

MODELLIZZAZIONE DELLA ZONA NON SATURA PER LA STIMA DELLA RICARICA DELLA FALDA

MODELLING THE UNSATURATED ZONE FOR ASSESSING GROUNDWATER RECHARGE

LETIZIA FUMAGALLI(*) & TULLIA BONOMI(*)

(*)Università degli Studi Milano-Bicocca, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio - Piazza della Scienza 1, 20126 Milano, Italy
Email: letizia.fumagalli@unimib.it

RIASSUNTO

Una metodologia per la stima della ricarica zenitale della falda è stata sperimentata su un'area di pianura lombarda compresa tra il Fiume Ticino e il Fiume Oglio. Essa è basata sull'utilizzo del codice numerico Macro (JARVIS, 1994) in scenari di simulazione caratterizzati da profili di terreno differenti per suolo, spessore e litologia dell'insaturo e situazioni climatico-culturali. La metodica è stata testata su profili campione in un settore dell'area (provincia di Milano) mediante confronto con le misure di oscillazione del livello freatico. L'applicazione della metodologia sull'intera area d'interesse, effettuata per il periodo 1980-2005, ha considerato suoli rappresentativi e due scenari diversi per clima e soggiacenza. La ricarica giornaliera simulata, più elevata nell'alta e media pianura fluvioglaciale, mostra un trend temporale in crescita in conformità con il trend pluviometrico ed un regime sfalsato rispetto alle precipitazioni nell'ordine del mese. Viene valutato l'effetto della presenza di aree impermeabilizzate per urbanizzazione con effetti variabili in funzione dell'area e dell'intensità dell'urbanizzazione.

TERMINI CHIAVE: ricarica della falda, modelli di flusso insaturo, MACRO, Pianura Lombarda

INTRODUZIONE

E' stata messa a punto e sperimentata una metodologia per la stima della voce di bilancio relativa alla ricarica della falda da eventi meteorici che, basandosi su un approccio modellistico, considera le variabili climatiche, le tipologie di suolo, lo spessore della zona non satura e l'uso del suolo.

La metodologia è stata applicata nell'area di pianura lombarda compresa tra il Fiume Ticino e il Fiume Oglio (Pianura Padana, Italia) per un periodo temporale di 26 anni (1980-2005) e si è basata sulla simulazione del bilancio idrico di profili di suolo e zona vadosa mediante il codice numerico Macro (JARVIS, 1994) valutando la percolazione alla base degli stessi.

Il modello Macro è stato prescelto in quanto determina il flusso non stazionario nell'insaturo considerandone il bilancio idrico complessivo, l'intercettazione dalla pioggia da parte del suolo e della vegetazione, il prelievo radicale. In particolare è capace di considerare

ABSTRACT

A methodology for assessing the zenithal groundwater recharge was tested over an area of the Lombardy Plain between the rivers Ticino and Oglio (northern Italy). This estimation system is based on the use of the Macro numerical code (JARVIS, 1994) in simulation scenarios characterised by lithological profiles differing for the type of soil, thickness, geology of the unsaturated zone, climate conditions and farming practices. This methodology was previously tested on sample profiles in a portion of the Milan Province by comparing the fluctuation measurements of the water table. It was carried out on the whole study area in the 1980-2005 period, taking into account representative soils and two different situations as regards climate and depth of the water table. The simulated daily recharge, which was higher in the mid- and high fluvioglacial plain, showed an increasing temporal trend in conformity with the pluviometric trend and a regime dephased by about one month with respect to precipitation. The effect of the presence of impermeable areas due to urban expansion is also assessed as a function of the area surveyed and the rate of development.

KEY WORDS: groundwater recharge, models of unsaturated flow, MACRO, Lombardy Plain

INTRODUCTION

A methodology for assessing groundwater recharge from meteorological events was developed and tested. It is based on a model taking into account climate variables, types of soil, thickness of the unsaturated zone and use of soil.

This investigation method was applied in the area of the Lombardy Plain situated between the rivers Ticino and Oglio (Po Plain, Italy) over a period of 26 years (1980-2005). In particular, it is based on the simulation of the water balance of soil profiles and percolation zone by means of the Macro numerical code (JARVIS, 1994), estimating the amount of percolation at the bottom of the soil profiles.

The Macro model was chosen since it can determine the non-steady flow within the unsaturated layer, considering the total water balance, precipitation interception by soil and vegetation and root suction. This model is capable of considering the influence of ma-

l'influenza della macroporosità nel determinare l'entità del flusso idrico ed ha dimostrato una buona affidabilità in precedenti sperimentazioni in Pianura Padana (MANTOVI *et alii*, 2004, 2006; MARCHETTI *et alii*, 2000, 2006; UNGARO & CALZOLARI 2000).

Il lavoro ha l'obiettivo di stimare la ricarica della falda e le sue variazioni temporali-areali in un'area oggetto di un precedente studio mirato alla valutazione degli effetti delle variazioni di termini del bilancio idrico sulla risorsa idrica sotterranea (Progetto Riclic-Warm, Regional Impact of Climatic Change in Lombardy Water Resources: Modelling and applications) (BONOMI *et alii*, 2007).

L'applicazione della metodologia all'area d'interesse è stata effettuata previa predisposizione di un modello concettuale semplificato rappresentativo delle variabili in gioco nell'area ed è stata verificata in suoli campione nel settore settentrionale (provincia di Milano).

BACKGROUND

Le applicazioni di metodologie specifiche per l'analisi del flusso e del trasporto nella zona non satura hanno conosciuto negli ultimi anni sviluppi legati alla necessità di valutare la vulnerabilità intrinseca e specifica delle acque sotterranee alla contaminazione, individuare le modalità di percolazione degli inquinanti, dare indicazioni sulla dinamica dei nitrati per la definizione di Programmi d'Azione rivolti alla protezione della qualità delle acque sotterranee (FUMAGALLI *et alii*, 2008) e, non ultimo, valutare la ricarica degli acquiferi. Quest'ultimo aspetto ha suscitato un interesse crescente a partire dalla fine degli anni 1980 in risposta ad una maggiore attenzione rivolta alla gestione delle acque sotterranee, ed ha assunto carattere di urgenza negli ultimi anni in relazione al verificarsi di successioni di anni siccitosi concomitanti ad una crescita continua della domanda idrica. Il mantenimento del "Livello Minimo Sostenibile" della risorsa idrica sotterranea comporta infatti la definizione di piani gestionali basati sulla conoscenza dell'entità e della variazioni spazio-temporali sia dei prelievi quanto della ricarica a livello regionale.

La valutazione della ricarica a scala regionale si basa su metodi indiretti e tra questi ampiamente utilizzati sono i modelli di bilancio idrico, talora aggregati arealmente (RUSHTON & WARD, 1979) o per bacino (WILBY *et alii*, 1994). Vengono in essi trascurati i parametri legati alla vegetazione e alle caratteristiche idrauliche dei suoli a causa della loro variabilità areale, parametri che rivestono notevole importanza sulla valutazione della ricarica (FINCH, 1998). La modellizzazione della zona non satura per valutare il drenaggio al di sotto della zona radicale è stato recentemente applicato in seguito ai progressi delle tecniche di calcolo e alla compilazione di codici numerici che risolvono l'equazione di Richards; tra i quali si citano HYDRUS-1D/2D (SIMUNEK *et alii*, 1996) VS2DT (LAPPALA *et alii*, 1987; HSIEH *et alii*, 2000) UNSAT (FAYER, 2000). Essi permettono di ottenere stime della ricarica su tempi lunghi, in funzione della disponibilità di dati climatici, ma rimane comunque importante conoscere la distribuzione areale dei parametri idraulici del suolo e della vegetazione (ROCKOLD *et alii*, 1995). Inoltre non trascurabile è l'effetto che la doppia porosità può assumere in alcuni suoli sulla ricarica (SMETTEM, 1987).

It has also proved to be reliable in previous applications in the Po Plain (MANTOVI *et alii*, 2004, 2006; MARCHETTI *et alii*, 2000, 2006; UNGARO & CALZOLARI, 2000).

The aim of the research was to estimate groundwater recharge and its temporal-areal changes over an area which had been previously studied with respect to the effects induced by variations of the water balance parameters on groundwater resources (Riclic-Warm Project, Regional Impact of Climatic Change in Lombardy Water Resources: Modelling and applications) (BONOMI *et alii*, 2007).

The elaboration of a simplified conceptual model on the variables present in this territory was carried out and tested on soil samples from the northern portion (Milan Province) prior to its application to all of the study area.

BACKGROUND

In the past few years, applications of specific methodologies for analysing flow and transport in the unsaturated zone have undergone considerable development, owing to the following needs: to assess the intrinsic and specific vulnerability of groundwater to pollutants; to identify the patterns of percolation of pollutants; to acquire information on the dynamics of nitrates, in order to define Action Programmes for groundwater protection (FUMAGALLI *et alii*, 2008); to assess aquifer recharge. The latter has aroused growing concern since the late 1980s due to greater awareness of the importance of groundwater management. Recently, this concern has increased, following the occurrence of several drought periods associated with a growing demand for water resources. Indeed, maintaining a "Minimum Sustainable Level" of groundwater resources implies the definition of management plans based on the knowledge of changes in the amount of water withdrawal and recharge at a regional level over space and time.

The assessment of groundwater recharge at a regional level is based on indirect methods, among which the most frequently used are water balance models, sometimes areally aggregated (RUSHTON & WARD, 1979) or in single catchments (WILBY *et alii*, 1994). These models ignore the parameters linked to vegetation and hydraulic characteristics of soils owing to their areal variability, although these factors are of paramount importance in assessing groundwater recharge (FINCH, 1998). In order to assess drainage underneath the root zone, modelling of the unsaturated zone was recently applied following the progress of calculation techniques and compilation of numerical codes which solve Richards' equation, among which worthy of note are: HYDRUS-1D/2D (SIMUNEK *et alii*, 1996), VS2DT (LAPPALA *et alii*, 1987; HSIEH *et alii*, 2000), UNSAT (FAYER, 2000). These allow recharge estimates over long times to be obtained, thanks to the availability of climate data, although it is always important to know the areal distribution of hydraulic parameters of soil and vegetation (ROCKOLD *et alii*, 1995). Furthermore, the effect that double porosity can play on groundwater recharge in some soils is not negligible (SMETTEM, 1987).

Rispetto al passato, attualmente molti dati sono stati raccolti in banche dati e sistemi informativi territoriali che costituiscono una fonte preziosa d'informazioni relativamente a suolo, zona vadosa ed acque sotterranee. In particolare per quanto concerne i suoli esse contengono i dati fisici di base relativi alle singole unità, ma pochi e rari sono i dati idraulici a causa del costo effettivo e temporale delle misure. Tuttavia le diverse misure e sperimentazioni, effettuate in campi appositamente attrezzati al fine di meglio capire i fenomeni d'interesse, hanno consentito la validazione di modelli specifici per l'insaturo, l'individuazione di modalità indirette di valutazione dei parametri idraulici e la calibrazione di parametri colturali. In particolare per il modello Macro utilizzato nel presente studio, sono state calibrate e validate pedofunzioni di trasferimento, termine introdotto da Bouma nel 1989, su set di dati di suolo specifici della pianura padana (UNGARO & CALZOLARI, 1997; UNGARO *et alii*, 2005), che consentono la definizione dei parametri idraulici del suolo e un miglior utilizzo delle banche dati ai fini modellistici.

MODELLO NUMERICO

Macro (JARVIS, 1994) è un modello monodimensionale deterministico a doppia conducibilità che simula il flusso idrico transitorio in suoli stratificati considerando, oltre alle caratteristiche del terreno, anche gli effetti della presenza di vegetazione, quali intercettazione della chioma e prelievo idrico da parte delle radici.

