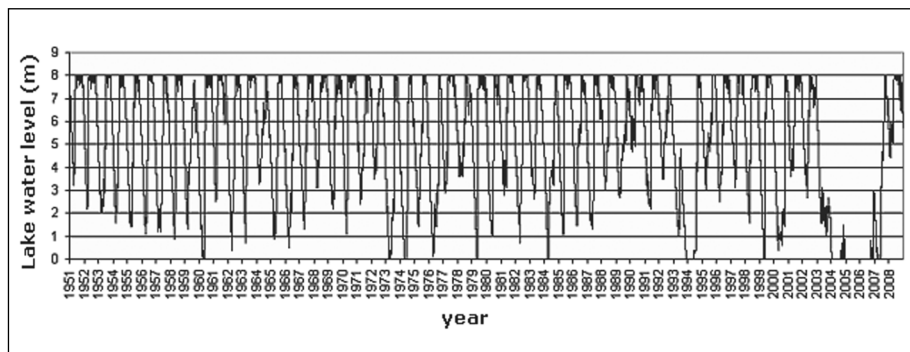


Fig. 13 - Lake water level (scenario with a multiplication factor of 0.90 applied to daily precipitation).

Fig. 13 - Andamento della falda diminuendo la precipitazione giornaliera del 10%.

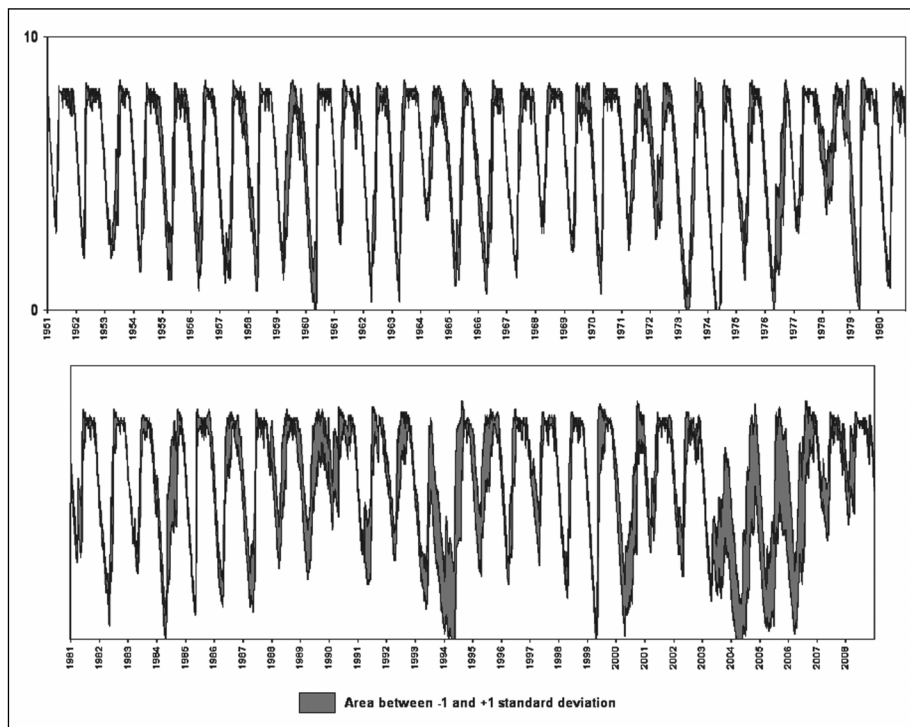


Fig. 14 - Diagram of the lake depth for the period 1951-2008 generated with a Monte Carlo approach. The wideness of the area between the mean plus one standard deviation and the mean minus one standard deviation represents a measure of the system stability with respect to external forcings.

Fig. 14 - Diagramma dell'altezza del lago per il periodo 1951-2008 generato con un approccio tipo Montecarlo (vedere testo). L'ampiezza della zona compresa tra media più una deviazione standard e media meno una deviazione standard rappresenta una misura di stabilità del sistema rispetto alle forzanti esterne.

crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome (<http://www.fao.org/docrep>)

Barry R.G., 1992. Mountain weather and climate. 2nd edition, Routledge, London, 404 pp.

Belloni S, Pelfini M., 1987. Il gradiente termico in Lombardia. *Acqua - Aria*, 4: 441-447.

