

## Prototipo di un sistema di monitoraggio e previsione della siccità in Toscana

Ramona Magno (\*), Luca Angeli (\*), Giulio Betti (\*), Marta Chiesi (\*\*), Tiziana De Filippis (\*\*),  
Luca Fibbi (\*), Fabio Maselli (\*\*), Massimiliano Pasqui (\*\*), Leandro Rocchi (\*\*),  
Federica Zabini (\*), Bernardo Gozzini (\*)

(\*) Consorzio LaMMA, Via Madonna del Piano 10 - 50019 Sesto Fiorentino (FI), +39 055 4483011, + 39 055 404483,  
magno@lamma.rete.toscana.it

(\*\*) CNR-IBIMET, Via G. Caproni 8 - 50145 Firenze

### Riassunto

Scopo del presente articolo è illustrare il meccanismo proattivo ed integrato di monitoraggio e previsione della siccità che il Consorzio LaMMA e l'Istituto di Biometeorologia (CNR-IBIMET) hanno implementato e stanno validando ed adattando per la regione Toscana, nell'intento di ridurre la *gap* esistente fra il verificarsi di un evento siccitoso e le risposte degli utenti finali nel gestire le emergenze legate al protrarsi del fenomeno, fornendo informazioni e mappe in tempo quasi reale.

Il *framework* si compone di tre parti: il sistema di monitoraggio, basato su un set di indici di siccità legati a dati a terra di pioggia e a indici derivati da immagini satellitari; il sistema di previsione stagionale dei parametri meteorologici pioggia e temperatura e dell'indice *SPI-Standardized Precipitation Index* a tre mesi; il sistema di diffusione delle elaborazioni ed analisi basato sull'uso spinto del *web*. Vengono poi descritte le ulteriori azioni in atto e i possibili sviluppi futuri per integrare e potenziare l'operatività del servizio.

### Abstract

Aim of this paper is to illustrate the proactive, integrated drought monitoring and seasonal forecasting mechanism that the LaMMA Consortium and the Institute of Biometeorology (IBIMET-CNR) are implementing and adjusting for Tuscany region to fill the temporal gap between the development of a dry period and the response of final users in managing drought-related emergencies, by delivering maps and information in quasi-real time. The framework is constituted of three parts: the monitoring system, based on a set of drought indices both from rainy gauges and from remote sensing; the seasonal forecast system, predicting precipitation and temperature parameters and SPI index at three months; the web based system of final products dissemination. In the last part of the paper are described ongoing implementations and possible future developments, useful to integrate and enhance the efficiency of the operational service.

### Introduzione

Recenti analisi dei trend climatici in Italia, ed in particolar modo in Toscana, stanno evidenziando, negli ultimi anni, un aumento del numero, intensità e durata degli eventi estremi ed in particolare dei fenomeni siccitosi. Il periodo 2011-2012 appena trascorso ne è l'ultimo drammatico esempio, dimostratosi il più intenso degli ultimi 60 anni. Rispetto ad altri eventi climatici estremi la siccità è un fenomeno più complesso e strisciante, caratterizzato da un'evoluzione lenta e spesso prolungata; inoltre il suo inizio è generalmente difficile da determinare, la sua intensità ed estensione spaziale sono estremamente variabili e gli impatti sull'ambiente ed il territorio possono sorgere anche dopo mesi e persistere oltre il termine dell'evento (Vincente-Serrano et al., 2012).

È necessario affrontare questi fenomeni climatici non nella loro dimensione contingente, ma attraverso una programmazione di lungo periodo che mantenga, comunque, un equilibrio tra conservazione, risparmio e sviluppo (cercando di ridurre il divario esistente tra disponibilità e richiesta d'acqua), con la definizione di sistemi di "gestione degli eventi" e tutelando la naturale capacità degli ecosistemi di mitigazione degli impatti.

