

Allegato D: Bilancio Idrologico

Alberto Guadagnini, Laura Guadagnini, Monica Riva, Enrico Larcán, Enrico Orsi,

Matteo Salmaso

Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie e Rilevamento,

Politecnico di Milano, Milano

Il calcolo del bilancio idrologico all'interno dell'area definita del *modello a grande scala* è stato condotto a partire dai dati contenuti nella base informativa di seguito descritta. Sono stati utilizzati dati relativi al periodo 2003 – 2006. Solo nel caso delle misurazioni delle portate in uscita dai fontanili si è reso necessario fare riferimento ad annate antecedenti tale finestra temporale, in quanto gli unici dati disponibili sono stati registrati nel biennio 1989-1990. I dati selezionati sono stati quindi aggregati a scala annuale, in modo tale che i termini stimati all'interno del bilancio idrologico rappresentino valori medi annui. Nell'impostazione del bilancio idrologico si è ritenuto opportuno distinguere le porzioni di territorio urbanizzato e non urbanizzato.

Base informativa di riferimento

Meteorologia

Sono state identificate sette stazioni meteorologiche ritenute utili per l'analisi del bilancio idrologico del territorio in esame. La distribuzione territoriale di tali stazioni è riportata in *Figura D.1*. In particolare, la strumentazione installata in corrispondenza delle singole stazioni è in grado di fornire informazioni a cadenza oraria sui seguenti parametri meteorologici:

- altezza di pioggia (P); temperatura (T); velocità del vento (VV); umidità relativa (UR); radiazione globale (RG).

Il monitoraggio è svolto a cura dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente e copre l'intervallo temporale che va dal 1 gennaio 2003 al 31 dicembre 2006. La Tabella D.1 riporta le informazioni anagrafiche delle stazioni meteorologiche prese in esame. Sono riportati, inoltre, i codici identificativi della strumentazione preposta al monitoraggio dei parametri sopra elencati. L'omissione di tale informazione indica che il parametro corrispondente non è monitorato.

Tabella D.1: Anagrafica delle stazioni meteorologiche esaminate

Id_Stazione	Rete	Comune	Provincia	X-UTM (m)	Y-UTM (m)	Quota (m.s.l.m.)	P	T	VV	UR	RG
123	ERSAF	Cavenago d'Adda	LO	1544093	5013099	67	2336	2327	2329	2328	2333
128	ERSAF	Capralba	CR	1550510	5032590	96	2395	2388	2392	2389	2390
132	ERSAF	Stezzano	BG	1551349	5056562	211	2441	2433	2439	2434	2435
137	ERSAF	Rivolta d'Adda	CR	1540748	5032437	102	2502	2497	2500	2498	
596	ARIA	Osio Sotto	BG	1547702	5052177	182	5858	5865		6159	6432
619	ARIA	Cassano d'Adda	MI	1539615	5039648	133	5892	5893		6171	6446
629	ARIA	Crema	CR	1555155	5023905	79	9329	5969	9331	6421	6440

