

Influenza dei cambiamenti climatici sul bilancio idrologico della Regione Sardegna

L'obiettivo dell'attività è stato la progettazione e la messa in opera di uno strumento di simulazione per lo studio delle risorse idriche in relazione ai cambiamenti climatici. A tal fine si è implementato, calibrato e validato il modello SWAT su un'infrastruttura software e hardware di archiviazione e di calcolo ad alte prestazioni.

*Pierluigi Cau, Pier Andrea Marras, Costantino Soru, Davide Murrone, Marino Marrocu, Gabriella Pusceddu
Centro di Ricerca, Sviluppo, Studi Superiori in Sardegna (CRS4), Località Piscina Manna, Pula (Ca), e-mail: plcau@crs4.it
Gabriella Mulas, Mariano Pintus, Giacomo Fadda, Giovanni Puligheddu
Direzione generale Agenzia Regionale del distretto Idrografico della Sardegna (ADIS)
Servizio tutela e gestione delle risorse idriche, vigilanza sui servizi idrici e gestione delle siccità, Cagliari*



Negli ultimi anni, le sfide di gestione del territorio imposte in campo ambientale dal quadro d'incertezze conseguente al cambiamento climatico hanno reso ancora più esplicita l'esigenza di rendere fruibili i risultati della ricerca scientifica e del progresso tecnologico, implementati conformemente ai requisiti dettati dalla normativa comunitaria. In questa sede, citiamo la Direttiva comunitaria 2000/60 – WFD (Water Framework Directive) che, insieme ai piani regionali come il Piano di Tutela delle Acque (PdTA), approvato nel 2006 con Deliberazione della Giunta Regionale, hanno aperto nuovi scenari d'interesse e nuove esigenze ancora da investigare alla scala locale del territorio. Il corretto monitoraggio, controllo, analisi e gestione delle risorse naturali richiedono la messa in opera di un approccio multidisciplinare ottimale e partecipato, sia in termini di metodo generale che di strumenti, al fine di implementare una politica condivisa di gestione razionale delle acque.

In un quadro così complesso, è fondamentale che l'uso sostenibile delle risorse debba essere perseguito con un approccio metodologico integrato che agisca congiuntamente sugli aspetti quali-quantitativi e nel rispetto della bio-diversità. In conformità con questi presupposti, è stata portata avanti l'iniziativa progettuale. L'attività si prefigge inoltre di contribuire in maniera attiva al controllo e gestione delle risorse idriche.

L'infrastruttura modellistica messa in opera permetterà di indagare inoltre, una serie di problematiche come i cicli dei sedimenti e dei nutrienti legati al ciclo dell'acqua. Tramite un sistema informativo accessibile dal Web di analisi "on-demand", è inoltre possibile studiare dinamiche territoriali complesse per rispondere alle necessità della normativa ambientale. Il portale è un sistema dinamico per lo studio del ciclo delle acque interne a scala di bacino per la Sardegna e grazie all'utilizzo delle nuove tecnologie di simulazione disponibili, il sistema software è affidabile ed efficiente. La base fondante del sistema è l'utilizzo di strumenti, allo stato dell'arte, di supercalcolo e ICT al fine di rendere facile l'utilizzo dei modelli e i risultati della loro applicazione attraverso il web. L'obiettivo è stato quello sviluppare una serie di strumenti informatici operativi e affidabili che permettano di studiare in maniera sistemica il ciclo idrologico per la Sardegna in relazione al passato, al presente e in riferimento a scenari di cambiamento climatico.

Le attività di ricerca toccate per lo sviluppo del prodotto, includono l'analisi dei dati nei settori della geologia, pedologia, idrogeologia, uso del suolo, della copertura vegetazionale e del clima per la regione Sardegna per citare alcuni aspetti. Uno dei risultati più importanti, è stato quello di uniformare le informazioni e i dati utili alla descrizione del territorio, alla sua caratterizzazione al fine della corretta descrizione del ciclo idrologico alla scala regionale.