Per studiare il fenomeno e la sua evoluzione sono stati sviluppati diversi indici, basati su parametri climatici e sui settori maggiormente affetti, ma nessuno di essi, da solo, è completamente efficace a determinare e descrivere l'evento. Al contrario un *framework* complesso che includa un *set* di indici basati sia su misure terra che da satellite in grado di fornire un monitoraggio, ma anche delle previsioni a medio-lungo termine, può rivelarsi la via più affidabile per identificare l'occorrenza ed il *trend* di un episodio siccitoso e fornire informazioni in tempi brevi. Nonostante questi eventi estremi richiedano azioni efficaci, infatti, i decisori politici ed i principali utenti della risorsa idrica mostrano spesso scarsa tempestività quando un episodio siccitoso si verifica, a causa della mancanza di strumenti e prodotti onnicomprensivi, ben organizzati, semplici e di rapida diffusione, in grado di fornire informazioni utili a gestire tali emergenze e ridurre gli impatti.

Al fine di colmare questa esigenza, il Consorzio LaMMA e l'IBIMET-CNR hanno implementato un sistema per il monitoraggio in quasi-*real time* e la previsione a medio-lungo termine della siccità in Toscana. L'utilizzo incrociato di dati meteo-climatici derivanti da stazioni a terra, satellite e modellistica per l'elaborazione di una serie di indici idonei al territorio toscano, può essere un approccio su cui puntare per analizzare, monitorare e prevedere l'occorrenza e l'intensificazione nello spazio e nel tempo di fenomeni siccitosi e fornire strumenti operativi efficaci di mitigazione delle avversità meteorologiche estreme. Tale sistema, infatti, prevede, sfruttando le potenzialità del *web*, la diffusione periodica di informazioni georiferite circa le aree affette dal fenomeno e la sua evoluzione.

### La catena operativa

La catena operativa implementata per calcolare gli indici di siccità e fornire i prodotti finali per il monitoraggio e la previsione del fenomeno in Toscana (Figura 1) si basa su procedure semi-automatiche. Le diverse parti che compongono il sistema sono descritte di seguito.

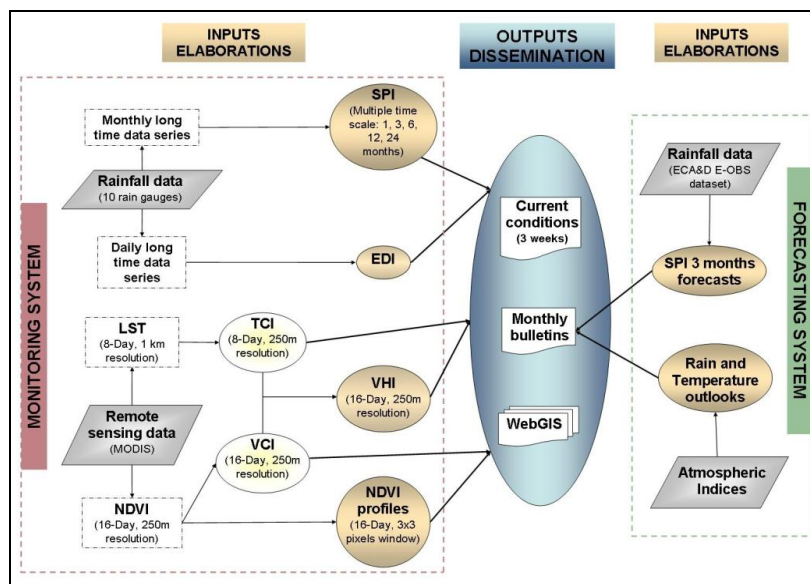


Figura 1. Catena operativa del sistema di monitoraggio e previsione della siccità.

### Il sistema di monitoraggio (struttura e criticità)

Il sistema di monitoraggio, sviluppato integrando lo stato dell'arte scientifico in materia di siccità con le tecnologie e gli strumenti più moderni, si basa su un *set* di indici in parte basati sulla precipitazione misurata da stazioni a terra ed in parte derivati da indici elaborati di immagini satellitari. La scelta degli indici ha considerato e seguito alcuni criteri: 1) distinzione di diversi tipi di siccità; 2) disponibilità in tempo reale e consistenza pregressa dei dati; 3) caratteristiche geofisiche regionali; 4) variabilità spazio-temporale del fenomeno; 5) tipologie di utenti finali.