Caratteristica del modello è quella di essere in grado di considerare l'eventuale presenza di macroporosità; infatti suddivide la porosità totale in due domini di flusso, micropori e macropori, separati da un valore limite di contenuto idrico-potenziale. I due domini sono caratterizzati ognuno da un proprio contenuto idrico e da una proprio flusso idrico.

Il flusso nei micropori viene descritto mediante l'equazione di Richards e le proprietà idrauliche del suolo sono rappresentate dalle funzioni (1) di BROOKS & COREY (1964), per quanto riguarda il potenziale matriciale ψ_{mi} (m), e (2) di MUALEM (1976), per quanto riguarda la conducibilità idraulica K_{mi} (m/s). Le relazioni di governo sono le seguenti:

$$\psi_{mi} = \psi_b S_{mi}^{-1/\lambda} \quad (1) \quad K_{mi} = K_b S_{mi}^{n+2+2/\lambda} \quad (2) \quad S_{mi} = \frac{\theta_{mi} - \theta_r}{\theta_b - \theta_r} \quad (3)$$

Nelle relazioni S_{mi} (-) è la saturazione effettiva dei micropori (3), θ_{mi} (-) il contenuto idrico della matrice, θ_b (-) e θ_r (-) rispettivamente i contenuti idrici massimo e residuale nei micropori, ψ_b (m) rappresenta la pressione d'ingresso dell'aria, ossia il potenziale corrispondente a θ_b , λ (-) è l'indice di distribuzione delle dimensioni dei pori, K_b (m/s) la conducibilità satura dei micropori ed n (-) il fattore di tortuosità.

Il flusso verticale nei macropori è di tipo laminare-gravitativo, secondo la legge di Darcy, con gradiente unitario, e la conducibilità idraulica in condizioni di non saturazione K_{ma} (m/s) è rappresentata da una legge di potenza (4) (BEVEN GERMANN, 1981) essendo S_{ma} (-) la saturazione dei macropori (5), θ_{ma} (-) il contenuto idrico dei macropori, θ_s (-) e K_s (m/s) rispettivamente il contenuto idrico e la conducibilità idraulica a saturazione dei macropori, quest'ultima misurabile in campo, ed n (-) un indice legato alla distribuzione dei pori.

Up to now, a great amount of data has been retrieved from database and geographical information systems (GIS) which are an important source of information on soils, percolation zones and groundwater. In particular, as regards soils, these systems contain the basic physical data relative to single units, whereas hydraulic data are rare and scarce, owing to the cost of measurements in time and money. Nevertheless, in order to better understand the phenomena involved, various measurements and tests have been carried out in adequately equipped fields, validating specific models for the unsaturated zone, the elaboration of indirect methods for assessing hydraulic parameters and the calibration of parameters related to farming activities. In particular, regarding the Macro model utilised in this study, pedological transfer functions (a term introduced by Bouma in 1989) were calibrated and validated on a set of soil data typical of the Po Plain (UNGARO & CALZOLARI, 1997; UNGARO *et alii*, 2005), allowing soil hydraulic parameters to be defined and database to be better utilised for modelling purposes.

NUMERICAL MODELLING

Macro (JARVIS, 1994) is a double-conductivity one-dimensional deterministic model which simulates transitory water flow through stratified soils by taking into account not only soil characteristics but also the effects of vegetation, such as interception by canopy and water withdrawal by root networks.

This model considers the possible presence of macroporosity. In fact, it subdivides total porosity into two flow domains, micropores and macropores, separated by a boundary value of potential water amount. The two domains are each characterised by specific water content and water flow.

Flow in the micropores is described by means of Richard's equation whereas the hydraulic soil properties are represented by BROOKS & COREY (1964) as functions (1), as regards the matrix potential ψ_{mi} (m), and by MUALEM (1976) as a function (2), as regards hydraulic conductivity K_{mi} (m/s). The relations governing the flow are therefore:

In these equations S_{mi} (-) is the actual saturation of the micropores (3), θ_{mi} (-) is the matrix water content, θ_b (-) and θ_r (-) are the maximum and residual water contents, respectively. In the micropores, ψ_b (m) is the inflow air pressure, which is the potential corresponding to θ_b , λ (-) is the distribution index of the pore dimensions, K_b (m/s) is the saturated water conductivity of the micropores and n (-) is the tortuosity index.

The vertical flow in the macropores is of the laminar-gravitational flow type, according to Darcy's law, with unit gradient, and hydraulic conductivity in non-saturation conditions K_{ma} (m/s) is represented by a power law (4) (BEVEN GERMANN, 1981). According to this law, S_{ma} (-) is macropore saturation (5), θ_{ma} (-) is water content of the macropores, θ_s (-) and K_s (m/s) is the water content and hydraulic conductivity in saturation conditions (the latter is measurable in the field), and n (-) is an index linked to pore distribution.

$$K_{ma} = (K_s - K_b) \cdot (S_{ma})^n \quad (4)$$

Gli scambi laterali tra i due domini sono legati alla diffusività dell'acqua in assenza di gravità.

La pioggia netta in superficie risulta divisa in due aliquote, una delle quali interessa i micropori mentre, come conseguenza della loro capacità di infiltrazione limite, quella in eccesso interessa i macropori.

Variabili guida del modello sono i dati giornalieri climatici relativi a precipitazione, temperatura ed evapotraspirazione potenziale ET_0 ($mm \cdot d^{-1}$). Nel presente caso, avendo a disposizione per lunghi periodi i soli dati termo-pluviometrici, quest'ultima è stata stimata mediante la formula di HARGREAVES & SAMANI (1994) espressa dalla relazione (6):

$$ET_0 = 0.0023Ra(T + 17.8)\sqrt{\Delta T} \quad (6)$$

in cui Ra ($mm \cdot d^{-1}$) è la radiazione solare extraterrestre, T e ΔT ($^{\circ}C$) rispettivamente la temperatura media giornaliera e l'escursione termica media giornaliera.

AREA DI STUDIO

L'area di studio, che ha un'estensione di 7367 km^2 (Fig. 1), rappresenta il settore della pianura lombarda che dall'area pedemontana si estende fino al Fiume Po ed è delimitato dai Fiumi Ticino ad ovest ed Oglio ad est. Collinare nell'estremità settentrionale, con quote attorno a 300 m s.l.m., l'area è per lo più pianeggiante nel settore centrale e meridionale, passando nei due casi a quote di 80-100 m e di 20-30 m s.l.m.

I Fiumi principali, Ticino, Adda ed Oglio, scorrono con direzione Nord Sud nel tratto settentrionale, Ovest-Nord-Ovest, Est-Sud-Est in quello meridionale. Tutti i fiumi incidono la morfologia del territorio, in particolare nel settore settentrionale.

$$S_{ma} = \frac{\theta_{ma}}{\theta_s - \theta_b} \quad (5)$$

Lateral exchanges between the two domains are linked to water diffusiveness in the absence of gravity.

Net precipitation on the ground is divided into two amounts, one of which affects the micropores whereas the other, being in excess, affects the macropores as a consequence of their infiltration capacity limit.

In this model, daily climate data concerning precipitation, temperature and potential evapotranspiration ET_0 ($mm \cdot d^{-1}$), are the guide variables. In our case, since only temperature-pluviometric data were available over long periods of time, potential evapotranspiration ET_0 was estimated by means of the formula by HARGREAVES & SAMANI (1994), expressed by the following ratio (6):

where Ra ($mm \cdot d^{-1}$) is extraterrestrial solar radiation, T and ΔT ($^{\circ}C$) are the mean daily temperature and the mean daily temperature range, respectively.

STUDY AREA

The study area, comprising over 7367 km^2 (Fig. 1), corresponds to the Lombardy Plain sector, which stretches from the Alpine foothills as far as the River Po and is bounded by the River Ticino to the west and the River Oglio to the east. The northernmost part of the study area is characterised by gentle hills, with altitudes up to 300 m a.s.l., whereas the central and southern parts are prevalently flat with altitudes of 20-30 m a.s.l.

The main rivers (Ticino, Adda and Oglio) flow from N to S in the northern part and from WNW to ESE in the southern part. All the rivers are active geomorphological agents, cutting through soil deposits, especially in the northern part of the area.

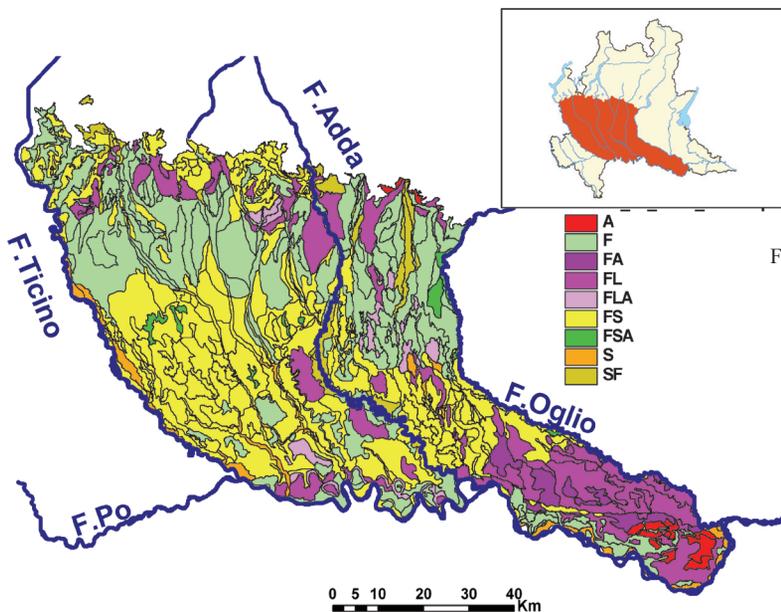


Fig. 1 - Inquadramento dell'area e tessitura media dei suoli (A: argilloso, L: limoso, F: franco, S: sabbioso)
 - Location of the study area and soil classification (average texture of soils: "A" clayey, "L" silty, "F" loamy, "S": sandy)

Dal punto di vista geologico affiorano sedimenti quaternari, per lo più fluvioglaciali, con terrazzi antichi (mindeliani e rissiani) e talora ferretizzati nel settore settentrionale; si differenziano un'alta pianura ghiaiosa sabbiosa e una bassa pianura a tessitura fine. Idrogeologicamente parlando l'area settentrionale, interessata da depositi più grossolani, è sede di un acquifero monostrato superficiale nel quale l'incremento delle litologie fini verso sud ed in profondità determina la presenza di acquiferi compartimentati alimentati dal settore settentrionale (CAVALLIN *et alii*, 1983; BERETTA *et alii*, 1992).

La relazione con i corsi d'acqua superficiali indica un effetto drenante da parte dei medesimi per cui la ricarica non è legata ad apporti fluviali. Per contro, i numerosi canali irrigui presenti esercitano, quando attivi, forti influenze positive sul livello piezometrico, sia come conseguenza diretta delle irrigazioni, sia per le perdite stesse lungo i canali. La limitata conoscenza di tali apporti non ha al momento consentito una valutazione dell'aliquota di ricarica ad essi imputabile.

L'area, soprattutto nella parte settentrionale, è intensamente urbanizzata, uso del suolo che ne determina una forte impermeabilizzazione.

MATERIALI E METODI

Il profilo comprendente il suolo e la zona vadosa rappresenta l'unità di simulazione sulla quale vengono valutati gli effetti che le condizioni strutturali, fisico-idrauliche e climatico-agronomiche hanno sulla percolazione alla base dello stesso profilo, ossia sulla ricarica dell'acquifero.

In tale profilo il suolo costituisce i primi 2 metri, mentre la sottostante zona vadosa presenta spessore variabile in funzione della soggiacenza della falda. Le caratteristiche geometriche, tessiturali e di conducibilità del suolo sono derivate dai dati raccolti nella banca dati pedologica (ERSAF), relativamente alla quale è rappresentata in Fig.2 la distribuzione della Unità Tipologiche di Suolo (UTS). Le caratteristiche della zona vadosa sono invece derivate da una banca dati di pozzi (TANGRAM, BONOMI, 1995; BONOMI *et alii*, 2009), che raccoglie le stratigrafie di quasi 20.000 pozzi nell'area d'interesse.