Cati L., 1981. *Idrografia e idrologia del Po*. Poligrafico dello Stato, 310 pp.

Chahinian N., Moussa R., Andrieux P., Voltz M., 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology* 306: 191-214.

Hargreaves, G.H., Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engrg. in Agric.* 1: 96-99.

Larcher W., 1995. *Physiological plant ecology*. Springer, 506 pp.

Mariani L., 2002 *Agrometeorologia*. Clesav, Milano, 292 pp.

Mariani L., Cola G., 2006. *Agrometeorologia ed esigenze idriche delle colture*. *Italian Journal of Agronomy*, 3: 587-602.

Refsgaard J.C., Henriksen H.J., 2004. *Modelling guidelines-terminology and guiding principles*. *Advances in Water Resources* 27: 71-82.

Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., 2010. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Second Edition, Springer, 408 pp.

Werner, P. C., Gerstengarbe F.W., Fraedrich K, Oesterle K. Recent climate change in the North Atlantic/European sector. *International Journal of Climatology*, Vol. 20, Issue 5, 2000: 463-471.

Building of national database on water volume consumption for rice cultivation

Filiberto Altobelli^{1*}, Flavio Lupia¹, Silvia Vanino¹, Iraj Namdarian¹

Abstract: *This paper reports the preliminary results obtained through a survey on the average volume of water per hectare used for growing rice on national scale. The study aims at building of a national database at municipality scale, of the average water volume used for the growing cycle of the crop. The methodology is based on the collection, harmonization and extrapolation of data that have different information sources and spatial resolutions (farms, irrigation consortia, counties). Considering that the data take into account the influence of cropping techniques and territorial characteristics on the irrigation water volume used for rice, the database could be used to allocate the water consumption need for irrigation at farm level for cultivation of rice in a more realistic way than deterministic simulation models. This work was developed within a project called MARSALa (Modelling Approach for irrigation water eStimation at fArm Level), founded by Eurostat, focused on the development of a calculation model for the estimation of the irrigation consumption at farm level.*

Keyword: irrigation

Riassunto: *Il contributo riporta i risultati preliminari di un'indagine sul volume medio ad ettaro di acqua impiegato per la coltivazione del riso a scala nazionale. Lo studio è finalizzato alla costruzione di un database nazionale, con risoluzione comunale, sui volumi di acqua impiegati mediamente nel ciclo di sviluppo della coltura. La metodologia per la realizzazione del database è basata sulla raccolta, armonizzazione ed estrapolazione di dati che hanno fonti informative e risoluzione diverse (aziendale, consortile e provinciale). Il database, rispecchiando le caratteristiche territoriali e le tecniche agronomiche adottate, potrà essere utilizzato per imputare i consumi irrigui aziendali per la coltura del riso in maniera più realistica rispetto a quella realizzabile con modelli deterministici di simulazione. Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto MARSALa (Modelling Approach for irrigation water eStimation at fArm Level) che ha l'obiettivo di realizzare un modello di calcolo per la stima dei consumi irrigui a livello di singola azienda agricola.*

Parole chiave: irrigazione, volumi irrigui

INTRODUCTION

Italy is the first European producer of rice, exceeding by extension all other European countries, with highest latitude of cultivation area in the world (G. Luppi et al., 2000). Rice cultivated area in 2009 was about 238,000 hectares, while the total raw production reached 1,500,000 tons. Generally the rice cultivated areas reflect the large water availability and the efficiency of water delivery network.

In Italy the rice crop sector is traditionally made in the Po valley, Center – West in the left bank of the Po river. However, other regions such as Emilia Romagna, Veneto, Friuli Venezia Giulia, Tuscany, Sardinia and Calabria present interesting areas where rice is cultivated.

Irrigation is done mainly by flooding irrigation therefore soil preparation before planting is a crucial step of the rice cultivation. Two types of preparation for rice fields can be found in Italy depending on soil characteristics, topography, and

size and distribution of farm parcels: one is widespread in the western Po Valley (Piemonte and Lombardia), the other in the eastern Po Valley (Mantova province and in the provinces of Emilia Romagna and Veneto). The first one is typical of farms with small extension and with parcel slope not negligible. In this case the area of the cultivation units, so called rooms, is relatively small (2-3 Ha or less). The second one is diffused in Veneto and Emilia Romagna region where rice parcels have large surfaces (10-12 Ha on average). In this case field are naturally flat and are bordered by large banks also used as dirt roads used as access to cultivated fields.