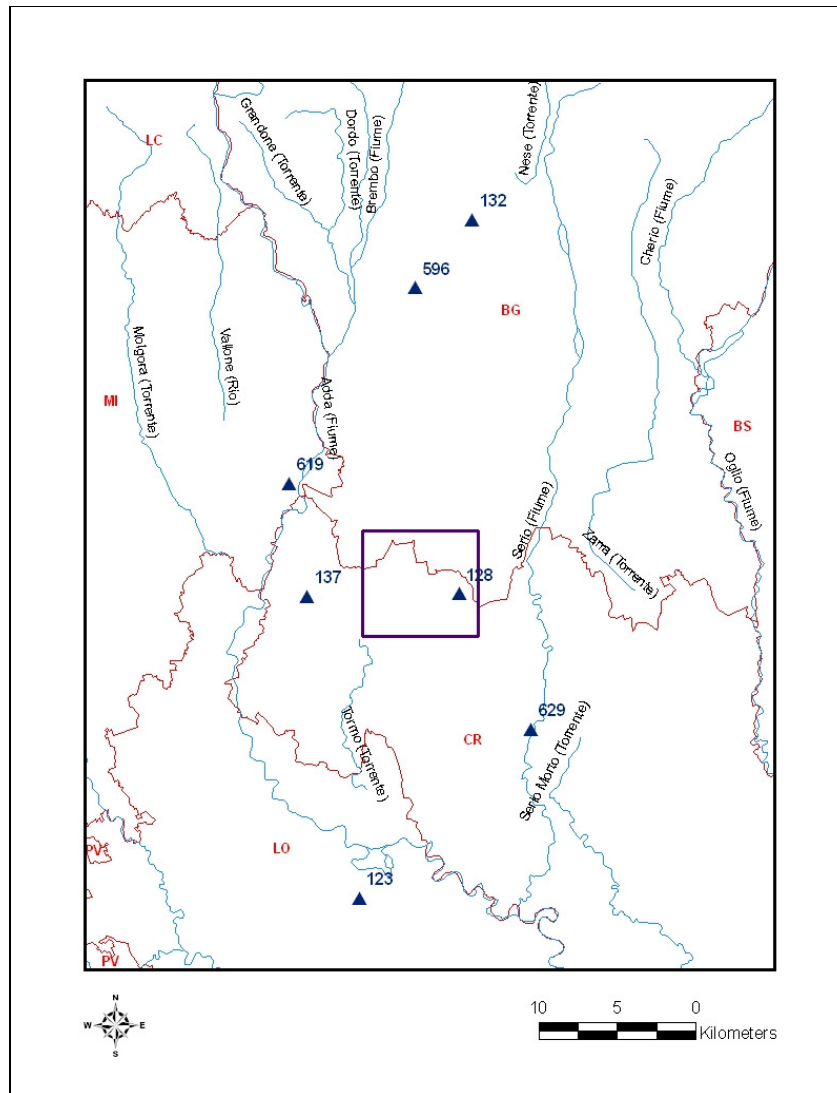


Figura D.1: Localizzazione delle stazioni meteorologiche

Uso del suolo

La fonte principale di informazioni utilizzata per l'identificazione della tipologia di utilizzo del suolo nella regione in esame è costituita dalla Carta CORINE Land Cover 2000 (CLC 2000). Il progetto CORINE Land Cover è parte di una azione supportata dal Consiglio della Comunità Europea nel 1985. Il progetto CLC 2000 ha portato alla realizzazione di una base informativa riguardante la copertura del suolo alla scala 1:100.000. La superficie minima cartografabile è di 25 ettari. La legenda si articola su tre piani: il primo è costituito da 5 voci che comprendono le maggiori categorie di copertura terrestri (territori modellati artificialmente, territori agricoli, territori boscati e ambienti semi-naturali, zone umide, corpi idrici); il secondo livello si compone di 15 voci, adatte ad una rappresentazione a scala 1:500.000/1.000.000; il terzo livello, più

dettagliato, comprende 44 voci adatte quindi per una scala 1:100.000. Un estratto della Carta Corine Land Cover 2000 è riportato in *Figura D.2*.

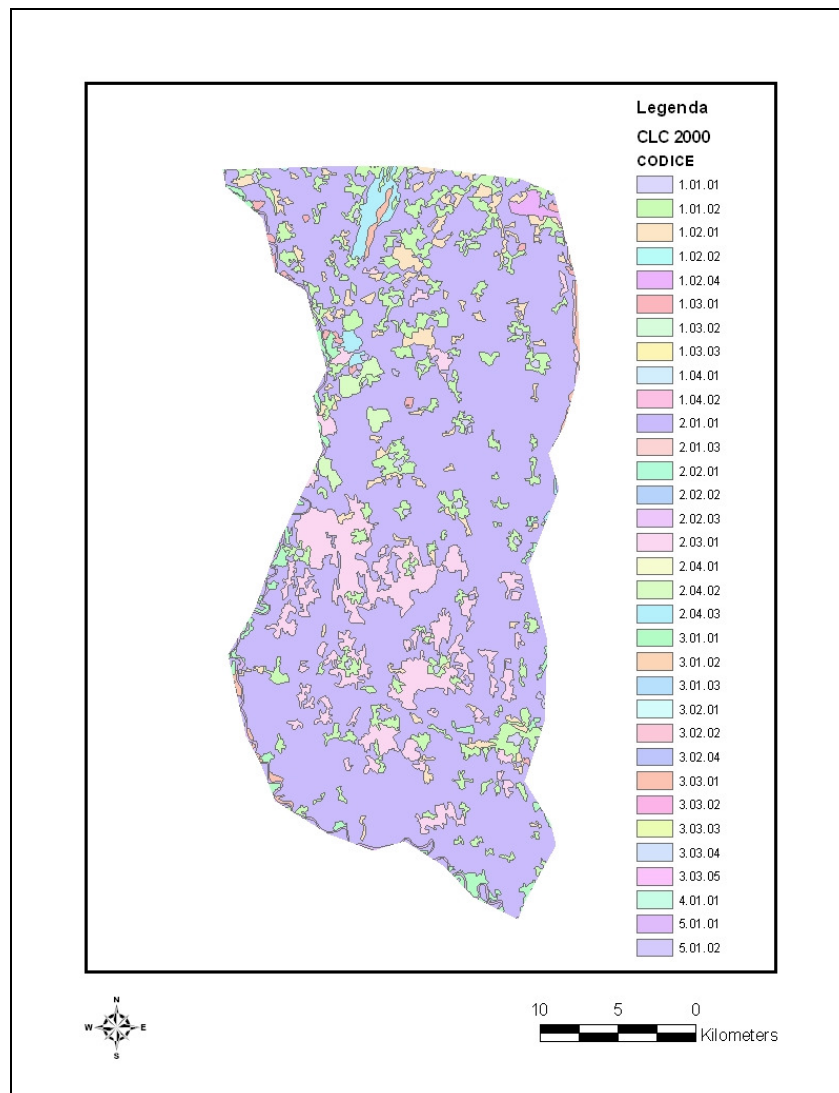


Figura D.2: Estratto della carta CORINE Land Cover 2000 in corrispondenza del modello a grande scala. I codici identificano la tipologia di utilizzo del suolo: 1. Territori modellati artificialmente, 2. Territori agricoli, 3. Territori boscati e ambienti semi-naturali, 4. Zone umide, 5. Corpi idrici