From the geological viewpoint, Quaternary sediments, mainly fluvioglacial, crop out, with ancient fluvial terraces (Mindel and Riss) sometimes ferretized in the northern portion. A gravely-sandy upper plain is distinguished from a silty-clay lower plain. Hydrogeologically speaking, the northern portion - characterised by coarser deposits - is regarded as an superficial undifferentiated monostratum which, with a progressive increase of finer sediments to the south and with depth, turns into a typical multicompartimental aquifer in the lower open plain (CAVALLIN *et alii*, 1983; BERETTA *et alii*, 1992).

The relationship with watercourses shows a draining effect by the rivers; therefore recharge is not caused by river feeding. On the contrary, the numerous irrigational canals present all over the area exert a strong positive influence on the piezometric level. This is attained both as a consequence of irrigations and water losses along the canals. The incomplete knowledge of these water supplies has not yet allowed the recharge amount due to canals to be properly assessed.

The intense urban development of the study area, especially in its northern part, has made the soil largely impermeable.

MATERIALS AND METHODS

The profile comprising the soil and the vadose zone represents the simulation unit on which the effects of the structural, physico-hydraulic and climatic-agronomic conditions on the percolation at the profile, that is on groundwater recharge, are calculated.

In this profile the soil makes up the first two metres of thickness whereas the underlying vadose zone is of varying thickness depending on the depth of the water table. The geometrical, textural and conductivity characteristics of the soil are derived from the regional pedological database (ERSAF), and Fig. 2 shows the distribution of soil type units (UTS), while the characteristics of the vadose zone are taken from a database of wells (Tangram database: BONOMI, 1995; BONOMI *et alii*, 2009), which collect the stratigraphy of nearly 20,000 wells found in the study area.

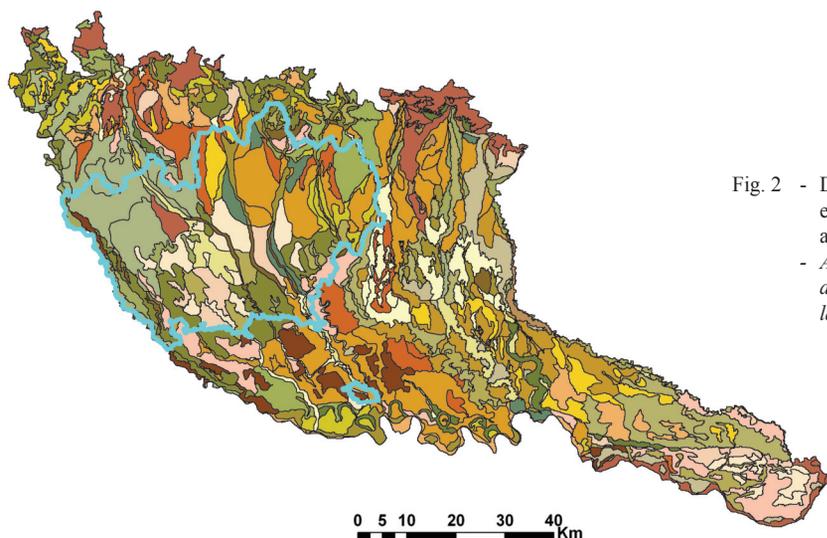


Fig. 2 - Distribuzione areale delle 100 Unità Tipologiche di Suolo (UTS) e sagoma dell'area campione (Provincia di Milano, cui appartiene amministrativamente il comune di San Colombano al Lambro)
- Areal distribution of the 100 Soil Typological Units (UTS) and boundary of the sample area (blue line, corresponding to the Province of Milan, to which the Municipality of San Colombano al Lambro belongs).

Da tali banche dati sono stati tratti, per ogni unità di suolo, i dati relativi alla tessitura (scheletro, sabbia, limo ed argilla in percentuale), di carbonio organico e delle classi di conducibilità dei singoli orizzonti, per la zona vadosa sono state desunte dalle stratigrafie le composizioni granulometriche e da dati di letteratura i relativi valori di conducibilità (FREEZE & CHERRY, 1979; FETTER, 1994).

Le caratteristiche del suolo appaiono preponderanti nel definire il rapporto tra infiltrazione e ruscellamento ed influenzare l'entità della ricarica; per tale ragione i singoli profili di simulazione sono stati individuati sulla base della distribuzione delle UTS; esse inoltre presentano una variabilità areale delle caratteristiche tessiturali superiore alla variabilità granulometrica della zona vadosa.

Considerando la presenza di 100 UTS nell'area, ed i considerevoli tempi necessari per effettuare le simulazioni per ogni singolo profilo, sono stati individuati per la simulazione n. 39 suoli rappresentativi, e quindi n.39 profili di simulazione, basandosi sul duplice criterio dell'estensione areale dell'unità e della tessitura media del profilo di suolo.

In base al primo criterio sono stati inclusi nelle simulazioni tutti i suoli di estensione areale superiore a 90 km²; in base al secondo criterio i restanti profili sono stati raggruppati in funzione delle similitudini tessiturali e, per ogni gruppo, è stato prescelto quello a maggiore estensione areale; sono comunque stati considerati tutti i suoli che presentassero caratteristiche estreme rispetto a quelle medie dei gruppi.

Come risultato, le 39 unità di suolo rappresentative ottenute interessano un'area di 5.472 km², mentre 61 unità di suolo, per un'area di 1.895 km², sono state assimilate alle prime (Fig. 3).

Per quanto riguarda le caratteristiche della zona vadosa, sono state considerate tre tipologie di composizione granulometrica: nell'area dell'alta pianura settentrionale esse sono rappresentate da ghiaie e sabbie per la pianura e da ghiaie, sabbie e argille per le aree più antiche terrazzate; nella bassa e media pianura è stata considerata una composizione sabbiosa.

Sulla base delle caratteristiche tessiturali e granulometriche sopra descritte sono state stimate le proprietà degli orizzonti di suolo e zona vadosa, quali densità e caratteristiche fisico-idrauliche, mediante pedo-

The data concerning texture (skeleton, sand, silt and clay in percentage), the presence of organic carbon and the conductivity classes of single horizons were taken from these data banks for each soil unit. As regards the vadose zone, the particle size distribution of the single soil classes were taken from stratigraphies and the related conductivity values from literature data (FREEZE & CHERRY, 1979; FETTER, 1994).

Soil characteristics seem to be predominant in defining the ratio between infiltration and runoff and in influencing the amount of recharge. For this reason single simulation profiles were identified on the basis of UTS (soil type unit) distribution, which shows an areal variability of textural characteristics higher than the particle-size distribution of the vadose zone.

Considering the presence of 100 UTS in the area, and the considerable time necessary for carrying out a simulation for each single profile, 39 representative soils were identified and, therefore, 39 simulation profiles. The latter were chosen on the basis of the twofold criterion of areal extension of the unit and average texture of the soil profile.

On the basis of the former criterion, all soils with an areal extent over 90 km² were included in the simulations. On the basis of the latter criterion the remaining profiles were grouped according to textural similarities and, within each group, the largest profile was chosen. All soils showing "extreme" characteristics with respect to the groups' average were taken into account.

As a result, the 39 representative soil units cover a total area of 5.472 km², whereas 61 units, corresponding to an area of 1.895 km², were related to the former (Fig. 3).

As regards the characteristics of the vadose zone, three types of particle-size composition were considered: in the upper plain area they are represented by gravel and sand whereas the oldest terraced areas are assimilated to sand and clay. On the other hand, a sandy composition was considered in the mid-lower plain.

On the basis of the aforementioned textural and particle-size characteristics, the properties of the soil horizons and the vadose zone (such as density and physico-hydraulic features) were estimated by means of pedological transfer functions. The latter were

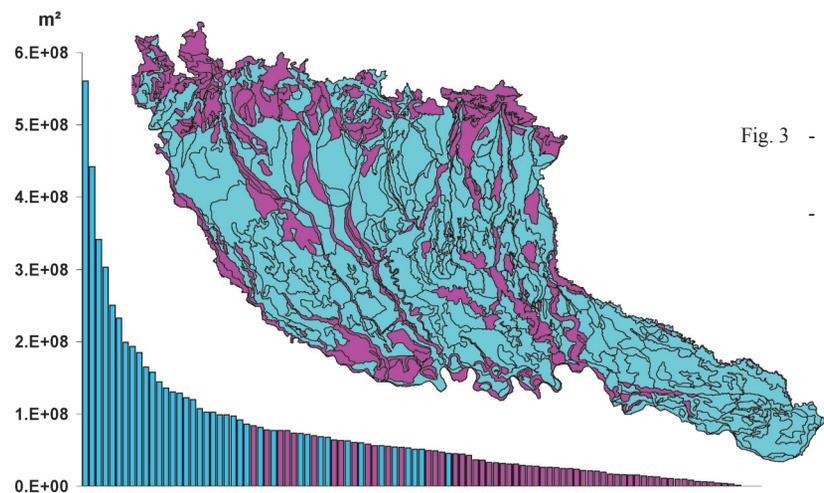


Fig. 3 - Scelta dei suoli per la simulazione: estensione delle UTS scelte per la simulazione (in blu) ed estensione delle UTS assimilate a unità scelte (in magenta), con istogramma di frequenza degli areali delle unità.
- Choice of soils for simulation: extent of the UTSs chosen for simulation (in blue) and of the UTSs considered similar to the chosen units (in magenta), with frequency histograms of the unit areas.

funzioni di trasferimento. Le pedofunzioni utilizzate sono state calibrate e validate per il modello Macro nell'ambito del Progetto SINA su set di dati e sperimentazioni relativi alla Pianura Padana (CALZOLARI *et alii*, 2001a, 2001b; UNGARO & CALZOLARI, 2001; UNGARO *et alii*, 2005).

In Fig.4 sono rappresentate le curve di ritenzione relative agli orizzonti di quattro diverse UTS, che ben evidenziano i differenti comportamenti degli orizzonti nella variazione di contenuto idrico con il variare del potenziale di matrice in funzione della rispettiva tessitura: in particolare le tessiture più grossolane presentano valori di pressione d'ingresso dell'aria inferiori ai 10 cm di suzione.

Per quanto concerne le variabili guida delle simulazioni, rappresentate dai dati climatici, sono stati analizzati i dati registrati nelle diverse stazioni termo-pluviometriche presenti nell'area. Tra queste sono state selezionate due stazioni caratterizzate da periodi di registrazione sufficientemente lunghi e rappresentative di differenti fasce climatiche della pianura: la stazione di Monza (163 m s.l.m., inizio funzionamento 1978), nella porzione settentrionale dell'area, e quella di Cremona (50 m s.l.m., inizio funzionamento 1951), nella porzione meridionale.

Il clima nelle due stazioni si differenzia per entità e distribuzione delle precipitazioni (Fig. 5A e 5B): le medie del periodo sono rispetti-

calibrated and validated for the Macro model within the framework of the SINA Project on a set of data and tests regarding the Po Plain (CALZOLARI *et alii*, 2001a, 2001b; UNGARO & CALZOLARI, 2001; UNGARO *et alii*, 2005).

Fig. 4 shows the retention curves regarding the horizons of four different UTSs. These clearly pinpoint the different behaviour of the horizons regarding the change of water content with matrix potential as a function of their respective texture: in particular, the coarser textures have air-entry potential values lower than 10 cm of suction.

The guide variables of simulations are represented by climate data. Data recorded in the meteorological stations present in the area were analysed. Two of the stations with sufficiently long recording periods which are representative of different climatic belts of the plain, were selected: Monza meteorological station (163 m a.s.l., recording since 1978) in the area's upper part, and Cremona meteorological station (50 m a.s.l., recording since 1951) in the area's lower part.