Fra i diversi indici basati sulla pioggia prodotti per monitorare l'occorrenza di un evento siccitoso e la sua evoluzione, lo *Standardized Precipitation Index* (SPI) (McKee et al., 1993) e l'*Effective Drought Index* (EDI) (Byun et al., 1999) sono stati scelti perché ritenuti migliori (Morid et al., 2006) in quanto riescono ad identificare l'occorrenza di siccità a scale temporali differenti, la sua durata e variabilità, con un dettaglio dal mensile (SPI) al giornaliero (EDI), riuscendo ad evidenziare l'efficacia o meno di una precipitazione per il possibile ripristino di condizioni normali. Attualmente solo poche stazioni pluviometriche rispondono ai requisiti necessari all'elaborazione dei due indici, ovvero avere una serie storica sufficientemente lunga (almeno dal 1950) da permettere il calcolo di una media climatologica di riferimento robusta ed al contempo dati aggiornati in continuo. Lo SPI permette di tracciare periodi secchi/umidi a diverse scale temporali (ad esempio 1, 3, 6, 12, 24 mesi), corrispondenti a diverse tipologie di siccità, permettendo la comparazione fra zone geograficamente anche molto diverse, come possono essere le costiere meridionali e le appenniniche toscane. Inoltre il confronto fra valori di medio e lungo periodo (SPI 3 vs SPI 12) può evitare eventuali errate interpretazioni relative alla durata di siccità prolungate che possono venire interrotte da periodi di temporanea normalità o surplus, com'è accaduto durante l'intenso evento del 2012. L'indice EDI, invece, è stato scelto perché, grazie al suo *step* temporale giornaliero, non solo è efficace nell'individuare spazialmente l'*onset* di un episodio siccitoso (Morid et al., 2006), ma permette di evidenziare con un dettaglio maggiore l'influenza di ogni singolo evento di pioggia sul recupero del deficit in atto.

Gli indici derivati dall'elaborazione di immagini satellitari scelti per il monitoraggio della siccità analizzano in maniera indiretta il fenomeno, in quanto si focalizzano sulla risposta della vegetazione, sia forestale che agricola, a stress di natura termica o legati all'umidità del suolo. Hanno inoltre la non secondaria caratteristica di garantire una copertura spaziale completa su tutto il territorio in esame. Di contro, però, possono essere utilizzati solo in periodi dell'anno con scarsa copertura nuvolosa, quindi nel nostro caso, essenzialmente in primavera-estate.

Nel dettaglio, l'approccio proposto si fonda sulla combinazione dei due indici satellitari derivati *Temperature Condition Index* (TCI) e *Vegetation Condition Index* (VCI), basati rispettivamente sulla *Land Surface Temperature* (LST) e sul *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Per il calcolo del TCI (Kogan, 1995) invece dei dati di temperatura di brillantezza, si è scelto di utilizzare dati di LST relativi al sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) del satellite Terra (EOS AM), mediati su 8 giorni e con risoluzione di 1km (*MOD11A2, collection v005*).

$$TCI_i = ((LST_{max} - LST_i) / (LST_{max} - LST_{min})) \cdot 100$$

dove  $LST_i$ ,  $LST_{min}$  e  $LST_{max}$  sono rispettivamente gli ultimi valori a 8 giorni di LST disponibili e i valori di minimo e massimo assoluto di LST relativi allo stesso periodo di 8 giorni lungo l'intera serie storica, dal 2000 al 2013. I valori di TCI forniscono informazioni relative a stress della vegetazione legati alle alte temperature.

Il VCI (Kogan, 1995), basato su dati NDVI derivanti da immagini MODIS Terra mediate su 16 giorni e con risoluzione di 250m (*MOD13Q1, collection v005*) indica dinamiche della vegetazione che riflettono le condizioni di umidità del suolo.

Prima dell'elaborazione dell'indice le immagini NDVI vengono pre-processate per correggere eventuali disturbi atmosferici residui (Maselli et al., 2009).

$$VCI_i = ((NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})) \cdot 100$$

Dove  $NDVI_i$ ,  $NDVI_{min}$  e  $NDVI_{max}$  sono rispettivamente gli ultimi valori a 16 giorni di NDVI disponibili e i valori di minimo e massimo assoluto di NDVI relativi allo stesso periodo di 16 giorni lungo l'intera serie storica, dal 2000 al 2013.