Pedologia

Le caratteristiche pedologiche del territorio regionale sono descritte all'interno della Carta Pedologica a scala di semidettaglio (1:50.000), realizzata da ERSAF su incarico della Regione Lombardia. La Carta Pedologica comprende circa 60 differenti unità cartografiche, ad ognuna delle quali sono associate le seguenti informazioni: codice identificativo dell'unità cartografica, tessitura, gruppo idrologico, drenaggio, permeabilità.

Idrometria superficiale

I fiumi Adda e Serio, come descritto in precedenza, fungono da elementi di delimitazione dell'area di studio. All'interno di questa si sviluppa un fitto reticolo idrografico costituito da derivazioni primarie e canali artificiali secondari e terziari. La *Figura D.3* mostra una rappresentazione schematica del reticolo idrografico superficiale della Provincia di Cremona all'interno della quale vengono evidenziate le principali rogge che derivano in sponda sinistra idrografica del fiume Adda. Le serie temporali delle altezze idrometriche e delle portate medie giornaliere relative a tali canali sono state acquisite dal Consorzio di Miglioramento Fondiario Adda-Serio.

Le stazioni idrometriche presenti all'interno dell'area sono 5 (*Figura D.4*). Di queste, tre sono situate lungo il corso del fiume Adda, rispettivamente in corrispondenza dei comuni di Canonica d'Adda, Spino d'Adda e Lodi; le restanti due sono dislocate lungo il fiume Serio, in corrispondenza dei comuni di Mozzanica e Montodine (*Tabella D.2*). Le serie temporali delle altezze idrometriche, che coprono il periodo 01/01/2003 – 31/05/2007, sono state acquisite dall'ARPA Lombardia. Come si nota, soltanto in alcune stazioni è disponibile la quotatura dello zero di riferimento idrometrico.

Tabella D.2: Anagrafica delle stazioni idrometriche

Id_Idrometro	Comune	X-UTM (m)	Y-UTM (m)	Quota (m.s.l.m.)	Quota Zero Idro (m.s.l.m.)
8544	Mozzanica	1555757	5036388	124	nd
8616	Canonica d'Adda	1541811	5047328	168	nd
8147	Montodine	1555760	5013951	63	54.95
8114	Lodi	1540154	5018122	64	65.01
8387	Spino d'Adda	1536758	5029273	80	nd