According to these two stations, the climate in the two areas varies in the amount and distribution of precipitation (Figs. 5A and 5B). Mean precipitation values in the period considered are 1108 mm/year in Monza and 770 mm/year in Cremona. They both show

Fig. 4 - Curve di ritenzione degli orizzonti pedologici di alcuni profili di UTS
- Retention curves of soil horizons of some UTS profiles

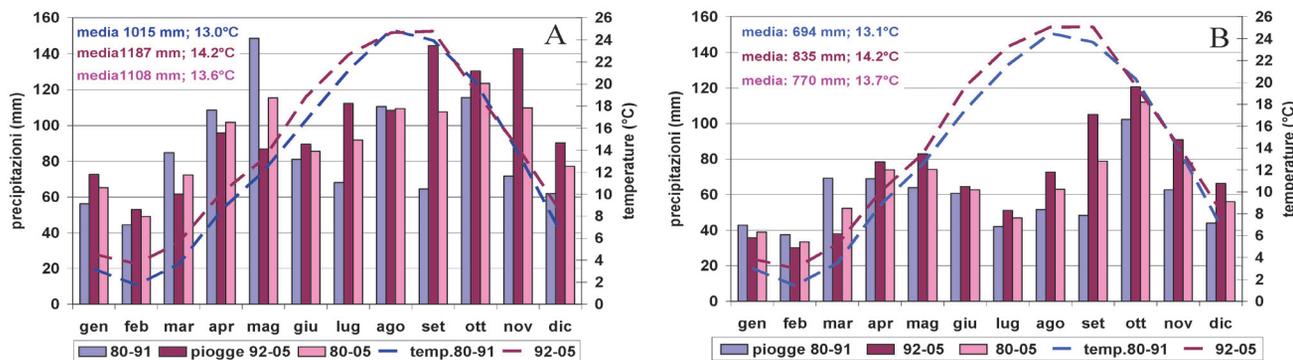
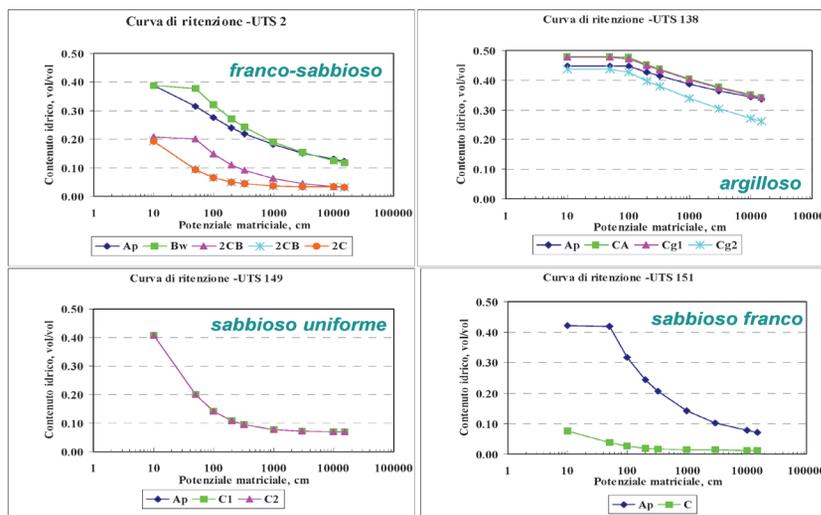


Fig. 5 - Regime delle termo-pluviometrico nelle stazioni d'interesse: A) stazione di Monza; B) stazione di Cremona
- Temperature-precipitation regime in meteorological stations examined: A) Monza; B) Cremona

vamente di 1108 mm/anno per Monza e di 770 mm/anno per Cremona, ed entrambe presentano precipitazioni maggiori nel periodo 1992-2005 rispetto al periodo precedente considerato (1980-1991). Mentre il regime delle precipitazioni a Cremona presenta, per entrambi i periodi, un massimo assoluto nel periodo autunnale (102.3 ottobre 1980-1991; 120.5 ottobre 1992-2005) e relativo in quello primaverile, a Monza si osserva uno spostamento, dal primo al secondo periodo, del massimo assoluto dalla primavera (148.6 mm maggio 1980-1991) all'autunno (144.6 mm settembre 1992-2005); sempre a Monza rilevanti appaiono inoltre le precipitazioni temporalesche di agosto (109.3 mm 1980-2005). Per quanto riguarda le temperature, queste sono molto simili su tutta l'area, con medie di 13.6 °C a Monza e di 13.7°C a Cremona, ma si osserva una crescita delle stesse nel periodo 1992-2005 di circa 1°C passando da un valore medio di 13.0, 13.1°C del 1980-1991 a un valore medio di 14.2°C nel periodo 1992-2005

La scelta delle due stazioni ha condotto a suddividere l'area in due settori, settentrionale e meridionale, separati dalla linea in Fig. 6, rispettivamente influenzate dal clima di Monza e di Cremona. La medesima suddivisione è stata utilizzata ai fini della definizione dello spessore del profilo, definito sulla base della soggiacenza media, considerato uniformemente di 20 m per l'area settentrionale (pedemontana e di alta pianura) e di 7 m per quella meridionale (media e bassa pianura). In futuro s'intende considerare un numero maggiore di stazioni e di classi di spessori del profilo al fine di meglio dettagliare i risultati sull'area.

Per quanto riguarda l'uso del suolo, è stato scelto di simulare la presenza di prato perenne su tutta l'area, cautelativa rispetto ad un suolo nudo o una coltivazione irrigua, tipo mais, relativamente ai quali il flusso alla base dei profili risulterebbe superiore.

La valutazione della ricarica nell'area non ha al momento considerato l'influenza delle irrigazioni, in quanto non è stato possibile regionalizzare gli apporti irrigui nell'area.

L'effetto della presenza di aree urbanizzate è stato considerato in un secondo momento, ipotizzando che su tali aree l'infiltrazione

higher precipitation values in the 1992-2005 period with respect to the previous period considered (1980-1991). Whereas the precipitation regime in Cremona shows, for both periods, an absolute maximum in the autumn (102.3 mm October 1980-1991; 120.5 mm October 1992-2005) and a relative maximum in the spring, in Monza a deviation is observed from the first to the second period, with an absolute maximum in the spring (148.6 mm May 1980-1991) and a relative one in the autumn (144.6 mm September 1992-2005). For Monza, the rainstorms of August (109.3 mm 1980-2005) are particularly relevant. Temperatures are quite similar in all the study area, with average values of 13.6 °C in Monza and 13.7 °C in Cremona. In addition, a temperature increase of about 1 °C is observed in the 1992-2005 period, from a mean value of 13.1 °C (1980-1991) to 14.2 °C (1992-2005).

The choice of these two meteorological stations led us to subdivide the area into two sectors, northern and southern, separated by the line shown in Fig. 6, which are influenced by the climate of Monza and Cremona, respectively. The same subdivision was used for defining thickness classes that were identified for the profiles on the basis of the mean depth of the water table. The thickness classes thus chosen were considered uniform in the two areas, producing a value of 20 m in the northern sector (foothills and upper plain) and of 7 m in the southern sector (mid-lower plain). A higher number of stations and profile thickness classes have been planned for the future, in order to produce a more detailed picture of all the area.

Regarding soil use, the presence of perennial meadowland was simulated for all the area. This is a cautionary choice compared with bare soil or irrigated crops, such as maize, since in these cases the profiles' bottom flows would be higher.

So far, estimating the recharge in the study area has not taken into account the influence of irrigation, since it has not been possible to calculate the water input resulting from this practice.

The effect of urban areas was considered only in a second phase of the investigations, assuming that in developed areas infiltration

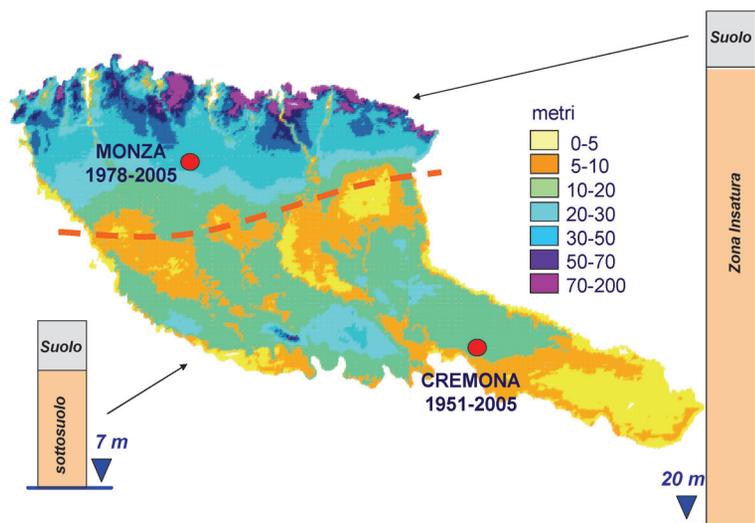


Fig. 6 - Carta della soggiacenza e suddivisione nei settori settentrionale e meridionale, che si differenziano per lo spessore medio del profilo (20 e 7 m) e per la stazione meteorologica di riferimento (Monza e Cremona)
 - Map of the water table depth and subdivision in the northern and southern sectors. They differ for the average profile thickness (20 and 7 m, respectively) and for the meteorological reference station (Monza and Cremona, respectively)

sia il 5% di quella teorica simulata. La percentuale utilizzata è solo indicativa di una impermeabilizzazione alta in un contesto di elevato grado di collettamento degli scarichi. Non considera quindi eventuali infiltrazioni che possono verificarsi in tali aree, anche legate alla rete acquedottistica, che pure determinano apporti idrici alla falda.

I profili sono stati considerati di n.10 strati, suddivisi in modo da rispettare le caratteristiche del suolo e zona vadosa presenti nell'area, di spessori variabili da da 3 a 75 cm. La presenza di spessori sottili in superficie migliora le prestazioni del modello, ne deriva che singoli orizzonti pedologici in superficie possano risultare suddivisi in due o più strati.

Nella simulazione è stato considerato un gradiente verticale unitario nel profilo ed è stato posto, come condizione iniziale, un contenuto idrico pari alla capacità di campo dei singoli strati.

Tra gli output del modello, rappresentati dalle voci del bilancio idrico del suolo e della coltura a scala giornaliera, è stata considerata la percolazione alla base del profilo, considerata quale ricarica della falda.

VERIFICA DELLA METODOLOGIA SU PROFILI CAMPIONE

L'applicazione della metodologia e le risposte del modello sono state analizzate e valutate in corrispondenza di tre profili campione, scelti tra profili analizzati appartenenti ad aree asciutte ed irrigue del territorio della provincia di Milano. I tre profili (suoli TCC1 a Muggiò, CNN a Masate, GRD1 a Melzo) sono caratterizzati da differenti situazioni pedologiche, geologiche ed idrogeologiche, in quanto appartenenti, rispettivamente, ad un terrazzo ferretizzato, all'alta pianura fluvioglaciale ed alla bassa pianura idromorfa. I dati di livello piezometrico, relativi ai pozzi presenti in prossimità delle aree prescelte, sono stati raccolti ed analizzati.

Le caratteristiche del suolo e della zona vadosa sono state rispettivamente derivate dalle descrizioni in letteratura (ERSAF, 1999) e dalle stratigrafie dei pozzi presenti nell'area. Lo spessore della zona non

is 5% of the value obtained by theoretical simulation. The percentage utilised is only indicative of rather impermeable soil in a context characterised by a high density of sewers. Therefore, possible infiltration in these areas is neglected, although it is well known that leaks from water supply pipelines and other forms of infiltration can take place and feed the groundwater.

The profiles chosen are constituted by 10 layers, subdivided in order to respect soil characteristics and the vadose zone. These layers have a thickness of 3 to 75 cm. The presence of thin layers on the surface improves the model's reliability. As a consequence, single pedological horizons at the surface may be divided into two or more layers.

The simulation was also based on a single vertical gradient and, as a starting condition, a water content equal to the field capacity of the single layers was chosen.