Le immagini di LST e NDVI sono scaricate dal website della NASA ([https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access/data\\_pool](https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool)) a partire dal 2000 fino al presente, con un ritardo temporale di rilascio delle ultime immagini disponibili di circa 10-15 giorni.

Attraverso delle procedure implementate in ambiente GIS le mappe di TCI subiscono un processo di *downscaling* spaziale da 1km a 250m ed uno di media temporale a 16 giorni in modo da poterle successivamente combinare con le mappe di VCI e dare origine a mappe comprensive finali di Vegetation Health Index (VHI) (Kogan, 1995).

$$VHI = a \cdot VCI + b \cdot TCI$$

Dove  $a$  e  $b$  sono coefficienti che quantificano il contributo del VCI e TCI nella risposta della vegetazione e che attualmente hanno lo stesso peso (0.5).

Il VHI (Figura 2), oltre ad integrare le informazioni fornite dai due indici pluviometrici SPI e EDI, mette in luce, nella fase di monitoraggio della stagione vegetativa forestale e delle colture agricole, quando la pianta è nel pieno dell'attività di crescita e sfrutta le riserve idriche accumulate durante i mesi freddi, l'inizio e l'evoluzione degli effetti di un'eventuale siccità.

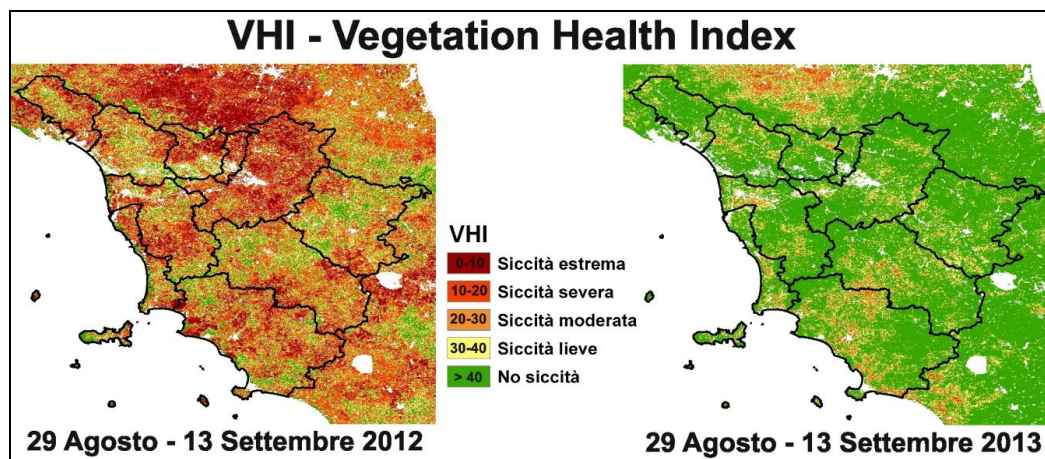


Figura 2. Indice VHI del periodo 29 Agosto - 13 Settembre: 2012 vs 2013.

Le elaborazioni ed analisi di più di un anno di dati prodotti hanno potuto mettere in luce come l'adozione pressoché tal quale di questi indici da satellite, nati per zone più aride, non riesca ad esprimere la realtà che si presenta in un territorio geomorfologicamente, vegetazionalmente e climaticamente complesso come quello toscano. In particolare i valori di VCI e quindi di VHI, se in condizioni di eventi estremi intensi e prolungati, come la siccità del 2011-2012, identificano abbastanza bene le aree maggiormente affette dal fenomeno, in periodi di normalità o addirittura surplus di pioggia, come in questa prima metà del 2013, possono mostrare zone in stress più o meno accentuato per via di eventuali valori di NDVI che possono risultare, anche se di poco, i più bassi della serie storica 2000-2013. Sono, quindi, allo studio dei metodi di calibrazione che permettano di adattare meglio i due indici alle caratteristiche toscane.