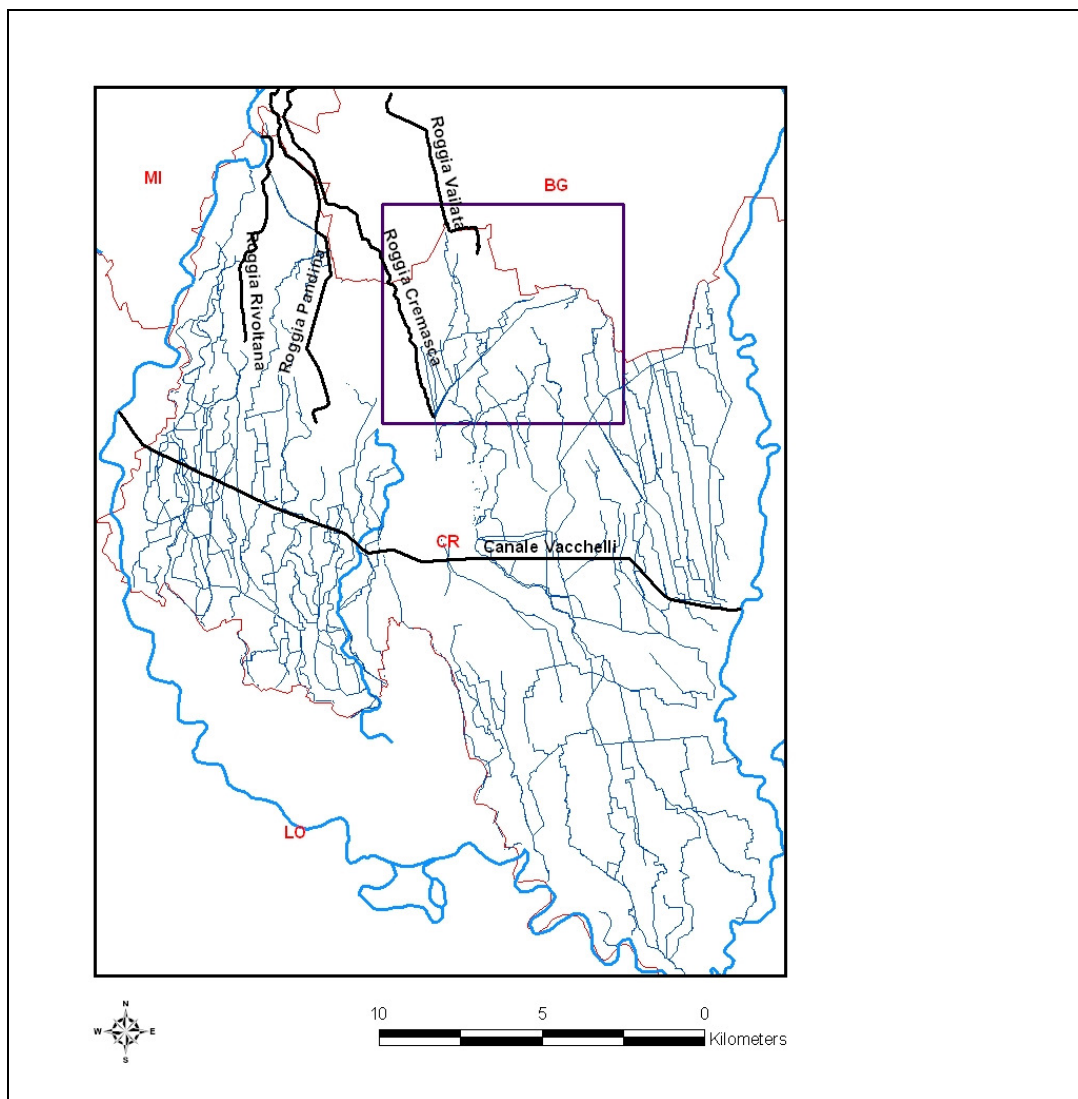


Figura D.3: Reticolo idrografico superficiale della Provincia di Cremona

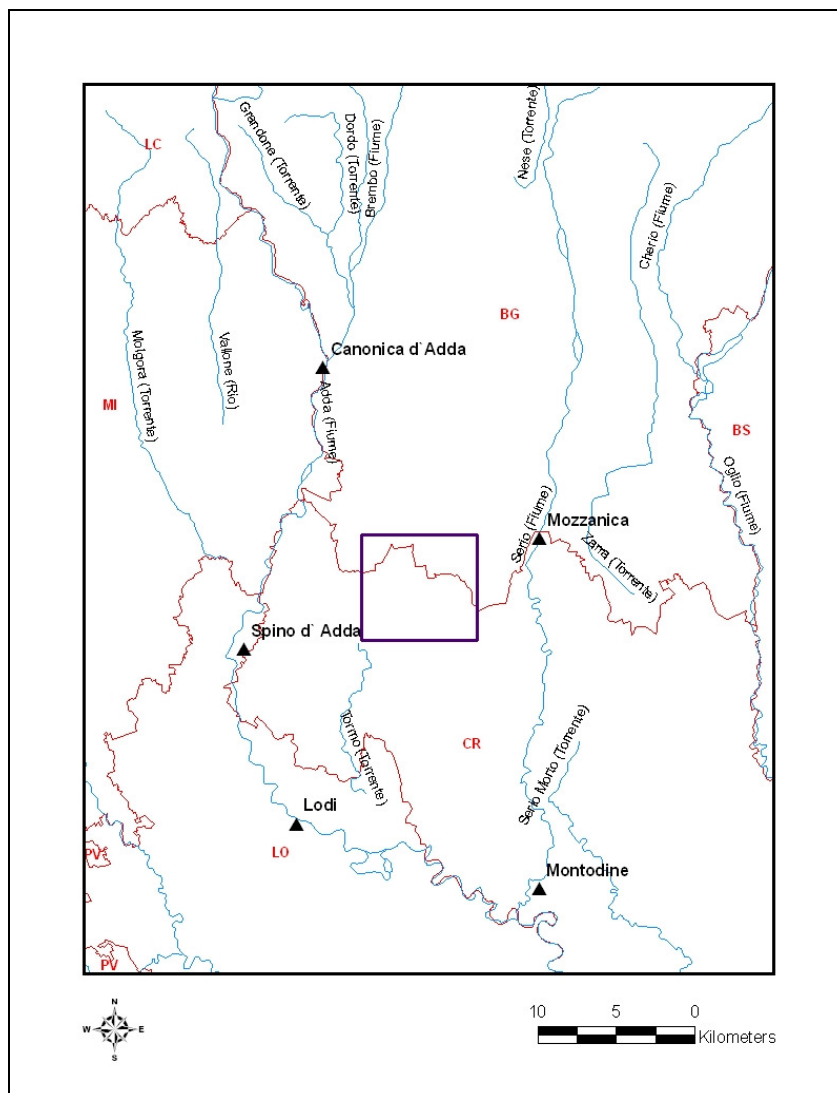


Figura D.4: Localizzazione delle stazioni idrometriche lungo i fiumi Adda e Serio

I dati meteorologici e la loro spazializzazione

Le serie orarie relative alle grandezze monitorate in corrispondenza delle stazioni in esame sono state aggregate a scala mensile. Le *Figure D.5 a-b* rappresentano l'andamento dei valori medi mensili delle grandezze temperatura e precipitazione, rispettivamente.