There are two main irrigation techniques: flooding and dry condition. These two irrigation techniques are often applied with several variations strongly affecting the management of an irrigated district. Flooding is traditionally used in the whole rice territory of Padana Plain. It consists in covering the cultivated field with a water stratum having a depth ranging from 5 to 20 cm and lasting for the majority of the growing cycle (generally from the end of March till the end of October depending on the

^{1*} Corresponding author e-mail: altobelli@inea.it
Istituto Nazionale di Economia Agraria

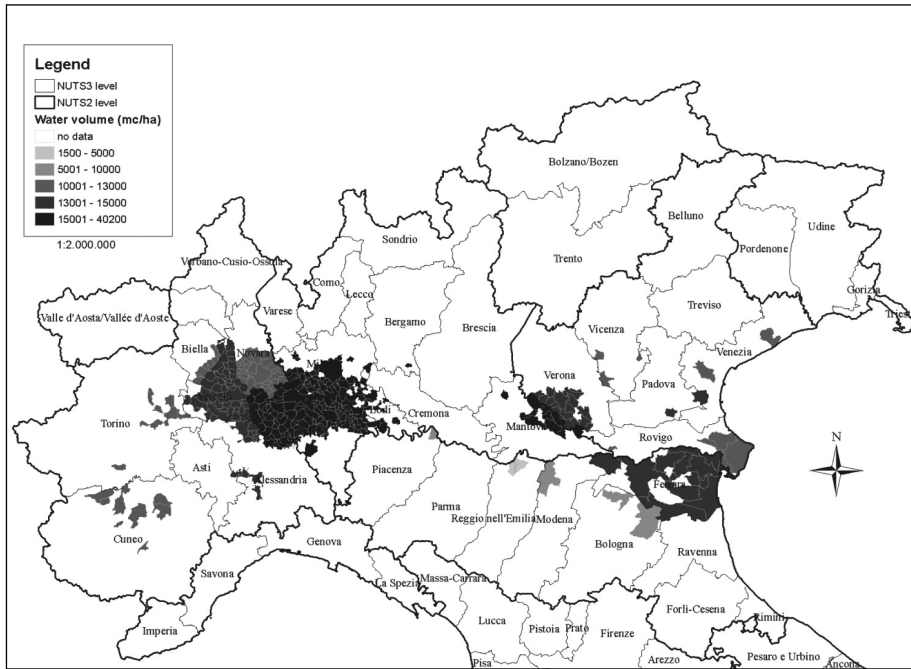


Fig. 1 - Average volumes of irrigation water applied for rice cultivation in Northern Italy, from INEA.

Fig. 1 - Volumi medi di acqua utilizzati per l'irrigazione del riso nel Nord Italia, da INEA.

variety of rice). Traditionally the seeding is disperse over a field already flooded but, in the recent years is being used the seeding on the dry field. In this case the flooding can be immediately after seeding, or in a later phase once herbicides have been spread.

Rice cultivated with dry condition is based on a periodical irrigation where the cultivation rooms are flooded with a water depth of 5-10 cm left to infiltrate till the complete absorption. This allows the full supply of water in the root zone. The length of flooding and drying periods is different, this depends on a function of soil texture, while rainfall can reduce the number of irrigations required to complete the growing cycle. Rice can be cultivated without flooding as other cereals only where the pluviometric regime reaches a minimum threshold of 900-1000 mm in an interval of 3-5 months. The optimal thermal conditions are between 18 and 33 °C.

Given the economic importance of rice, peculiar water needs and taking into account the objective of the proposed model by MARSALa in order to estimate the irrigation volume used at municipalities scale (Lupia et al., 2009), the following study was carried out to build a national database which local resolution of data, the volume of water used for the growing cycle of the crop. The need to build a national database was justified by, first of all, the lack of soil data and lack of high resolution climate data for rice –

cultivating areas that allow accurate simulations through the classical models.

The database will be used to assign the water consumption of rice crop to farm parcel surveyed by the agricultural census 2010 (ISTAT).

MATERIALS AND METHODS

The cropping techniques and territorial characteristics influence the volumes of the irrigation water used for rice. Therefore a different approach was followed for the comparison of the results.