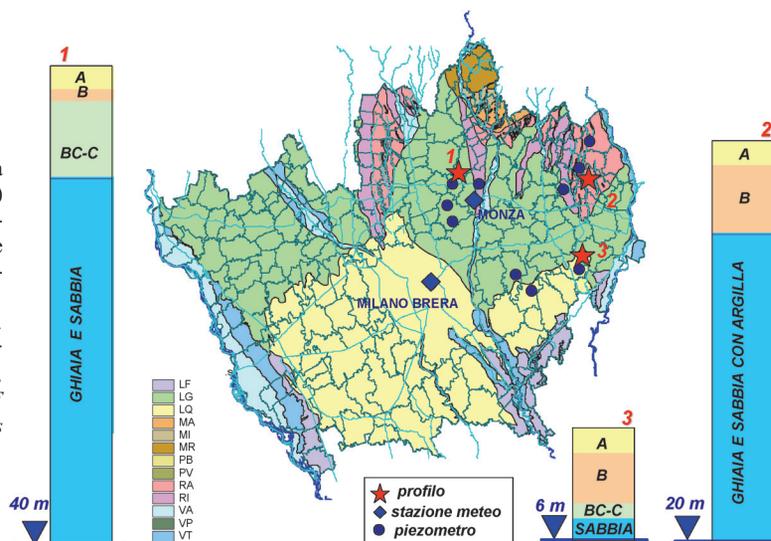
As well as the soil's daily water balance outputs, the model showed percolation at the bottom of the profile that we considered the groundwater recharge.

TESTING THE METHODOLOGY ON SAMPLE PROFILES

The application of this methodology and the response of the model were analysed and assessed on three sample profiles, chosen from among the profiles of both dry and irrigated areas of the Province of Milan. These three profiles (soils TCC1 in Muggiò, CNN in Masate, GRD1 in Melzo) are characterised by different pedological, geological and hydrogeological situations, since they are from a ferretized terrace, the high fluvioglacial plain and the low hydromorphic plain. Data have also been collected and analysed concerning the piezometric levels of wells located in proximity of the chosen areas.

The characteristics of the soils were defined after descriptions from specific literature (ERSAF, 1999) whereas those of the vadose zone resulted from the stratigraphy of the wells found in the study area. The thickness of the unsaturated zone was estimated on the basis

Fig. 7 - Profili di verifica della metodologia (area campione: provincia di Milano). Carta delle unità di pedopaesaggio (ERSAF, 1999) P- substrato roccioso (B basale; V fodivalle); M- anfitratti morenici (A antichi, I intermedi, R recenti); L- piana fluvioglaciale (G ghiaiosa, Q idromorfa, F sabbiosa); V- valli alluvionali (T alluvioni antiche, A alluvionabili, P alluvioni pedoappenniniche) - Methodology test profiles (sample area: Province of Milan). Map of pedological units (ERSAF, 1999): P - bedrock (B basal; V valley floor); M - moraine deposits (A ancient, I intermediate, R recent); L - fluvioglacial plain (G gravel, Q hydromorphic, F sand); V - alluvial valleys (T ancient alluvial deposits, A areas subject to flooding, P - foot of the Apennine alluvial deposits)



saturo, valutato in base ai livelli piezometrici, è rispettivamente di 40, 20 e 6 m nelle tre aree, Muggiò, Masate, Melzo (Fig. 7).

Sulla base delle pedofunzioni di trasferimento (CALZOLARI *et alii*, 2001a, 2001b; UNGARO & CALZOLARI, 2001; UNGARO *et alii*, 2005) sono stati determinati i parametri idraulici e le curve di ritenzione.

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando le condizioni climatiche delle stazioni meteorologiche di Monza, per il periodo 1978-2005, e di Milano-Brera, per il periodo 1971-2005, e diversi usi del suolo (nudo e con coltura), col fine di valutare l'effetto delle diverse caratteristiche tessiture e di spessore sulla percolazione alla base dei profili.

Dai risultati ottenuti è stato possibile osservare come le caratteristiche tessiture del suolo, ed in minor misura la granulometria della zona vadosa, incidano in modo rilevante sull'entità della ricarica: per i terrazzi mindeliani, di tessitura fine, essa vale il 29% della precipitazione, mentre nella pianura fluvioglaciale e nella pianura idromorfa, di tessitura più grossolana, ne rappresenta rispettivamente il 65% e il 55%. In queste due ultime simulazioni il diverso valore di soggiacenza della falda (6 m e 20 m) non influisce tanto sull'entità della ricarica quanto piuttosto sulla modalità di arrivo in falda, più impulsivo al diminuire della soggiacenza. La presenza di vegetazione, nel caso di simulazione di mais (irriguo nel periodo aprile-settembre), determina un'evapotraspirazione che riduce la percolazione nella pianura fluvioglaciale dal 65% al 43%.

Per quanto concerne il rapporto tra ricarica e precipitazioni, si osserva una coincidenza tra gli eventi di ricarica e periodi di rilevante precipitazione, per esempio negli anni '50 e '70.

Una valutazione della metodica adottata è stata effettuata mediante confronto tra l'andamento temporale della ricarica e quello dell'oscillazione piezometrica nei due siti più settentrionali (Muggiò e Masate), non interessati dall'irrigazione, relativamente alla quale i dati disponibili sono comunque incompleti (Fig. 8A, 8B): si osserva una buona congruenza tra andamenti della ricarica e della piezome-

of the piezometric levels and resulted to be 40, 20 and 6 m, respectively, in the three areas surveyed, Muggiò, Masate, Melzo (Fig. 7).

The hydraulic parameters and the retention curves were determined on the basis of the pedological transfer functions (CALZOLARI *et alii*, 2001a, 2001b; UNGARO & CALZOLARI, 2001; UNGARO *et alii*, 2005).

Simulations were carried out by utilising the climate conditions of the Monza meteorological gauge, in the 1978-2005 period, and of Milano-Brera, in the 1971-2005 period. Furthermore, diverse soil conditions (bare or covered with crops) were considered in order to assess the effect of the different textural and thickness characteristics on percolation at the bottom of profiles in different cases.

From the results obtained, it is possible to observe how soil texture characteristics and, to a lesser degree, particle-size distribution in the vadose zone considerably affect the amount of recharge: in the fine-textured ferretized terraces recharge is 29% of precipitation, whereas in the coarse-textured fluvioglacial and hydromorphic plains recharge is 65% and 55% of precipitation, respectively. In the latter two simulations the different values of water table depth (6 m and 20 m) do not affect so much the amount of recharge but rather the pattern through which percolation water reaches groundwater, which is more impulsive as the depth of the water table decreases. The presence of vegetation, using maize as a crop in the simulation (an irrigated crop, growing in the April-September period), affects evapotranspiration which, in turn, reduces percolation in the fluvioglacial plain from 65% to 43%.

As regards the relationship between recharge and precipitation, a coincidence between recharge events and periods of intense precipitation is observed, for example in the 1950s and 1970s.

Evaluation of the methodology adopted was carried out by comparing the temporal recharge trend with piezometric fluctuations in the two northernmost sites (Muggiò and Masate), which were not affected by irrigation. Even if they had an incomplete sets of data (Figs. 8A and 8B), good congruence was observed between recharge and

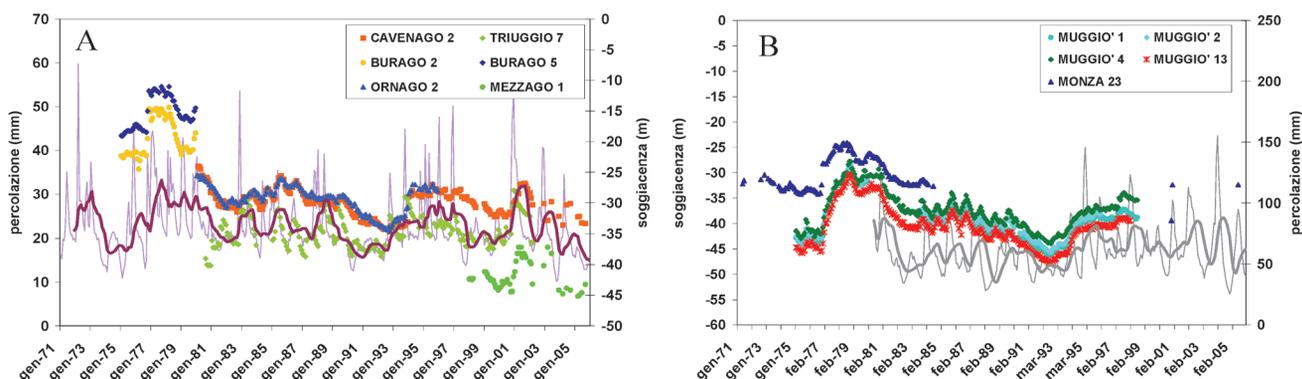


Fig. 8 - Relazione tra andamento temporale della ricarica per i profili campione e misure piezometriche in pozzi prossimi. Le linee continue rappresentano la ricarica e la sua media mobile con intervallo di 12 mesi; le serie di punti rappresentano i livelli piezometrici dei pozzi in legenda. A) Masate, stazione meteorologica di simulazione di Milano Brera (1971-2005), distanza media dai pozzi: 26 km; B) Muggiò, stazione meteorologica di simulazione di Monza (1979-2005) distanza media dai pozzi: 4km

- Relationship between temporal recharge in sample profiles and piezometric measurements in proximal wells. Continuous lines represent recharge and its mobile mean with interval of 12 months; series with dots represent the piezometric levels of the wells in the legend: A) Masate, Milano Brera simulation meteorological station (1971-2005), average distance from wells 26 km; B) Muggiò, Monza simulation meteorological station (1979-2005), average distance from wells 4 km

tria, tanto migliore quanto più la stazione meteo scelta per la simulazione si avvicina al pozzo di misura del livello piezometrico, indice questo, dell'influenza della variazione areale delle precipitazioni sull'andamento della falda.

Una seconda valutazione si basa sulla quantificazione del bilancio entrate-uscite della falda nei due siti ottenuta attraverso la sommatoria delle oscillazioni positive del livello piezometrico, considerate come "entrate", e di quelle negative, che invece rappresentano le "uscite". Poichè per tali siti le entrate sono rappresentate dalla ricarica legata alla precipitazione, e considerando che l'entità dell'oscillazione piezometrica è funzione della porosità dell'acquifero, ossia della sua capacità d'immagazzinamento, è stata stimata a ritroso la porosità dell'acquifero, intesa come la porosità per la quale la ricarica simulata risulta identica alle entrate in falda cumulate che ne determinano la variazione di livello. Per le aree di pianura fluvio-glaciale la porosità risulta essere del 22.6%, mentre per quelle di terrazzo ferretizzato del 14.7%; sebbene tale valore di porosità rappresenti un limite inferiore, in quanto il livello viene influenzato anche dal flusso da monte, la congruenza di tali valori con le caratteristiche rispettivamente ghiaioso-sabbiose e ghiaioso-sabbioso-argillose dell'acquifero nei due siti sostiene la validità del metodo.

Con tali premesse, il bilancio complessivo della falda ottenuto confrontando le entrate cumulate e le uscite cumulate dedotte dall'andamento piezometrico, risulterebbe, positivo nel primo caso e negativo nel secondo, con un guadagno dal 1978 al 2005 per l'area di pianura di circa 15.000 m³/ha ed una perdita per l'area in corrispondenza dei terrazzi di circa 10.000 m³/ha.

RISULTATI

Relativamente all'intera area d'interesse, i risultati indicano un'infiltrazione maggiore per le aree settentrionali (Fig. 9), in ragione sia della tessitura più grossolana dei suoli, sia della maggiore intensità delle precipitazioni. Ciò costituisce un fatto importante in quanto, come noto, tali aree sono quelle che idrologicamente rappresentano la

piezometric trends, which improves when the meteorological station chosen for simulation appears to be closer to the tray well where piezometric levels are measured. Furthermore, this shows how the areal variation of precipitation influences the trend of the water table.