Il modello SWAT

SWAT, l'acronimo di Soil and Water Assessment Tool, è un modello a scala di bacino sviluppato dall'USDA Agricultural Research Service (ARS) e dalla A. & M. University. SWAT comprende le caratteristiche di molti modelli dell'ARS (Agricultural Research Service), ed è stato sviluppato come un'estensione del SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams et al., 1985, Arnold et al., 1990). In particolare, i modelli che hanno contribuito significativamente allo sviluppo di SWAT sono: il CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel, 1980), il GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) (Leonard et al. 1987) e l'EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) (Williams et al., 1984).

SWAT è stato creato principalmente per valutare gli effetti a medio e lungo termine della gestione del territorio sul ciclo dell'acqua, dei sedimenti e dei nutrienti in bacini idrografici estesi e complessi, caratterizzati da diversi tipi di suolo, coperture di vegetazione e usi del territorio. Il modello ha una base fisica, non incorpora equazioni di regressione per descrivere le relazioni tra le variabili d'ingresso e di uscita, ma necessita di specifiche informazioni sul clima, sulle proprietà del suolo, sulla topografia, sulla vegetazione e sulle pratiche agronomiche che avvengono nel bacino.

SWAT è efficiente dal punto di vista computazionale e consente di studiare processi particolari, come il trasporto dei batteri ovvero di analizzare gli impatti a lungo termine delle diverse strategie di gestione del territorio anche in assenza di dati osservati.

È possibile quindi affrontare lo studio delle problematiche connesse al graduale accumulo di sostanze inquinanti (che necessita di periodi di simulazione di diversi decenni) e al loro impatto sui corpi idrici. In breve SWAT si può definire come un modello idrologico semi-distribuito a processo continuo.

Ai fini della simulazione, un bacino idrografico viene suddiviso in un numero variabile di sottobacini, per tenere in considerazione aree caratterizzate da diversi usi del territorio e da diverse tipologie di suoli. Le informazioni in ingresso per ciascun sottobacino sono raggruppate nelle seguenti categorie: clima; unità di risposta idrologica (HRU); stagni e zone umide; acque sotterranee; canale o corso d'acqua principale drenante. Le HRU sono porzioni di territorio composte da un'unica combinazione di uso del suolo, tipologia di suolo e classe di pendenza.

La simulazione dei fenomeni che avvengono nel bacino è suddivisa in due parti:

- la prima parte è la "land phase of the hydrologic cycle" ovvero la fase terrestre del ciclo idrologico nella quale si analizzano i carichi idrici originati in ciascun sottobacino e immessi nel canale principale;
- la seconda parte è la "routing phase of the hydrologic cycle" o fase dell'acqua nella quale viene valutato il trasferimento di acqua attraverso la rete idrografica sino all'uscita dal bacino.

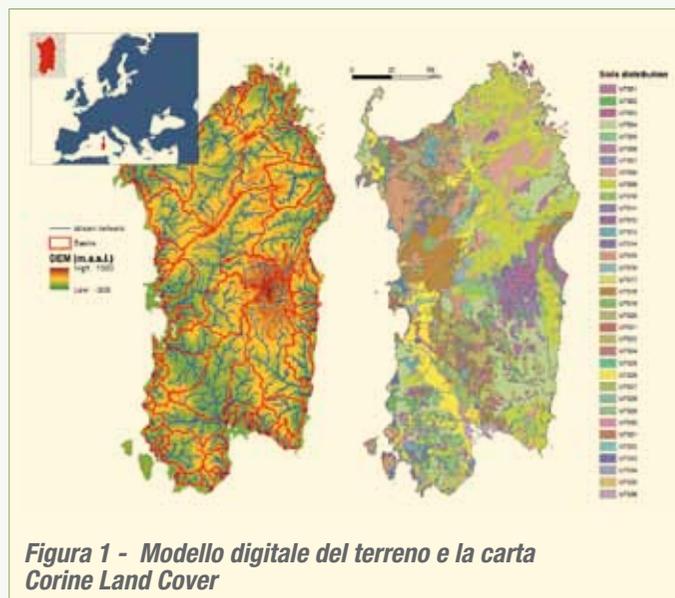


Figura 1 - Modello digitale del terreno e la carta Corine Land Cover

Tabella 1 - La funzione obiettivo scelta per misurare la performance del modello è l'indice di Nash-Sutcliffe (NS). Di seguito si riportano per ogni sezione il relativo valore del NS ottenuto in calibrazione