### La stima dell'evapotraspirazione reale (ETR) per un bilancio idrico semplificato

L'evapotraspirazione reale ( $ET_A$ ) è un parametro fondamentale per la gestione delle risorse idriche presenti sul territorio. La necessità di lavorare su ampia scala richiede la messa a punto di metodologie che possano essere operative, facili da applicare e veloci nel restituire stime credibili di

$ET_A$ . A tale scopo sono state utilizzate le immagini NDVI del sensore *MODIS Terra*, disponibili alla risoluzione spaziale di 250 m e temporale di 16 giorni.

Classicamente l' $ET_A$  viene calcolata a partire dall'evapotraspirazione potenziale ( $ET_0$ ) utilizzando i coefficienti culturali ( $K_c$ ) tipici per le diverse colture e condizioni ambientali (es. metodo FAO). Alternativamente, basandosi sulla teoria di ottimizzazione delle risorse in base alla quale le piante adattano la loro densità fogliare per rispondere alla capacità dell'ambiente di supportare traspirazione e fotosintesi, è stato proposto l'utilizzo di indicatori di biomassa verde combinati con l' $ET_0$  (es. Glenn et al., 2010):

$$ET_A = ET_0 f(VI)$$

dove  $f(VI)$  è una trasformazione lineare o non lineare di vari indici di vegetazione, il più comune dei quali è l'NDVI.

Questo metodo è stato modificato per migliorare la considerazione degli effetti dello stress idrico a breve termine (Chiesi et al., 2013). In questo contesto si ipotizza di scindere l' $ET_A$  nei due contributi, traspirazione ed evaporazione, dovuti rispettivamente alla biomassa verde ed al suolo. Si introducono, inoltre, dei fattori di correzione,  $C_{ws}$  (*water stress Correction factor*) ed  $AW$  (*Available Water*), capaci di simulare l'effetto dello stress idrico a breve termine in ambienti forestali e non (Maselli et al., 2009). In sintesi, il modello modificato ("metodo NDVI-Cws") stima l' $ET_A$  di una qualunque superficie vegetata come:

$$ET_A = ET_0 \cdot (FVC \cdot K_{c_{veg}} \cdot C_{ws} + (1 - FVC) \cdot K_{c_{soil}} \cdot AW)$$

dove  $ET_0$  viene calcolata come proposto da Jensen e Haise (1963),  $FVC$  è la *Fractional Vegetation Cover* derivata da NDVI,  $C_{ws}$  e  $AW$  sono i fattori di stress idrico per la vegetazione ed il suolo nudo, e  $K_{c_{veg}}$  e  $K_{c_{soil}}$  sono i coefficienti culturali della vegetazione e del suolo. L'applicazione a scala regionale di tale metodologia consente di ottenere mappe giornaliere dell' $ET_A$  per ogni tipo di vegetazione del territorio.

### Il sistema di previsione stagionale

Il sistema previsionale implementato all'interno della catena operativa, attualmente, permette di fare delle proiezioni da uno a tre mesi nel futuro dei principali parametri meteorologici, precipitazione e temperatura, e dell'indice SPI 3. Al fine di avere un quadro previsionale più completo ed attendibile vengono considerati più *outlook* stagionali derivanti da due diversi approcci metodologici, uno di tipo "interpretativo" basato sui meccanismi teleconnettivi, l'altro di tipo statistico "multiregressivo". Il primo si basa sull'interpretazione di una serie di indici il cui utilizzo varia in funzione della stagione e che si dividono nelle seguenti categorie:

1. indicatori solari: *Open Solar Flux* (OSF), *Ap index*, macchie solari, *Cosmic Rays Flux*;
2. indicatori stratosferici e troposferici: Anomalie di temperatura e circolazione dei venti in stratosfera legate al *Sudden Stratospheric Warming* (SSW), *Quasi Biennial Oscillation* (QBO), *North-Hemisphere Annular Mode* (NAM), *Eliassen-Palm Flux* (EPF), *North Atlantic Oscillation* (NAO), *Arctic Oscillation* (AO);
3. indicatori oceanici legati alle *Sea Surface Temperatures* (SST): *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), *Madden Julian Oscillation* (MJO), *El Niño Southern Oscillation* (ENSO), *Pacific Decadal Oscillation* (PDO), *Indian Ocean Dipole* (IOD), *Mediterranean Dipole*, *East Atlantic* (EA);
4. altri indicatori: *InterTropical Convergence Zone* (ITCZ), Monsone Indiano (*Webster-Yang Index*), *West African Monsoon* (WAM), anomalia della copertura di neve in Ottobre nel Nebraska, *Siberian High Index* (SHI), *European spring soil moisture*;