A second assessment is based on the quantification of the groundwater input/output balance in the two sites considered. This was obtained by means of the summation of the positive fluctuations of the piezometric level, which were considered as "input", with the negative fluctuations, which were considered as "output". Since the input values in these sites are due to recharge linked to precipitation, and considering also that the amount of piezometric fluctuations is a function of aquifer porosity, which is its specific yield, a back-estimation of aquifer porosity was carried out. This parameter is taken as the porosity for which simulated recharge is equal to cumulated groundwater input, which affects the fluctuations of the water level. In the fluvio-glacial plain areas porosity is 22.6%, and 14.7% in the ferretized fluvial terraces. Although this porosity value corresponds to the lowermost limit, since the level is influenced also by upstream flow, the congruence of these values with the gravely-sandy and gravely-sandy-clayey characteristics of the two sites supports the validity of the calculation method adopted.

Hence, the overall groundwater balance obtained by comparing the cumulated input with the cumulated output, as deduced from the piezometric trend, would be positive in the first case and negative in the second, with an increase of some 15,000 m³/ha in the plain area in the 1978-2005 period, and a loss of some 10,000 m³/ha in the ferretized terraces during the same observation period.

RESULTS

As regards the whole study area, results show higher percolation in the northern sector (Fig. 9), as a consequence of both the coarser soil texture and the greater amount of precipitation. This fact is quite important since, as it is well known, these are the areas where recharge of both the local superficial aquifer and the more

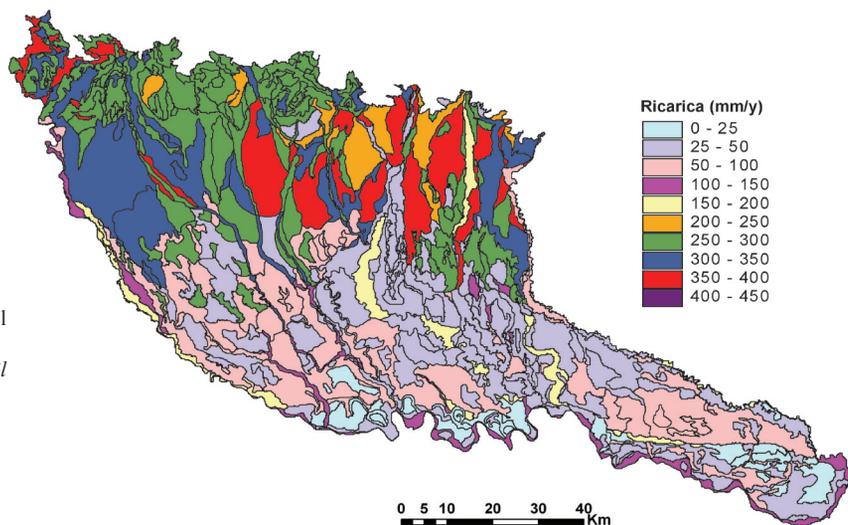


Fig. 9 - Distribuzione areale della ricarica simulata: uso del suolo a prato stabile
 - Areal distribution of simulated recharge: use of soil as stable meadow

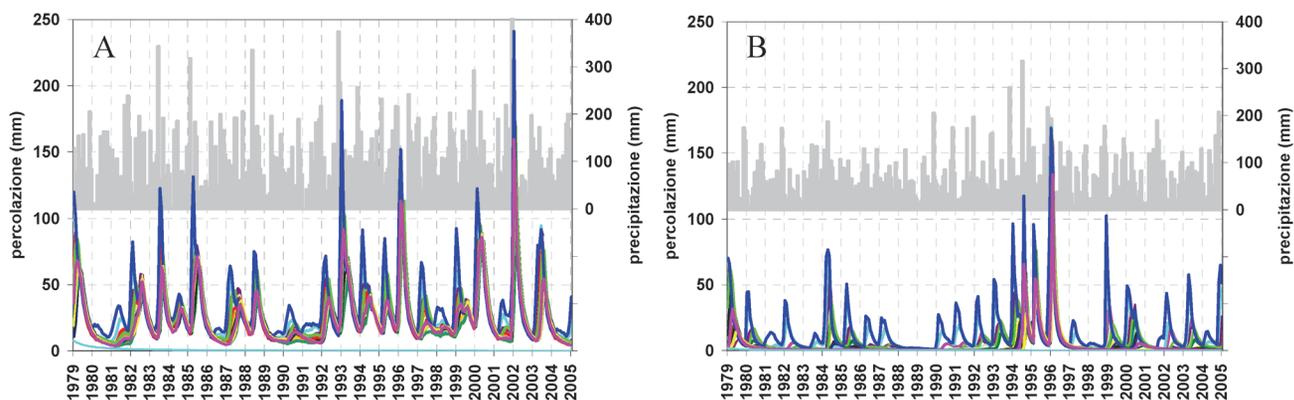


Fig. 10 - Distribuzione mensile delle precipitazioni, in grigio, e relative percolazioni alla base dei singoli profili: i colori si riferiscono ai 39 profili simulati. A) area settentrionale; B) area meridionale
 - Monthly distribution of precipitation (in grey) and relative percolation values at the bottom of single profiles; colours refer to 39 simulated profiles. A) northern area; B) southern area

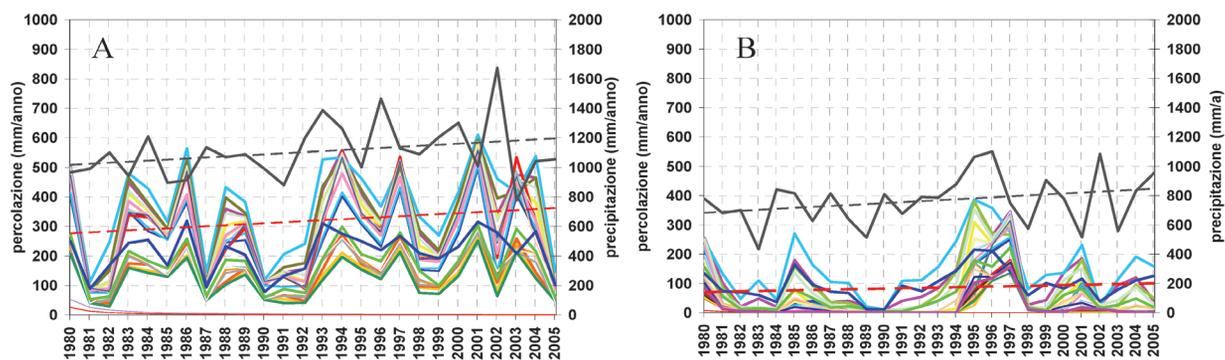


Fig. 11 - Trend annuali della ricarica per diverse UTS di suolo (in colore) e trend delle precipitazioni (in nero) per il periodo di simulazione: A) area settentrionale; B) area meridionale
 - Annual recharge trends for different soil UTSs (in colour) and precipitation trend (in black) for the simulation period: A) northern area; B) southern area

zona di ricarica dell'acquifero superficiale locale e di quelli confinati più meridionali, che rappresentano l'unica riserva di acqua idropotabile per tutto il settore meridionale.

Le distribuzioni mensili delle precipitazioni e delle corrispondenti percolazioni alla base dei profili di simulazione nell'area settentrionale (Fig. 10A) ed in quella meridionale (Fig. 10B) evidenziano l'influenza nelle due aree del regime pluviometrico: le risposte più veloci della percolazione alle precipitazioni intense nell'area settentrionale, visibili per esempio nel 1993 e nel 2002, possono essere attribuiti sia ad un più elevato contenuto idrico medio dei suoli nell'area settentrionale legato alla maggiore entità delle precipitazioni, sia all'intensità stessa dei singoli eventi che favorisce la ricarica.

Il trend del periodo sui valori annuali di precipitazione e di ricarica appare positivo (Fig. 11A e 11B) e si osserva uno scarto apparente tra i picchi dei due fenomeni di circa 1 anno.

In realtà l'analisi del regime della ricarica (Fig. 12A e 12B), confrontato con quello già commentato delle precipitazioni (Fig. 5), consente di osservare uno scarto medio di circa 3-4 mesi tra i due eventi,

distal confined aquifers of the southern sector take place. In the latter area, these confined aquifers make up the only available reserve of groundwater for water supply purposes.

The monthly distribution of precipitation and the corresponding percolation at the bottom of the simulation profiles in the northern area (Fig. 10A) and in the southern area (Fig. 10B) pinpoint the influence of the pluviometric regime in the two areas. The quicker response of percolation to intense precipitation in the northern area (clearly observable, for example, in 1993 and 2002) can be ascribed to both a higher mean water content of the soils linked to the greater amount of precipitation and the intensity of the single meteoric events which favour recharge.

The trend of this period on the annual values of precipitation and recharge appears positive (Figs. 11A and 11B) and an apparent deviation of about 1 year between the peaks of the two phenomena is observed.

As a matter of fact, the analysis of the recharge regime (Figs. 12A and 12B), compared with the previously discussed precipitation trend

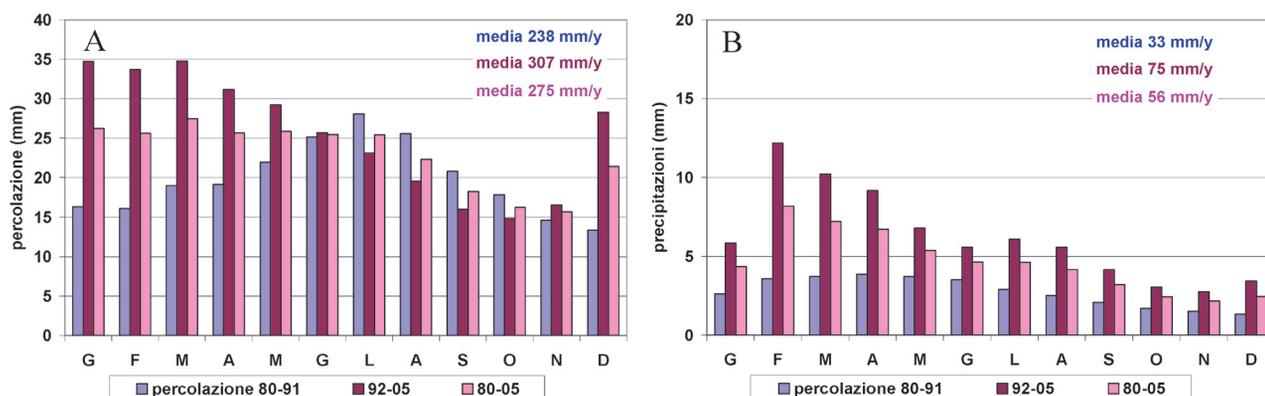


Fig. 12 - Analisi del regime medio mensile della ricarica per periodi temporali parziali (1980-1991 e 1992-2005) e per il periodo totale (1980-2005). A) area settentrionale; B) area meridionale
 - Analysis of mean monthly recharge regime for partial temporal periods (1980-1991 and 1992-2005) and for the total period (1980-2005). A) northern area; B) southern area.