ID	Stazione	Indice NS
9	Liscia	0,66
160	Berchidda	0,85
175	Concabella	0,69
236	Mannu a Pedra Alvas	0,69
257	Mannu di Ozieri Fraigas	0,77
317	Rio Buttule a Buttule	0,71
328	Mannu oi Ozieri Ponte Legna	0,72
381	Temo Diga	0,79
471	Rifornitore Tirso	0,63
480	Ponte Cedrino	0,85
601	Taloro a Passerella Gavoi	0,79
703	Araxisi a Orto Sciavico	0,74
711	Flumineddu (Tirso) Allai	0,81
747	Foddeddu a Corongiu	0,68
755	Flumendosa a Gadoni	0,91
879	Mogoro a Santa Vittoria	0,75
933	M. Scrocca Aggregata	0,9
942	Flumineddu a Stanali	0,66
1027	Mannu di S. Sperate a Monastir	0,66
1050	Sa Piccocca Monte Acuto	0,86
1113	Cixerri a Uta	0,78
1175	Monti Pranu	0,67
656	Santa Chiara Ula Tirso	0,75
715	Alto Flumendosa Aggregata	0,91
999	Fluminimaggiore	0,58
1030	Rio Leni a Villacidro	0,82
146	Muzzone	0,8
656	Santa Chiara Ula Tirso	0,75
715	Alto Flumendosa Aggregata	0,91
999	Fluminimaggiore	0,58
1030	Rio Leni a Villacidro	0,82

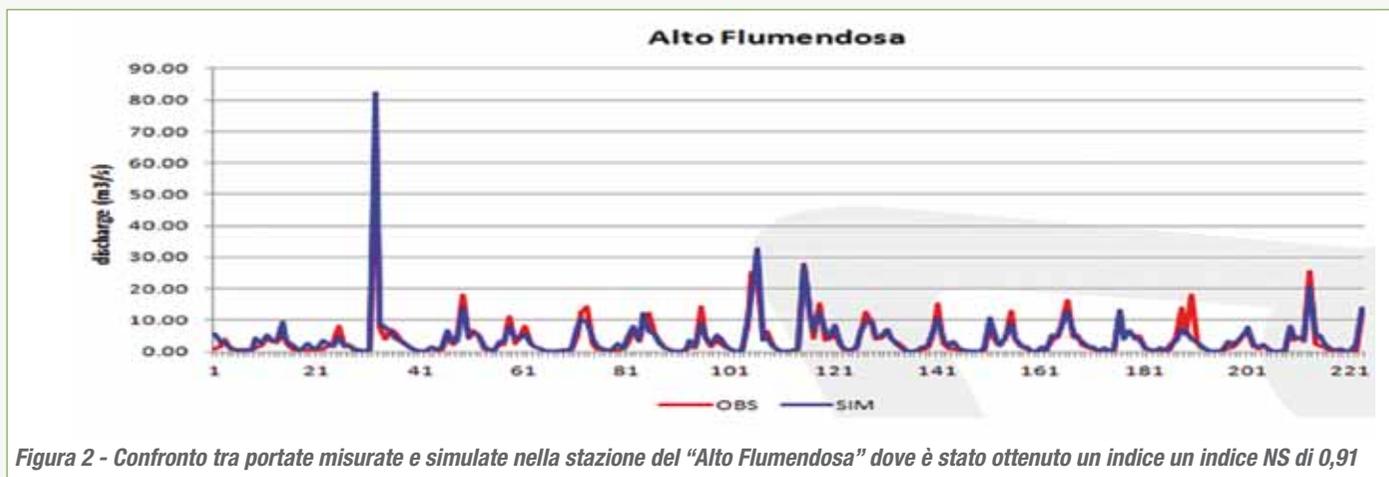


Figura 2 - Confronto tra portate misurate e simulate nella stazione del "Alto Flumendosa" dove è stato ottenuto un indice un indice NS di 0,91