La previsione si sviluppa analizzando lo stato degli indici climatici e delle teleconnessioni in tempo reale, il loro andamento pregresso e la loro probabile evoluzione. Una volta terminato lo *screening* di tutti gli "ingredienti", si procede con l'individuazione delle interazioni tra i vari indici e

successivamente delle possibili ripercussioni sulle circolazioni atmosferiche prevalenti nei tre mesi considerati sul comparto europeo.

Le previsioni dello SPI 3, invece, seguono un approccio statistico basato su un metodo multi-regressivo adattativo che stima le relazioni multilinerari di un *dataset* di predittori oceanici ed atmosferici a scala mensile e trimestrale osservati con i valori puntuali di SPI osservato durante un periodo di 30 anni (1981 -2010). Una volta stimati i coefficienti di correlazione tra predittori e SPI osservato, l'SPI previsto viene calcolato a partire dagli ultimi valori osservati disponibili dei predittori al momento della previsione (Pasqui et al., 2009). Attualmente l'analisi viene condotta utilizzando il dataset di pioggia E-OBS (Ensamble Observational) fornito dal progetto ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) (Haylock et al., 2008) per il calcolo dello SPI osservato. La griglia di dati, centrata sul Bacino del Mediterraneo, ha risoluzione di 0.5 gradi e copre il periodo che parte dal 1951 (<http://eca.knmi.nl>). Il calcolo multi regressivo ottenuto, non solo fornisce i valori attesi dell'indice, ma anche la loro probabilità di occorrenza (Figura 4) su tutto il dominio di calcolo. E' in fase di sviluppo la previsione direttamente sulle singole stazioni pluviometriche, incrementando la confidenza ed il livello di dettaglio spaziale.

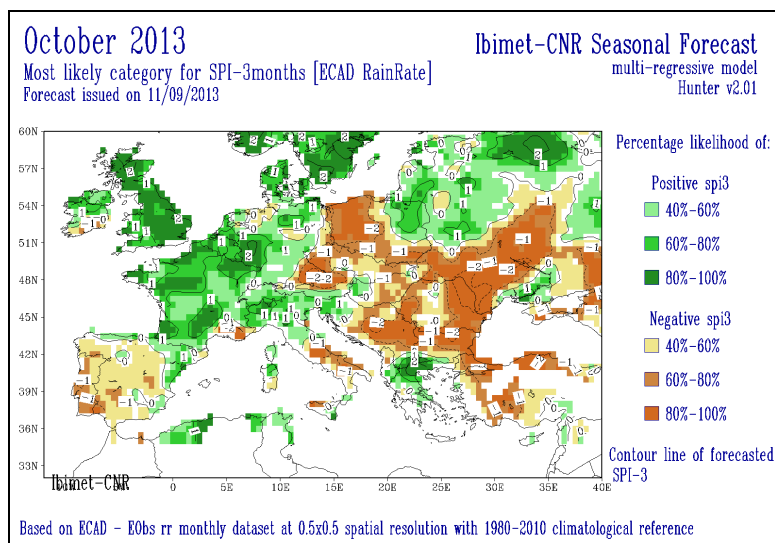


Figura 4. Esempio di previsione dello SPI\_3 per Ottobre 2013.

### Disseminazione dei prodotti finali

Nella catena operativa del sistema di monitoraggio e previsione della siccità la diffusione dei risultati è particolarmente critica perché, per far sì che gli utenti finali possano disporre di informazioni utili, tempestive ed efficaci per i loro scopi, è necessario che gli indici e la loro interpretazione siano forniti in modo semplice e diretto. Internet risponde perfettamente a tali requisiti, in quanto in grado di disseminare prodotti sotto varie forme e con tempi diversi di fornitura.