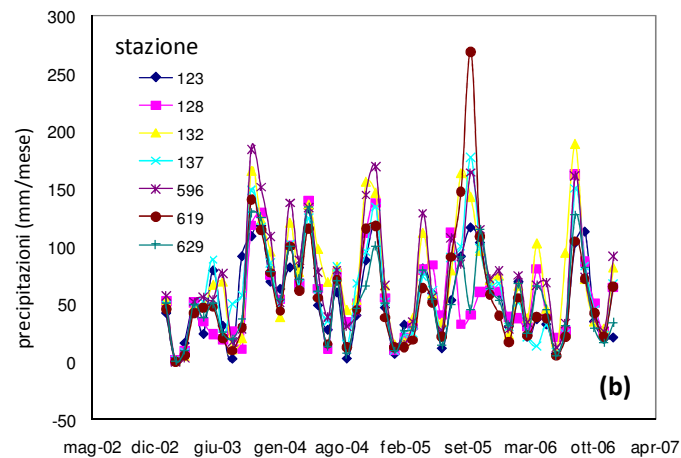
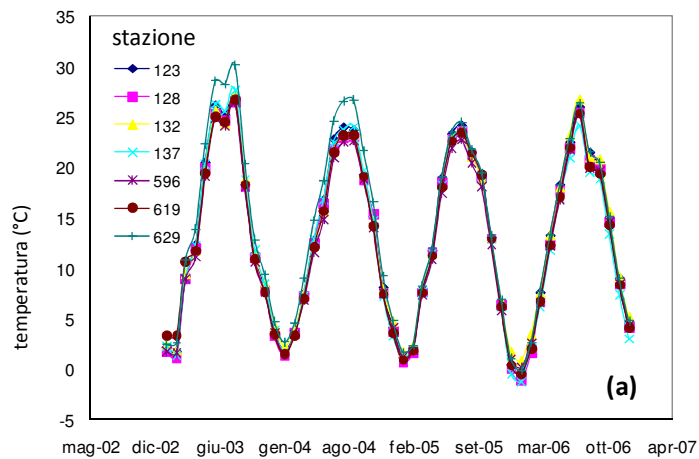


Figura D.5: Andamento dei valori medi mensili di temperatura (a) e precipitazione (b)

Si osserva che i valori di temperatura media mensili registrati in corrispondenza delle stazioni meteorologiche mostrano un andamento molto simile, mentre per quanto riguarda le precipitazioni gli andamenti delle medie mensili mostrano delle differenze non trascurabili.

La spazializzazione dei dati puntuali registrati in corrispondenza delle stazioni meteorologiche è stata condotta attraverso il metodo dei topoi. L'area del modello *a grande scala* è stata suddivisa in sette sottoregioni, per ognuna delle quali la meteorologia è descritta dalle osservazioni effettuate in corrispondenza della stazione meteorologica che si colloca all'interno del topoieta. La *Figura D.6* mostra la localizzazione delle stazioni e la ricostruzione dei poligoni di Thiessen.