Il Modello idrologico regionale

Il modello Regionale ha permesso di ricostruire il bilancio idrologico, per gli anni dal 1924 al 2008, in regime di naturalità per l'intera regione Sardegna. La prima fase della modellazione idrologica dei bacini idrografici tramite il modello SWAT è costituita dalla loro delimitazione. La corretta delimitazione del reticolo idrografico, dei relativi spartiacque e delle sezioni di chiusura costituisce una caratteristica fondamentale per ottenere un modello che riproduca verosimilmente il ciclo idrologico, riducendo così il margine di incertezza sui risultati di output.

La delimitazione dei bacini idrografici della Sardegna è stata messa in opera tramite l'interfaccia GIS ArcSWAT dedicata al software ArcGIS, in particolare utilizzando il tool Watershed Delineation. I documenti e le normative considerate in questa fase del lavoro sono stati: 1) Caratterizzazione dei corpi idrici della Sardegna - Relazione Generale; 2) D.M. 16 giugno 2008 n. 131; 3) D.Lgs 3 aprile 2006, n. 152; 4) D.Lgs. 11 maggio 1999, n. 152. Sono stati presi in considerazione i dataset regionali messi a disposizione dal Centro Documentazione Dati (CEDOC) e dal Sistema Informativo Regionale della Sardegna

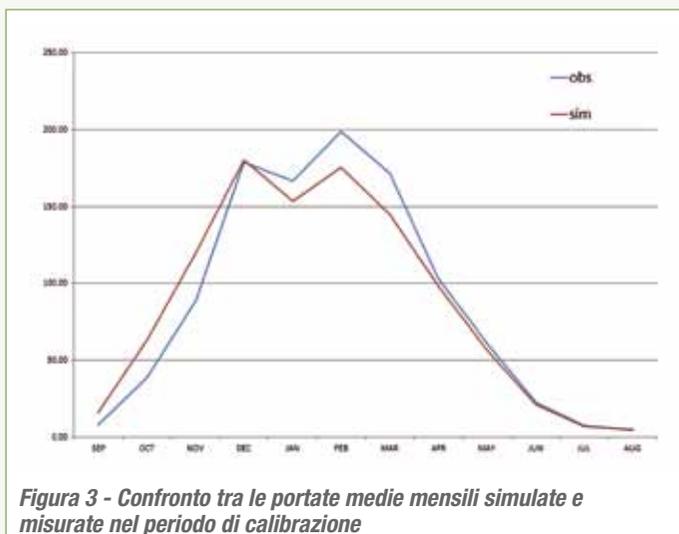


Figura 3 - Confronto tra le portate medie mensili simulate e misurate nel periodo di calibrazione

(SITR), dallo Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna (SISS) e in particolare i dati di seguito elencati: l'orografia denominata DEM (Digital Elevation Model) della Sardegna con risoluzione 10x10 metri, il reticolo idrografico regionale, la posizione delle stazioni idrometriche e di monitoraggio storiche e attualmente in funzione delle qualità delle acque, gli invasi ed i relativi sbarramenti, le ortofoto 2006 e i limiti dei bacini idrografici della Sardegna. In figura 1 viene mostrato il modello digitale del terreno e la carta Corine Land Cover.

Particolarmente onerosa è stata la parte di controllo dei risultati della delimitazione dei bacini. Varie incongruenze sono emerse dalla ricostruzione degli sparti acque dei bacini e sottobacini regionali come ad esempio la situazione per la quale aste fluviali intercettavano spartiacque. Tutte le situazioni di ambiguità sono state verificate e risolte con l'ausilio delle ortofoto RAS 2006. In corrispondenza delle zone pianeggianti o con bassi valori di pendenza inoltre, il modello di delimitazione spaziale degli spartiacque non riesce a risolvere in maniera corretta le linee di impluvio e displuvio. Anche questa criticità è stata superata tramite un editing manuale di dettaglio dei limiti dei sottobacini.