The approach consisted on the creation of a national database of the average irrigation water volumes (measured in m³/Ha) used for rice cultivation and by producing data at municipality level (LAU-2). This was considered an optimal solution both in terms of software computational efficiency and reliability and accuracy of the estimated values.

Database creation was done through a pilot survey for the Italian provinces (NUTS 3¹) where rice is cultivated. The activity was divided into the following steps:

1. Inventory of the municipalities where rice is cultivated;
2. Data collection on the irrigation water consumption through surveys on different subjects (Irrigation Cosortia, FADN²);
3. Imputation of an average irrigation water

Tab. 1 - Structure of the national database on the irrigation water volumes used for rice cultivation.

Tab. 1 - Estratto Database Nazionale sui volumi di acqua (m³/ha) utilizzati per la coltivazione del riso.

Regions	Provinces	Average irrigation water (m ³ /ha)	Source ^v
Veneto	Verona	15000	1
Veneto	Venezia	10500	2
Toscana	Siena	1500	4
Lombardia	Pavia	40000	2
Emilia Romagna	Bologna	9000	6

1: data acquired at provincial level provided by technicians of Irrigation Consortia.

2: data acquired at Irrigation Consortia level provided by technicians.

3: data acquired at municipality level provided by and FADN enumerators.

4: data acquired at farm level provided by technicians of Irrigation Consortia and FADN surveyors.

5: data acquired at irrigation district level provided by technicians of FADN enumerators.

6: data extrapolated as average of the values of the nearby provinces with similar characteristics.

consumption volume to each municipality and creation of the database.

1. The municipality was identified through the database provided by the Ente Nazionale Risi³, referring to the year 2009. The mentioned database was considered reliable since all farmers cultivating rice are obliged to communicate annually the cultivated areas to the Ente Nazionale Risi. The database contains surfaces and location (in terms of municipality and province) of rice cultivated areas. The allocation of a cultivated area to a municipality is based on the geographical location of the farm centre rather than the actual location of rice parcels.

2. The municipalities were associated to the areas served by irrigation consortia in order to identify the main actors dealing with irrigation management to be considered as potential respondent to the survey.

The data collection for irrigation water consumption was performed by interviewing both Irrigation Consortia's technicians having an extensive knowledge of the areas served by the Irrigation Consortia and of the water consumptions as well as FADN's enumerators operating in the provinces where rice cultivation was identified. All the values collected had to be considered as expert's evaluation. Sardinia was treated differently by exploiting more accurate

data coming directly from measurement devices available inside the irrigation district managed by the oristanese Irrigation Consortia.

3. The collected data have different spatial resolution ranging from the data measured at farm level by measurement devices (Sardinia) to data estimated by experts at municipality, Irrigation Consortia or province level. The collected information was processed in order to build a national database by extrapolating the data at municipality level.

For the municipalities where it was not possible to acquire any data through the interviews, the average water consumption of the relative province or of the near provinces with similar characteristics was attributed.

Tab. 1 shows the structure of the database. It contains the administrative reference of the areas with rice cultivation (region, province and

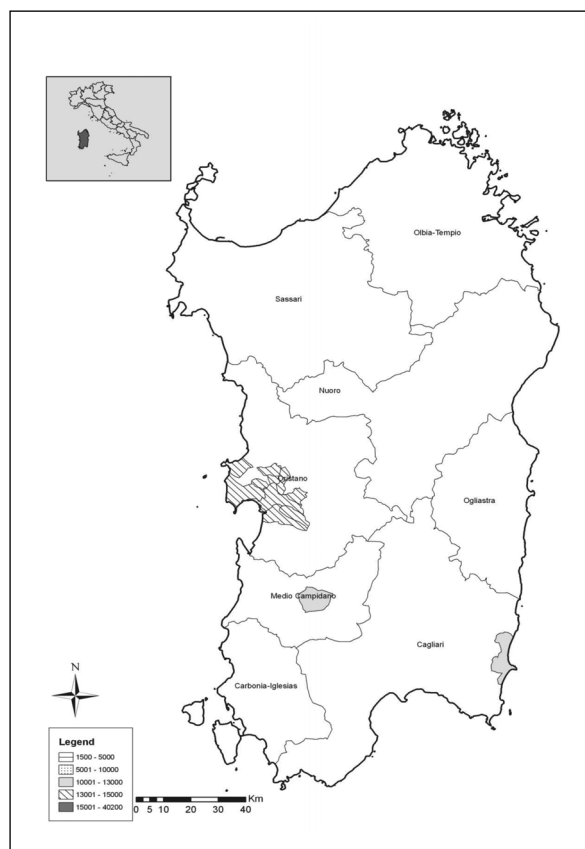


Fig. 2 - Average volumes of irrigation water applied for rice cultivation in Sardegna region, from INEA.