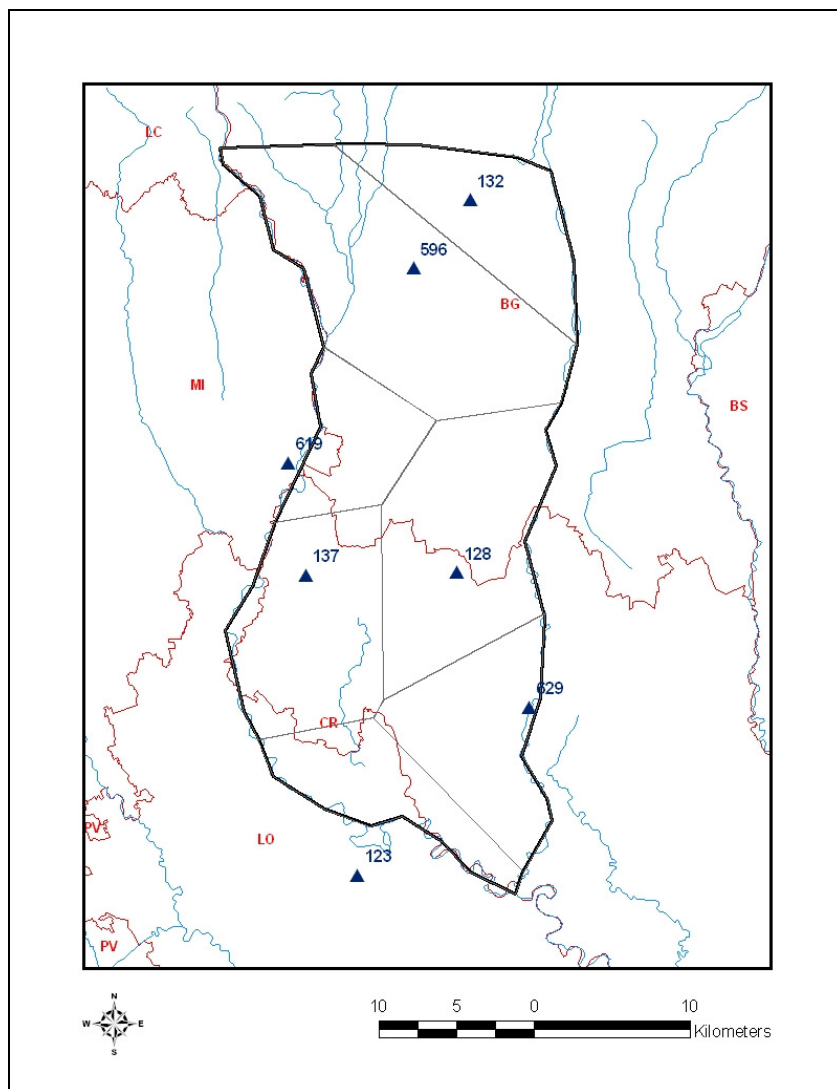


Figura D.6: Localizzazione delle stazioni meteorologiche e ricostruzione dei topoiets

La zona urbana

La ricostruzione del tessuto urbano all'interno dell'area del modello *a grande scala* è stata effettuata sulla base degli strati informativi contenuti all'interno della Carta CORINE Land Cover 2000 (CLC 2000). In base alla classificazione adottata all'interno del progetto CLC 2000, la zona urbana corrisponde alla Categoria 1, "Territori modellati artificialmente", a cui viene sottratta la superficie destinata a "Zone verdi artificiali non agricole", corrispondente alla Sottocategoria 1.4. La Figura D.7 riporta la distribuzione spaziale del tessuto urbano, la cui estensione complessiva è pari a 125 km². Tale valore rappresenta il 16% della superficie totale del dominio *a grande scala*. La superficie urbanizzata all'interno di ciascuna delle sottoregioni individuate dai topoiets viene riportata in *Tabella D.3*.

Tabella D.3: Estensione dell'area urbana all'interno di ciascun topoieta

	Area Urbana		Totale
	(km ²)	(%)	(km ²)
123	4.2	6.1	68.9
128	17.2	11.4	150.8
132	22.1	25.4	86.9
137	11.7	9.7	120.8
596	45.3	22.5	201.1
619	9.9	16.3	60.5
629	15.0	15.6	96.0
Totale	125.4	16.0	784.9

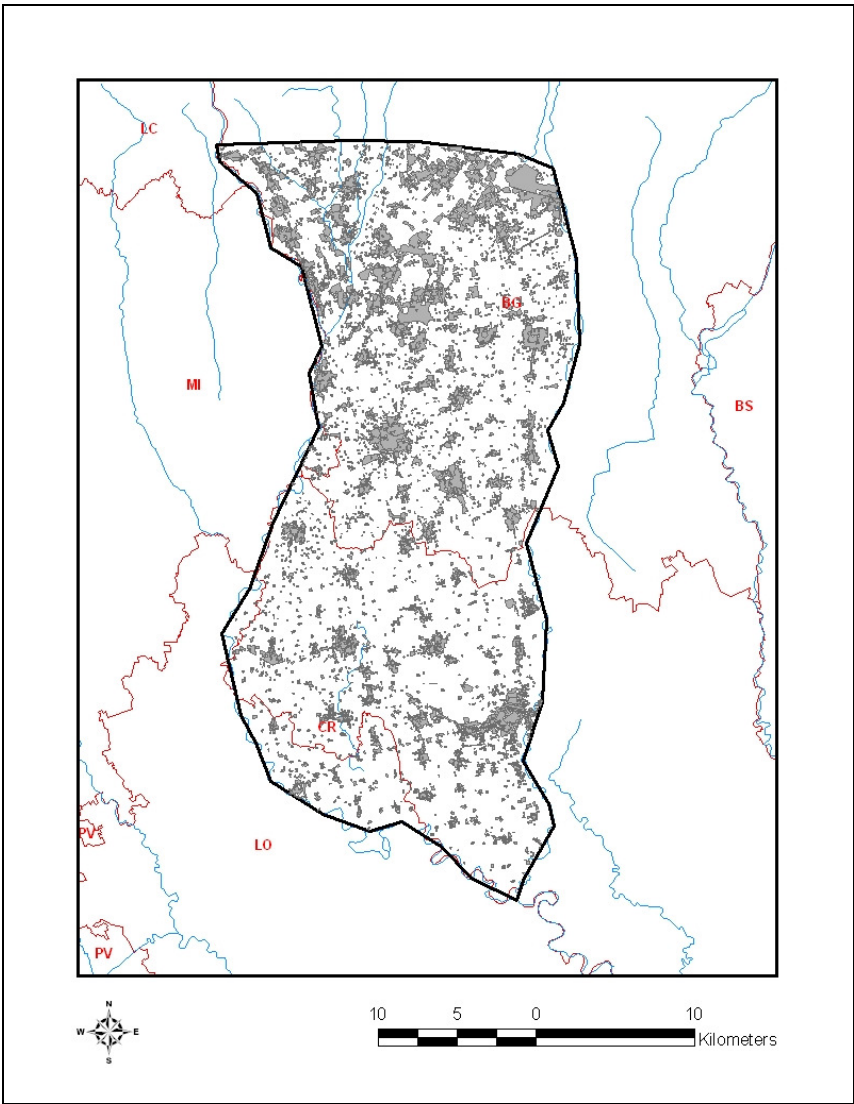


Figura D.7: Distribuzione spaziale del tessuto urbano all'interno dell'area *a grande scala*