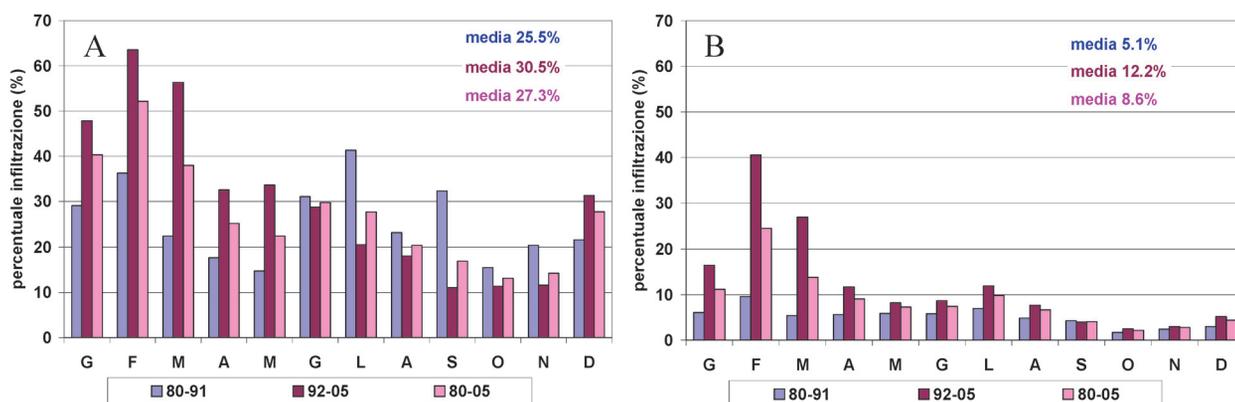


Fig. 13 - Percentuale della ricarica rispetto alle precipitazioni per periodi temporali parziali (1980-1991 e 1992-2005) e per il periodo totale (1980-2005). A) area settentrionale; B) area meridionale
 - Percentage of recharge compared with precipitation for partial temporal periods (1980-1991 and 1992-2005) and for the total period (1980-2005). A) northern area; B) southern area

per cui i massimi di precipitazione autunnali di settembre-novembre si traducono in una percolazione invernale-primaverile di gennaio-marzo.

Si osserva nel complesso una ricarica media di 275 mm/anno nell'area settentrionale ed una ricarica di 56 mm/anno in quella meridionale.

L'efficacia delle precipitazioni rispetto alla ricarica è maggiore nel periodo autunnale-invernale rispetto a quello primaverile-estivo, in ragione sia dell'elevato contenuto idrico del terreno sia delle minori temperatura ed evapotraspirazione. Questo appare infatti evidente in Fig. 13: a febbraio-marzo in entrambe le aree si ha il rapporto più elevato tra ricarica e precipitazioni e questo appare particolarmente rilevante nell'area settentrionale dove le precipitazioni sono maggiori e l'aliquota persa per evapotraspirazione minore.

Si è voluto valutare l'effetto che l'urbanizzazione ha sulla ricarica dell'area, al fine di evidenziarne un possibile impatto di un uso del suolo particolarmente esteso nel territorio in esame (Fig. 14). A

(Fig. 5), allows the observation of an average deviation of some 3-4 months between the two events. As a consequence, the maximum autumn precipitation peaks of September-November turn into a winter-spring percolation in January-March.

On the whole, a mean recharge of 275 mm/year is observed in the northern area and a mean recharge of 56 mm/year in the southern one.

The efficiency of precipitation with respect to recharge is higher in the autumn-winter period than in the spring-summer period, owing to both higher soil's water content and lower temperature and evapotranspiration. This fact appears evident in Fig. 13: in February-March in both areas the highest ratio between recharge and precipitation was recorded; this is particularly relevant in the northern area, where precipitation is higher and the amount lost for evapotranspiration lower.

Also the effect of urban development on groundwater recharge was assessed, considering that this specific use of the soil is par-

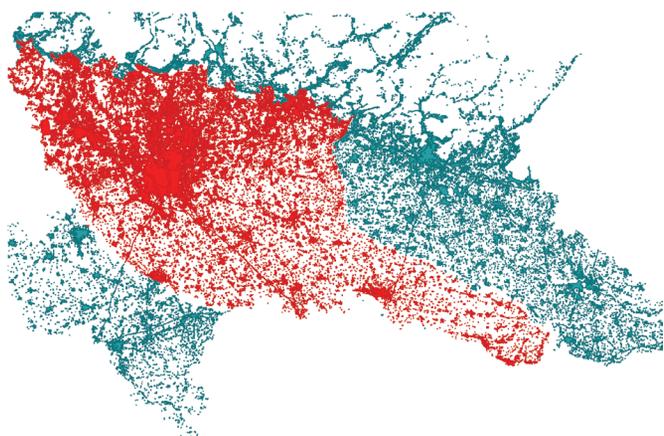


Fig. 14 - Estensione delle aree urbanizzate nella pianura lombarda: in rosso nell'area d'interesse
 - Extent of urban developed areas in the Lombardy Plain: the study area is shown in red.

tal fine è stata sottratta alle diverse aree la frazione di area urbanizzata e per esse è stata valutata una ricarica uguale al 5% di quella teoricamente simulata per l'area.

La scelta dell'aliquota d'infiltrazione è basata su un'analisi dei valori di Curve Number (CN) (United States Department of Agriculture, 1986) su di un'estensione dell'area urbanizzata derivata dalla Carta Tecnica Regionale al 10:000.

Sebbene studi in letteratura mettano in evidenza la possibilità che in corrispondenza delle aree urbanizzate si verifichi un incremento della ricarica, piuttosto che una diminuzione, legato allo scarico di acque sul suolo, alla riduzione dell'evapotraspirazione, a perdite delle reti di distribuzione e di collettamento di acque eventualmente anche prelevate al di fuori dell'area stessa, (FOSTER *et alii*, 1993), nel caso presente si è voluto stimare l'effetto di una impermeabilizzazione intensa in un'area storicamente ben servita da sottoservizi acquedottistici e fognari che interessano praticamente la totalità delle aree. In particolare le reti acquedottistiche presentano per lo più un'elevata efficienza, con perdite ridotte al 12% circa a Milano di acque sotterranee prelevate al di sotto dell'area stessa ed i collettamenti fognari, capillari, scaricano a valle degli abitati in corsi d'acqua superficiali.

Il presente studio non ha tuttavia considerato né l'effetto che eventi eccezionali intensi possono avere sulle perdite fognarie e sulle infiltrazioni superficiali, né l'effetto della diminuzione della voce di evapotraspirazione, fattori che sicuramente rivestono una certa importanza.

Con tali premesse, l'entità dell'infiltrazione simulata appare diminuita un modo considerevole (Fig. 15) in particolare nell'area settentrionale, a più densa urbanizzazione, che rappresenta l'area di alimentazione delle falde più a valle. La riduzione media varia dal 38% in provincia di Milano, a 35% nell'area di pianura settentrionale per ridursi al 16% nell'area centrale ed al 8% a sud (Fig. 16).

CONCLUSIONI

La metodica proposta per la stima della voce di bilancio relativa alla ricarica della falda da eventi meteorici nell'area di pianura lom-

particularly widespread in the study area (Fig. 14). For this purpose the fraction of developed area was subtracted from the total area, assigning to it a recharge equal to 5% of the theoretical simulated recharge for the same area.

The amount of percolation was chosen on the basis of an analysis on the Curve Number (CN) values (United States Department of Agriculture, 1986), calculating the extent of the developed area on the basis of the Regional Ordnance Survey Map (Carta Tecnica Regionale) at a 1:10,000 scale.

Some studies in literature emphasize the possibility that in correspondence with urban areas an increase rather than a decrease of recharge might take place. This would result from the discharge of water on the soil, the reduction of evapotranspiration, losses from the water pipelines that run across the area (FOSTER *et alii*, 1993). Nevertheless, in this study we wanted to estimate the effect of widespread soil waterproofing in an area which is characterised by well developed water-supply and sewage services found all over the areas surveyed. In particular, water-supply networks usually show a higher efficiency; for example, in Milan groundwater losses are reduced to about 12% whereas sewage pipelines discharge their water directly into surface watercourses downstream of the urban centres.

Nevertheless, this research did not take into account the effect that exceptionally intense meteoric events might have on sewage water losses and on superficial infiltration, or the effect resulting from the decrease of evapotranspiration. Indeed, these factors might have a non negligible importance on the overall balance.

Hence, the amount of simulated infiltration appears as considerably reduced (Fig. 15), especially in the northern area (the most densely urbanized zone) in which the recharge of the groundwater located downstream of it takes place. The average reduction goes from 38% in the province of Milan, to 35% in the northern plane, 16% in the central area and 8% in the southern one (Fig. 16).

CONCLUSIONS

The methodology proposed for estimating groundwater recharge from precipitation in the Lombardy Plain comprised between the riv-

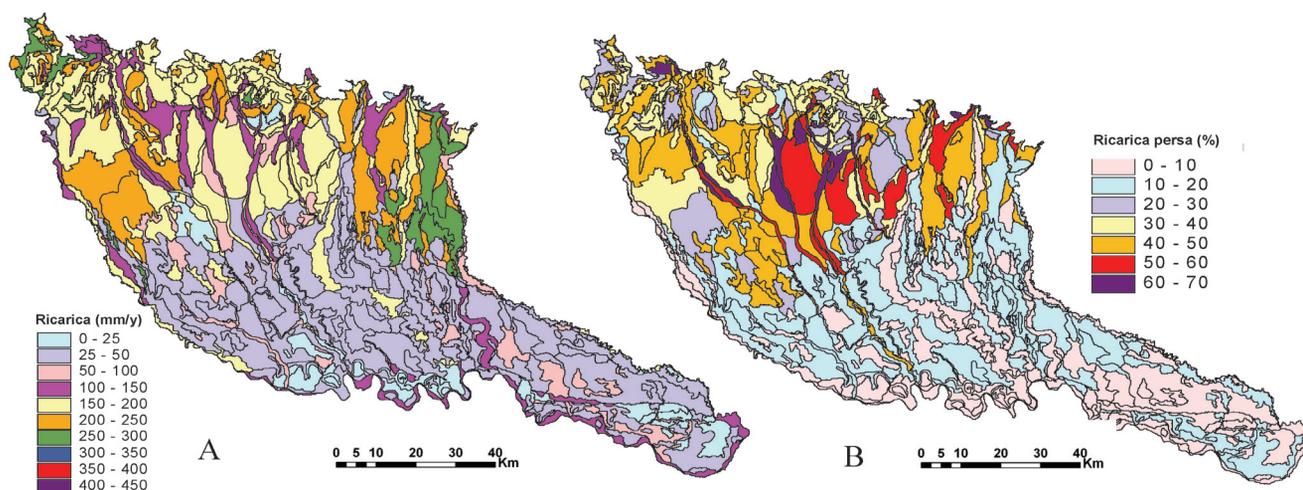
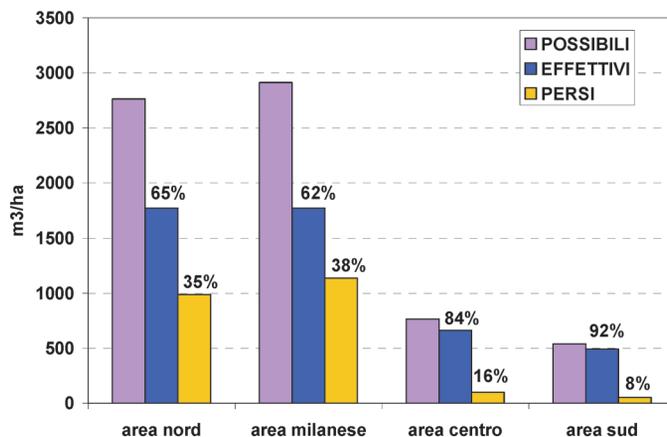


Fig. 15 - Distribuzione areale della ricarica simulata considerando la presenza di aree urbanizzate: A) ricarica effettiva (mm/anno); B) percentuale persa rispetto alla ricarica potenziale (%)
 - Amount of estimated recharge lost due to urban development: A) actual recharge (mm/y); B) Percentage of the lost recharge compared with the potenzial one (%)

Fig. 16 - Stima delle perdite in diversi settori dell'area studiata, differenziate in funzione della densità dell'urbanizzazione
 - Estimation of water losses in different sectors of the study area, differentiated in function of urban development density



barda compresa tra il Fiume Ticino e il Fiume Oglio per un periodo temporale di 26 anni si è basata su un modello concettuale che considera le variazioni climatiche, le tipologie di suolo, lo spessore della zona non satura e l'uso del suolo.