Sul sito del Consorzio LaMMA è stata creata una sezione *ad hoc* sulla siccità entro la quale è possibile trovare:

1. Una pagina principale in cui, durante la stagione di crescita delle piante, vengono descritte, attraverso l'analisi del VHI, le condizioni della vegetazione degli ultimi 16 giorni, con un ritardo massimo di circa 7-10 giorni. Secondo le statistiche degli accessi al 30 Settembre 2013, la pagina è visitata, mediamente, da un migliaio di utenti al mese.
2. Bollettini mensili consultabili on-line che contengono un riepilogo dettagliato della situazione del mese precedente e dell'eventuale evoluzione di fenomeni siccitosi nei mesi successivi; tutti gli indici vengono analizzati ed interpretati e particolare attenzione è dedicata alle diverse

tipologie forestali ed alle principali colture arboree della regione. Le statistiche di accesso ai bollettini indicano una media di oltre 1000 utenti a bollettino da Luglio 2012 a fine Settembre 2013, con i picchi più alti in corrispondenza dei mesi più secchi e caldi e un record di quasi 2900 accessi per il bollettino dell'Agosto 2012).

- Un'applicazione webGIS (Figura 5), implementata per integrare *dataset* di natura diversa (vettoriali e *raster*) e condividere le mappe degli indici di siccità con *decision-maker*, *stakeholder* e altri utenti finali. L'architettura è composta da un *framework general purpose* basato su tecnologie e strumenti *Open Source* quali un *database PostgreSQL* e librerie *PostGIS* e *MapServer* e procedure sviluppate in *PHP/Ajax* (Rocchi et al., 2010) in grado di fornire strumenti di interrogazione avanzata e funzioni di estrazione multi temporale su *raster*. Le tecnologie *Open Source* e l'applicazione di standard *OGC (Open Geospatial Consortium)* garantiscono, inoltre, la sostenibilità dell'applicazione e l'interoperabilità dei dati spaziali e lo sviluppo di servizi web per la gestione e condivisione dei dati del settore pubblico.

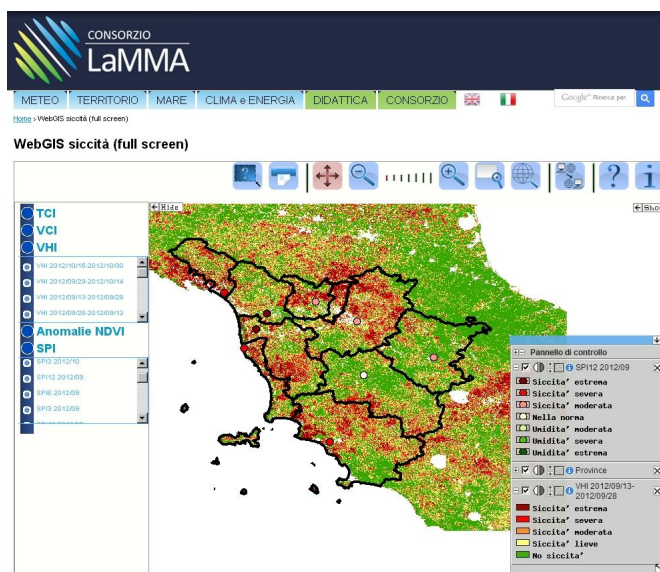


Figura 5. Applicazione webGIS per la visualizzazione ed interrogazione degli indici di siccità.

### Conclusioni e sviluppi futuri

Il prototipo di *framework* sviluppato dal Consorzio LaMMA in collaborazione con il CNR-IBIMET rappresenta un servizio operativo *user-friendly* ed in quasi-tempo reale, potenzialmente in grado di fornire via *web* informazioni facili da leggere ed interpretare per la gestione di emergenze legate alla siccità.

I sistemi di monitoraggio e previsione descritti, infatti, sono operativi lungo tutto l'arco dell'anno, seguendo e valutando l'evoluzione nello spazio e nel tempo di un evento siccitoso attraverso l'integrazione di dati di origine diversa (stazioni a terra e satellite) su base da mensile a bi-settimanale e fornendo informazioni sulla risposta della vegetazione a condizioni di siccità.