I termini di prelievo

Uso civile potabile

Il quantitativo totale di risorsa idrica destinato all'approvvigionamento idropotabile è garantito da un insieme di pozzi di proprietà pubblica che attingono dal sistema acquifero presente all'interno del territorio in esame. La stima dell'entità dei prelievi effettuati può essere condotta a partire dal numero di abitanti residenti nell'area e dal valore di dotazione idrica, che rappresenta il consumo procapite giornaliero medio. Il numero di abitanti residenti, pari a 406708, è stato valutato in base alle informazioni acquisite dal 14° Censimento della Popolazione e delle abitazioni condotto dall'Istituto Nazionale di Statistica nel 2001. E' stata considerata una dotazione idrica pari a 250 l/(ab*die). Il quantitativo di acqua prelevata a scopo civile potabile è stato stimato pari a **1.18 m³/s**.

Uso civile non potabile e uso industriale

Un insieme di pozzi emungono dal sistema acquifero acqua destinata ad uso civile non potabile (igienico, zootecnico ed antincendio) e ad uso industriale. La stima dei prelievi è stata effettuata a partire dal Catasto delle Utenze Idriche, acquisito dal portale della regione Lombardia, all'interno del quale vengono riportate le portate di concessione, aggiornate all'ottobre 2004 e aggregate per comune e tipologia di utilizzo. Sono stati esclusi i pozzi antincendio in quanto possono essere caratterizzati da portate di concessione elevate, ma effettivamente utilizzate solo in situazioni di emergenza. I prelievi ad uso civile non potabile sono risultati pari a **1.29 m³/s**, mentre il quantitativo di acqua destinato ad uso industriale è stato stimato pari a circa **3.57 m³/s**.

I termini di ricarica

Perdite rete acquedottistica

Una quota parte del volume di acqua prelevata dal sistema acquifero per scopi idropotabile ritorna direttamente in falda come conseguenza di perdite dalla rete acquedottistica. Le perdite da acquedotto sono state stimate pari al 15%. Questo comporta, in termini assoluti, una ricarica dell'acquifero pari a **0.18 m³/s**.

Perdite rete fognaria

La rete fognaria raccoglie le acque di scarto a valle degli utilizzi civili potabili, civili non potabili e industriali. Si è ipotizzato che, per ognuna delle 3 destinazioni d'uso, i consumi effettivi siano pari al 10%; il restante quantitativo di acqua viene recapito in fognatura. Il sistema fognario raccoglie anche le acque piovane cadute sull'area urbanizzata; poiché il tessuto urbano, escluse le aree adibite a verde pubblico, è sostanzialmente costituito da superfici impermeabili, si è adottata l'ipotesi semplificativa che gli apporti meteorici sull'area urbana vengano completamente convogliati all'interno della rete fognaria.

I sistemi fognari generalmente presentano difetti che comportano perdite di un certo quantitativo di acqua, che, infiltrandosi nel terreno, costituisce un termine di ricarica dell'acquifero. Supponendo un valore di perdita pari al 5%, l'ammontare delle perdite risulta pari a **0.45 m³/s**.

I termini del bilancio idrologico effettuato sull'area coperta da tessuto urbano sono riportati in maniera schematica in *Figura D.8*.