Fig. 2 - Volumi medi di acqua utilizzati per l'irrigazione del riso in Sardegna, da INEA.

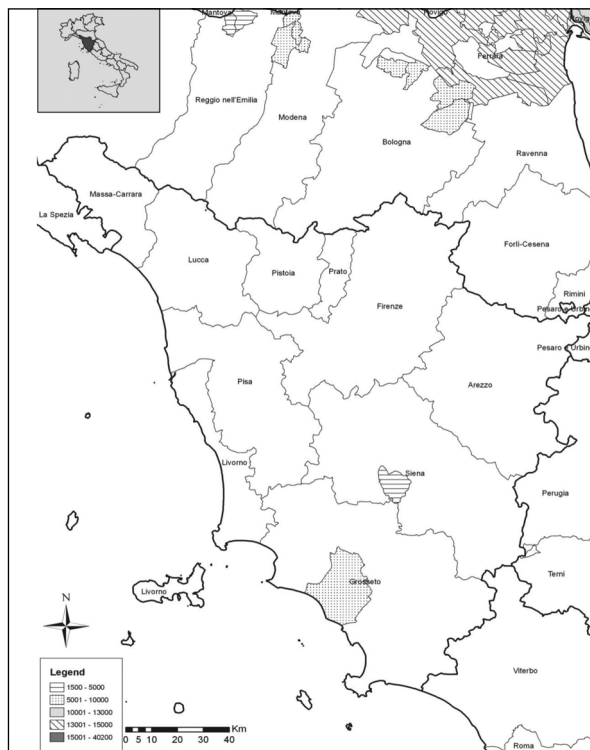


Fig. 3 - Average volumes of irrigation water applied for rice cultivation in Toscana region, from INEA.

Fig. 3 - Volumi medi di acqua utilizzati per l'irrigazione del riso in Toscana, da INEA.

municipality), the average water consumption extrapolated at municipality level and a code indicating the source of the information. The values show water consumption varying among municipalities from a minimum of 1,500 m³/Ha in Tuscany to a maximum of 40,200 m³/Ha in Lombardia. The strong variability can be explained by the diversity of soil, cultivar and irrigation techniques (Fig. 1; Fig. 2; Fig. 3).

CONCLUSIONS

The database created can be considered a valuable tool for carrying out analysis of the spatial distribution of the water used for rice cropping.

In addition the knowledge of the water consumption at territorial level is an useful tool for water managers, especially when water shortage requires a precise allocation among the different users.

NOTE

¹ The Nomenclature of territorial units for statistics, abbreviated as NUTS. Nuts 2 municipalities, Nuts 3 provinces

² Farm Accountancy Data Network

³ Italian official institute addressed in collecting national data on rice cultivated areas about the surfaces used for rice cultivation

BIBLIOGRAFIA

Luppi G., Finassi A., Cavallero A., 2000. *Coltivazioni erbacee cereali e proteaginose*. Patron Editore. Bologna, 410 pp.

Lupia F., Mateos L., De Santis F., Altobelli F., Salvati L., Tersigli S., Ramberti S., 2009. *Un modello di stima dei volumi irrigui aziendali. L'esperienza del progetto Marsala*. Proceedings of 12° Atti del convegno Nazionale di Agrometeorologia AIAM 2009 "Clima e agricoltura, strategie di adattamento e mitigazione", Sassari.

Satyanarayana A. T.M. Thiyagarajan Uphoff Norman, (2007) *Opportunities for water saving with higher yield from the system of rice intensification*. *Irrig Sci* 25: 29-115.

DISCLAIMER

The MARSALa project is supported by Eurostat Grant Programme 2008. The sole responsibility for the content of this paper lies with the authors. It does not represent the opinion of the Community. The European Commission is not responsible for any use that may be made of the information contained therein.