Nel presente lavoro si è scelta un'area minima drenante di 10 km². Questo valore soglia è stato, in alcuni casi, diminuito per tenere conto di elementi geografici quali traverse e stazioni di monitoraggio. Il modello regionale implementato è costituito di 108 bacini idrografici suddivisi poi in 1355 sottobacini.

Le parametrizzazioni per il Land Cover della Sardegna sono state attribuite sulla base della carta vettoriale del 2008 alla scala 1:25000 basata sullo standard CORINE Land Cover al quinto livello. I suoli e le relative parametrizzazioni sono state attribuite sulla base di studi precedenti come ad esempio, Arangino et al. del 1986; Aru et al. del 1991; Costantini et al. del 1999; Montanarella del 1999 e Righini et al. del 2001. Per ogni sottobacino sono state quindi analizzate le principali classi di copertura e di tipo di suolo per definire le unità idrologiche di riferimento (HRU). Come già enunciato, ogni HRU rappresenta quella porzione elementare del sottobacino caratterizzata da una medesima combinazione di tipo ed uso del suolo.

Calibrazione e validazione del modello

Nei modelli idrologici distribuiti, fisicamente basati i parametri hanno una interpretazione fisica e una specifica variabilità spaziale. Tuttavia la mancanza di dati necessari per una parametrizzazione corretta, problemi di scala delle misurazioni, imperfetta rappresentazione dei processi reali e le semplificazioni talvolta introdotte, comportano la necessità di una calibrazione del modello. Al fine di individuare quali parametri devono essere messi in calibrazione, è necessario procedere inizialmente all'Analisi di Sensitività. L'analisi di sensitività dei parametri che controllano il ciclo idrologico del modello regionale ha permesso di stimare il tasso di variazione dei risultati della modellazione rispetto ai cambiamenti dei valori dei parametri in ingresso. Su questa base sono stati scelti i parametri di calibrazione.

La metodologia utilizzata per la calibrazione del modello SWAT per la Sardegna prevede la modifica dei parametri più significativi che regolano il ciclo idrologico, simulando svariate combinazioni di valori, al fine di ottenere un buon adattamento delle portate simulate a quelle osservate. La procedura utilizzata è denominata SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting) dove l'incertezza dei parametri include tutte le fonti di incertezza come quelle relative alle variabili principali (ad es. le precipitazioni), al modello, ai parametri (suoli, uso del suolo) e ai dati osservati. La calibrazione si basa sui dati osservati che in questo studio sono costituiti dalle portate osservate nelle sezioni di interesse. L'algoritmo di calibrazione adatta l'idrogramma simulato a quello realmente osservato facendo variare i parametri in ingresso entro un intervallo fisicamente realistico e monitorando e riducendo l'incertezza totale del modello. Per calibrazione sono stati effettuati diversi run preliminari di calibrazione da 18 iterazioni ciascuno, provando diversi set di parametri, fino ad ottenere un miglioramento delle performance del modello. Successivamente sono stati lanciati dei run da 300 simulazioni per ottimizzare i risultati finali. Il numero di simulazioni per calibrare il modello regionale secondo i due approcci sopra descritti ha superato i 2500 run. La funzione obiettivo che misura la performance del modello è calcolata attraverso l'indice di Nash-Sutcliffe che varia tra $-\infty$ e 1. Il processo di calibrazione ha permesso di ottenere un indice di NS medio di circa 0,76, come rappresentato in **tabella 1**. In **figura 3**, si mostra il confronto tra le portate medie mensili simulate e misurate nel periodo di calibrazione. I risultati ottenuti in calibrazione sono stati confermati dalla procedura di validazione, con un indice medio dello stesso ordine di grandezza ottenuto su dataset indipendenti rispetto a quelli di calibrazione. In **figura 2** si riporta il grafico della validazione nella stazione "Alto Flumendosa", dove è stato ottenuto un indice un indice NS di 0,91.