Il codice numerico utilizzato, Macro (JARVIS, 1994), precedentemente sperimentato con buoni risultati in pianura padana, ha consentito di valutare il bilancio idrico dei 39 profili di suolo e zona vadosa individuati come rappresentativi dell'area e di valutare la percolazione alla base degli stessi, considerata quale ricarica.

La verifica del modello effettuata sulla base del confronto della ricarica con l'andamento del livello della falda in due aree campione scelte in provincia di Milano ha dato buoni risultati, supportando la sperimentazione della metodica su tutta l'area.

I risultati mettono in evidenza l'effetto limitante sulla ricarica legato alla tessitura fine del terreno ed alla presenza della vegetazione, in ragione della presenza di minore infiltrabilità nel primo caso e

ers Ticino and Oglio, over a period of 26 years, was based on a conceptual model taking into account climate changes, soil types, thickness of the unsaturated zone and soil use.

The Macro numerical code (JARVIS, 1994), which had been previously tested with good results in the Po Plain, allowed an estimate of water balance in 39 profiles made up of soil and vadose zone. These profiles were considered as representative of the study area. Percolation at the bottom, considered as groundwater recharge, was assessed.

Testing of the model was carried out by comparing recharge with water table trends in two sample areas from the province of Milan and has produced good results, thus supporting the validity of this methodology for all the area.

The results obtained illustrate the constraining effect on recharge linked to a soil's fine texture and the presence of vegetation. This is due to lower infiltration in the first case and to evapotranspiration in the second.

dell'evapotraspirazione nel secondo.

All'aumentare dell'intensità delle precipitazioni si ha un incremento della ricarica, con uno scarto tra i picchi dei due eventi di circa 3 mesi, ed il trend positivo meteorico osservato si riproduce sulla ricarica. Per contro lo spessore del profilo agisce solo sulle modalità di arrivo in falda, incrementando l'effetto dispersivo dell'impulso di ricarica meteorica.

L'effetto dell'urbanizzazione è stato valutato considerando l'elevata efficienza delle reti acquedottistiche e fognarie di una delle aree maggiormente urbanizzate d'Europa, senza valutare l'effetto degli eventi meteorici estremi e della riduzione dell'evapotraspirazione legati all'impermeabilizzazione. Con tali semplificazioni risulta che nelle aree settentrionali, che presenterebbero la ricarica massima e che rappresentano le zone di alimentazione delle falde confinate più a valle, l'entità della ricarica stessa viene ridotta di un'aliquota variabile dal 35% al 38% in funzione della densità dell'urbanizzato.

Tale risultato si ripercuote sulle riserve idropotabili sia in termini quantitativi sia anche, potenzialmente, in termini qualitativi, per la ridotta capacità diluitiva della falda, indicando la necessità di interventi di protezione delle zone di ricarica urbanizzate.

As the intensity of precipitation increases, recharge values also increase, with a deviation between the peaks of the two events of about three months. The positive trend observed is therefore reproduced also for groundwater recharge. On the other hand, the profile thickness influences only the patterns of flow into groundwater, thus increasing the dispersion effect of the meteoric recharge impulse.

The effect of urban development was evaluated by considering the high efficiency of water and sewage networks in one of the most densely inhabited areas in Europe, without taking into account the effect of extreme meteoric events and the reduction of evapotranspiration linked to soil waterproofing. By adopting these simplifications, it may be seen that in the northern sector, where recharge reaches its maximum and where feeding of the downstream confined aquifers also takes place, the recharge amount is reduced by 35-38% owing to the density of urban development.

This result has repercussions on water-supply reserves both in quantitative terms and, potentially, in qualitative terms, due to the reduced dilution capacity of groundwater, thus pointing to the need to implement protection measures in urban recharge zones.

OPERE CITATE / REFERENCES

- BERETTA G.P., FRANCANI V. & FUMAGALLI L. (1992) - *Studio idrogeologico della Provincia di Cremona. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale - Protezione delle Acque Sotterranee*, 24, Pitagora Editrice, Bologna. Pubbl. n. 610 C.N.R.- G.N.C.I. Linea di ricerca n.4
- BEVEN GERMANN, (1981) - *Macropores and water flow in soils*. Water Resour. Res., 18: 1311-1325.
- BONOMI T., CAVALLIN A. & DE AMICIS M (1995) - *Un database per pozzi: Tangram*. Quaderni Geologia Applicata, suppl. n. 3 1/95, 3.461-3.465
- BONOMI T., CANEPA P. & DEL ROSSO F., (2007) - *Modelli tessiturali tridimensionali in acquiferi eterogenei*. Rend. Soc. Geol. It., 4 (2007): Nuova Serie, 19-22, 2 ff.
- BONOMI T., CANEPA P. & DEL ROSSO F., (2009) - *Parametrizzazione 3D e modelli idrogeologici del sottosuolo della Pianura Lombarda*, Istituto Lombardo accademia di scienze e Lettere: 80-104.
- BOUMA J. (1989) - *Using soil survey data for quantitative land evaluation*. In *Advances in Soil Science 9*. Edited by B. A. Stewart, Springer and Verlag, Berlin, 177-213.
- BROOKS R.H. & COREY A.T. (1964) - *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology Paper 3, Colorado State University, Fort Collins.
- CALZOLARI C., UNGARO F., GUERMANDI M. & LARUCCIA N. (2001a) - *Suoli capisaldo della pianura padano-veneta: bilanci idrici e capacità protettiva*. Progetto SINA Carta Pedologica, Sottoprogetto 2. Rapporto 10.1, CNR-IGES Istituto per la Genesi e l'Ecologia del Suolo, Firenze.
- CALZOLARI C., UNGARO F., MARCHETTI R., PONZONI G., SPALLACCI P., GUERMANDI M., FUMAGALLI L. & MANTOVI P. (2001b) - *I modelli MACRO e SOILN: l'esperienza del progetto SINA: Carta pedologica in aree a rischio ambientale*. Modellistica e qualità ambientale dei suoli. ANPA-RTI CTN_SSC 1/2001, Stampa ARPA Piemonte 2001, Torino: 79-103
- CAVALLIN A., FRANCANI V. & MAZZARELLA S. (1983) - *Studio idrogeologico della pianura compresa tra Adda e Ticino*. Costruzioni, XXXII, 326, 39 pp.
- ERSAF, REGIONE LOMBARDIA (1999) - *I suoli della pianura milanese settentrionale. Progetto "Carta Pedologica"*. Arti Grafiche veremati, Vimercate (MI).
- FAYER M.J. (2000) - *UNSAT-H Version 3.0: unsaturated soil water and heat flow model, theory, user manual, and examples*. Rep 13249. Battelle Pacific Northwest Laboratory, Hanford, Washington.
- FETTER C.W. (1994) - *Applied hydrogeology*. Prentice Hall, 691 pp.
- FINCH J.W.F. (1998) - *Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model - sensitivity to land surface parameters*. J. Hydrol., 211: 112-125.
- FOSTER S.S.D., MORRIS B.L. & LAWRENCE A.R. (1993) - *Effects of Urbanization on groundwater recharge*, in Wilkinson, W.B., (ed), *Groundwater Problems in Urban Areas*, Proceeding of Institution of Civil Engineers, London: 43-63.
- FUMAGALLI L., GUERMANDI M. & LARUCCIA N. (2008) - *Modellizzazione del bilancio idrico e dell'azoto in suoli della pianura reggiana per la valutazione della capacità di attenuazione all'inquinamento da nitrati di origine agricola delle acque sotterranee*. Giornale di Geologia Applicata, 9 (2): 199-206. DOI: 10.1474/GGA.2008-09.2-09.0239.
- FREEZE R.A. & CHERRY J.A. (1979) - *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, 604 pp.
- HARGREAVES G.H. & SAMANI Z.A. (1994) - *Estimating potential evapotranspiration*. Tech. Note, Journal of Irrigation Drainage Engineering, 1982, 108 (3): 225-230.
- HSIEH P.A., WINGLE W. & HEALY R.W. (2000) - *VS2DT: a graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media*. US Geol Surv Water-Resour Invest Rep 99-4130:16

MODELLING THE UNSATURATED ZONE FOR ASSESSING GROUNDWATER RECHARGE

- JARVIS N. (1994) - *The MACRO model (version 3.1) Technical description and sample simulations*. Reports and dissertations 19, Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Soil Sciences, Uppsala.
- LAPPALA E.G., HEALY R.W. & WEEKS E.P. (1987) - *Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media*. US Geol Surv Water-Resour Invest Rep 83-4099:184.
- LARSSON M.H. & JARVIS N.J. (1999) - *A dual porosity model to quantify macropore flow effect on nitrate leaching*. J. Environ. Qual., **28**: 1298-1307.
- MANTOVI P., TABAGLIO V., LIGABUE M., FUMAGALLI L., DAVOLIO R., GUERMANDI M. & BERETTA G.P. (2004) - *Il Progetto GeTraMiN: Controllo della genesi trasformazione e migrazione dei nitrati dal suolo alle acque superficiali e sotterranee*. Atti del Convegno Internazionale Sistemi Agricoli e Inquinamento da Nitrati, libri/ARPA Umbria, Ed. CRACE, Perugia: 227-243.
- MANTOVI P., FUMAGALLI L., BERETTA G.P. & GUERMANDI M. (2006) - *Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications*. Journal of Hydrology, **316**: 195-212.
- MARCHETTI R., PONZONI G., SPALLACCI P., CEOTTO E., UNGARO F. & CALZOLARI C. (2000) - *Simulating water flow in areas at environmental risk with MACRO model. Model evaluation with data from lysimeter studies*. Proceedings of the International Congress Vulnerabilità e Sensibilità dei Suoli. Florence, November 1999.
- MUALEM Y. (1976) - *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resources Research, **12** (3). Regione Emilia Romagna, 2004. Carta dei suoli regionale. R.E.R., Servizio Cartografico - Ufficio Pedologico.
- ROCKHOLD M.L., FAYER M.J., KINCAID C.T. & GEE G.W. (1995) - *Estimation of natural ground water recharge for the performance assessment of a low-level waste disposal facility at the Hanford site*. Publ PNL-10508. Battelle Pacific Northwest Laboratory, Hanford, Washington
- RUSHTON K.R. & WARD C. (1979) - *The estimation of groundwater recharge*. J. Hydrol., **41**: 345-361.
- SIMUNEK J., SEJNA M., VAN GENUCHTEN M.T. (1996) - *Hydrus-2D: simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media*. International Groundwater Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- SMETTEM K.R.J. (1987) - *Characterization of water entry into a soil with a contrasting textural class: spatial variability of infiltration parameters and influence of macroporosity*. Soil Sci., **144**: 167-174.
- UNGARO F. & CALZOLARI C. (1997) - *Metodi indiretti per la stima delle proprietà idrologiche del suolo*. C.N.R. IGES Istituto per la Genesi e l'Ecologia del Suolo Firenze.
- UNGARO F. & CALZOLARI C. (2000) - *Soil water content estimation: performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties in areas at high environmental risk of the Pianura Padano-veneta (Northern Italy)*. In Atti del 7° Convegno Internazionale ICCTA Computer Technology in Agricultural Management and Risk Prevention, Firenze, 15-18 novembre 1998, 147-156.
- UNGARO F. & CALZOLARI C. (2001) - *Using existing soil databases for estimating water-retention properties for soils of the Pianura Padano-Veneta region of North Italy*. Geoderma, **99**: 99-121.
- UNGARO F., CALZOLARI C. & BUSONI E. (2005) - *Development of pedotransfer functions using a group method of data handling for the soil of the Pianura Padano-Veneta region of North Italy*. Water retention properties. Geoderma, **124/3-4**: 293-317.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1986) - *Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55 (TR-55) (Second Edition ed.)*. Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
- WILBY R., GREENFIELD, B. & GLENNY, C. (1994) - *A coupled synoptic hydrological model for climate change impact assessment*. J. Hydrol., **153**: 265-290.

Received April 2010 - Accepted September 2010