L'attuale fase di sviluppo è incentrata su alcuni filoni primari: la calibrazione ed adattamento degli indici di vegetazione alle caratteristiche toscane; l'integrazione all'interno del *framework* della stima dell'evapotraspirazione reale da modello attualmente in fase di validazione al fine di implementare un bilancio idrico semplificato di supporto alle decisioni.

L'operatività del servizio, inoltre, potrebbe essere ulteriormente migliorata intraprendendo azioni che coprono due aspetti paralleli: lo studio del fenomeno a scala di maggior dettaglio e la generazione di indicazioni relative agli impatti. Sul primo aspetto sarebbe importante approfondire

il dettaglio delle informazioni fornite dal punto di vista tecnico di *downscaling* dei prodotti; per il secondo, invece, l'adozione di un approccio partecipativo implicherebbe un maggior coinvolgimento di vari utenti e *stakeholders* direttamente ed indirettamente interessati (politici, gestori idrici, agricoltori, ecc.) dal fenomeno siccitoso, attraverso l'implementazione di applicativi per piattaforme *web* e per dispositivi mobili (*tablet* e *smartphone*) che favoriscano il flusso informativo bidirezionale, come la segnalazione geolocalizzata e l'*uploading* di foto, commenti, dati, ecc. relativi agli impatti a livello locale dovuti a periodi di deficit precipitativo prolungato (Goodchild, 2007). Questi strumenti di coinvolgimento della popolazione hanno anche lo scopo non secondario di sensibilizzare ad un più corretto ed efficiente uso della risorsa idrica e ad acquisire comportamenti virtuosi e buone pratiche, come azione primaria di adattamento ai cambiamenti climatici. Inoltre, grazie allo sviluppo del nuovo paradigma degli *Open Data*, garantire l'interoperabilità di dati territoriali e dei relativi servizi implica anche incrementarne e migliorarne l'utilizzo. Così i dati delle Pubbliche Amministrazioni sono resi sempre più accessibili a chiunque con la consapevolezza che, di fatto, essi rappresentano un patrimonio della collettività, e non di singole istituzioni ed un importante strumento per la trasparenza, responsabilità e possibile sviluppo economico.

### Bibliografia

- Byun H.R., Wilhite D. A. (1999). Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate*. 12, 2747-2756.
- Chiesi M., Rapi B., Fibbi L., Gozzini B., Magno R., Raschi A., Maselli F. (2013). Operational monitoring of daily evapotranspiration through the combination of ground and satellite data. *European Journal of Remote Sensing*. Submitted.
- Glenn, E.P., Nagler, P.L., Huete, A.R. (2010). Vegetation index methods for estimating evapotranspiration by remote sensing. *Surveys in Geophysics*. 31, 531-555.
- Goodchild M. F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211-221.
- Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D. and New M. (2008). A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.
- Jenses, M.E., Heise, H.R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE*. 89, 15-41.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*. 15, 91-100.
- Maselli F., Papale D., Puletti N., Chirici G., Corona P. (2009). Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 113, 657-667.
- McKee T.B., Doesken N. J., Kliest J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA. 179-184.
- Morid S, Smakhtin V, Moghaddasi M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology* 26: 971-985.
- Pasqui M., Primicerio J., Benedetti R., Crisci A., Genesisio L., Maracchi G. (2009). Seasonal forecasting precipitation in the Mediterranean basin. Managing water in a changing world. International Conference hosted by the Commission for Water Sustainability International Geographical Union (IGU). Torino, Italy. July 27-31 2009 (oral presentation).
- Rocchi L., De Filippis T., Magno R. (2010). An open source general-purpose framework for implementing webGIS applications. FOSS4G International Conference for Open Source Geospatial Software. Barcelona (Spain). URL: [http://2010.foss4g.org/presentations\\_show.php?id=4141](http://2010.foss4g.org/presentations_show.php?id=4141)
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., Lorenzo-Lacruz J., Camarero J.J., López-Moreno J.I., Azorin-Molina C., Revuelto J., Morán-Tejeda E., Sanchez-Lorenzo A. (2012). Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interactions* 16:10, 1-27.