Conclusioni e sviluppi futuri

Lo strumento messo in opera consente di simulare il ciclo idrologico per la regione Sardegna. Questo si basa su un modello idrologico "fisicamente basato" la cui scala spaziale di indagine è l'HRU e la scala temporale è quella giornaliera. Tale approccio ha il pregio di esaminare il ciclo idrologico ad una scala pertinente con i fenomeni in gioco. Le analisi alla scala spaziale di sottobacino / bacino e alle scala temporale mensile / annuale, idonee al pianificatore e gestore della risorsa, sono ottenute dall'analisi dei bilanci giornalieri alla scala di HRU. Le amministrazioni hanno necessità di avere strumenti scientificamente consistenti per analizzare situazioni di interesse. La piattaforma web-based rappresenta una evoluzione nel campo dei sistemi di reporting ambientali, e può costituire un valido strumento di supporto per gli operatori pubblici e privati che operano nel campo ambientale.

In definitiva le elaborazioni mostrate, consentono di apprezzare le potenzialità del sistema proposto. Ancor di più l'applicazione del sistema presentato se esteso a valutazioni di altre situazioni di interesse (apporto di sedimenti agli invasi e alle spiagge, stato quali-quantitativo delle risorse idriche, ecc.) offrono opportunità d'interesse per gli enti che a vario titolo operano nell'ambito della gestione delle risorse idriche e del territorio.



Pierluigi Cau

Pierluigi Cau è laureato in Ingegneria Idraulica e lavora dal settembre del 2000 come ricercatore presso il programma Scienze Ambientali del settore Energia e Ambiente del CRS4. Ha seguito, in qualità di responsabile, vari progetti Europei, nazionali e regionali. Il focus dell'attività di ricerca è lo sviluppo e l'applicazione di modelli idrologici, di sistemi GIS e tecnologie web based per la gestione delle risorse acqua e suolo. Ha partecipato e organizzato workshop e conferenze internazionali e insegnato corsi di modellistica ambientale presso diverse strutture (Università, Regione Autonoma della Sardegna, corsi di master post universitario, agenzie per la protezione dell'ambiente). Segue stagisti e tirocinanti.

Bibliografia

- Arangino F., Aru A., Baldaccini P., Vacca S. 1986. I suoli delle aree irrigabili della Sardegna, Piano Generale delle Acque, Regione Autonoma della Sardegna, Cagliari
- Arnold J.G., Williams J.R., Nicks A.D., Sammons N.B. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
- Aru A., Baldaccini P., Vacca A. 1991. Nota illustrativa alla carta dei suoli della Sardegna, con carta illustrata 1:250.000. Regione Autonoma della Sardegna.
- Costantini E.A. 1999. Database Georeferenziato dei suoli europei. Manuale delle procedure (versione 1.1) s.l., Edito dal Comitato Scientifico dell'European Soil Bureau, Istituto Sperimentale per lo studio e la difesa del suolo di Firenze.
- Knisel W.G. 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report. No. 26
- Leonard R.A., Knisel W.G., Still D.A. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. Trans. ASAE 30:1403-1418.
- Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio. 1999. Dlgs 11 maggio 1999, n. 152, Disposizioni sulla tutela delle acque.
- Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio. 2006. Dlgs 3 aprile 2006, n. 152, Norme in materia ambientale - Stralcio - Parte III - Norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione, di tutela delle acque dall'inquinamento e di gestione delle risorse idriche
- Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio. 2008. D.Lgs 16 giugno 2008, n. 131, Criteri tecnici per la caratterizzazione dei corpi idrici - Attuazione articolo 75, Dlgs 152/2006
- Montanarella L., Jones R. J. A. 1999. The European soil bureau, Research Report n. 6. Regione Autonoma della Sardegna, Servizio informativo e cartografico regionale, Modello digitale del terreno SAR 2004, <http://www.sardegna.territorio.it>.
- Righini G., Costantini A.C., Sulli L. 2001. La banca dati delle regioni pedologiche italiane, Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Firenze.
- Sharpley A.N., Williams J.R. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. Model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.
- SWAT-CUP2. 2008. SWAT Calibration and Uncertainty Program, User Manual, Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland.
- WFD. 2003. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC) n. 2, Identification of Water Bodies. Directorate General Environment of the European Commission, Brussels, ISBN 92-894-5122-X, ISSN 1725-1087