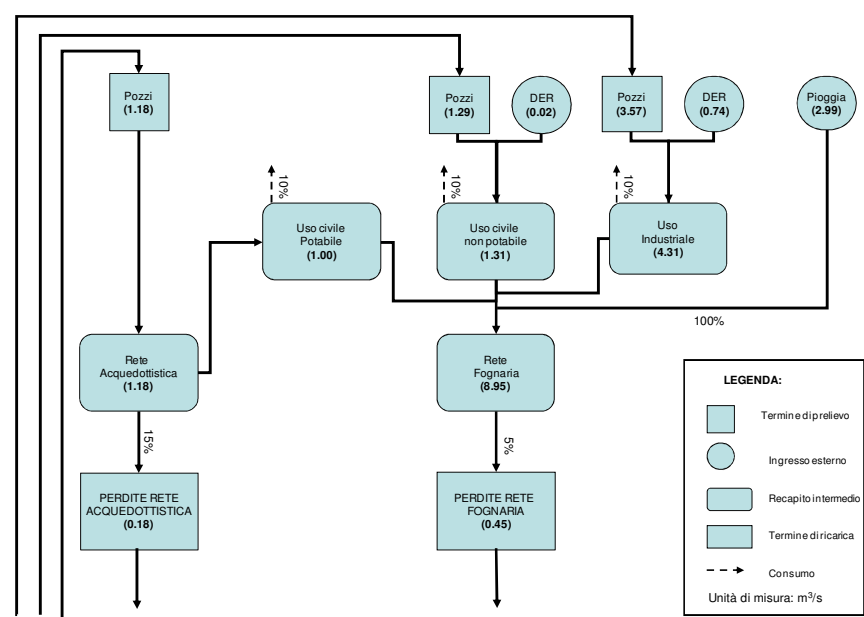


Figura D.8: Schema dei termini del bilancio idrologico applicato all'area urbana

La zona non urbana

La zona non urbana costituisce una percentuale elevata del dominio in esame presentando un'estensione totale di a circa 660 km², pari all'84% dell'estensione totale del *modello a grande scala*. La zona non urbana è sostanzialmente costituita da seminativi, colture permanenti, prati stabili e zone agricole eterogenee (classificazione in base a CLC 2000); aree naturali sono presenti lungo i parchi fluviali dell'Adda e del Serio. La *Tabella D.4* riporta la superficie coperta dall'area non urbana all'interno di ogni topoieta.

Tabella D.4: Estensione dell'area non urbana all'interno di ciascun topoieta

	Area Non Urbana		Totale
	(km ²)	(%)	(km ²)
123	64.7	93.9	68.9
128	133.6	88.6	150.8
132	64.8	74.6	86.9
137	109.0	90.3	120.8
596	155.8	77.5	201.1
619	50.6	83.7	60.5
629	81.0	84.4	96.0
Totale	659.5	84.0	784.9

I termini di prelievo

Uso irriguo

Le portate di concessione associate ai pozzi per il prelievo di acqua destinata ad uso irriguo sono state reperite all'interno del Catasto delle Utenze Idriche. È stata adottata l'ipotesi che tali pozzi siano in funzione esclusivamente nel corso del periodo irriguo, compreso fra maggio a settembre. La portata stimata complessivamente emunta dai pozzi è risultata pari a **4.71 m³/s**.

Fontanili

I quantitativi di acqua uscenti in corrispondenza delle teste fontanilizie presenti sul territorio costituiscono, all'interno del bilancio idrologico, termini di prelievo dal sistema acquifero. Le informazioni disponibili relative alle portate in uscita dai fontanili sono risultate limitate ad una campagna di misura condotta dal Consorzio della Media Pianura Bergamasca nel biennio 1989-1990 nel corso della quale sono state effettuate misurazioni, ad intervalli all'incirca trimestrali, delle portate in corrispondenza di un insieme di 35 sezioni di canali alimentati da teste fontanilizie. Il valore medio annuo globale misurato è risultato pari a **14.62 m³/s**.

I termini di ricarica

Infiltrazione di acque meteoriche

Il contributo di ricarica naturale è rilevante sulla porzione permeabile del modello e dipende essenzialmente dalla natura dei suoli. I parametri relativi alla capacità di campo, al punto di appassimento e alla profondità del suolo sono stati stimati a partire dalla Carta Pedologica dei Suoli acquisita dal sito della Regione Lombardia. La *Tabella D.5* riporta i valori medi dei parametri sopra menzionati per ciascun topoieta.

Tabella D.5: Valori medi dei parametri capacità di campo, punto di appassimento e profondità del suolo all'intero di ciascun topoieta

	123	128	132	137	596	619	629	Totale
Capacità di Campo (l)	0.28	0.34	0.38	0.29	0.34	0.31	0.35	0.33
Punto di Appassimento (l)	0.14	0.18	0.19	0.14	0.18	0.15	0.20	0.17
Profondità del suolo (m)	0.45	0.40	0.38	0.45	0.35	0.42	0.33	0.39

Il calcolo dei termini legati all'evapotraspirazione sull'area non urbanizzata è stato effettuato utilizzando il metodo di Thornthwaite, che si basa su una relazione empirica fra l'evapotraspirazione potenziale e i valori medi mensili di temperatura dell'aria e di precipitazione. I valori medi annui di precipitazione, evapotraspirazione potenziale (EPT) e reale e di ricarica per infiltrazione di acque piovane sono riportati, suddivisi per sub-domini, in *Tabella D.4*. Il rapporto fra ricarica e pioggia definisce il coefficiente di infiltrazione. Il coefficiente di infiltrazione medio dell'area in esame è risultato essere pari a 23.2 %, come riportato in *Tabella D.6*.

Tabella D6: Valori di pioggia, ETP, ETR e ricarica, espressi sia in mm/anno che in m³/s

	Pioggia	ETP	ETR	Ricarica	Pioggia	ETP	ETR	Ricarica	% Infiltrazione
	mm/anno				m ³ /s				
123	659.1	905.7	479.6	176.3	1.4	1.9	1.0	0.4	26.7%
128	685.6	878.6	491.2	156.1	2.9	3.7	2.1	0.7	22.8%
132	866.0	897.4	592.4	205.4	1.8	1.8	1.2	0.4	23.7%
137	744.0	886.6	530.2	174.8	2.6	3.1	1.8	0.6	23.5%
596	867.7	854.1	527.3	195.2	4.3	4.2	2.6	1.0	22.5%
619	695.6	876.3	481.5	160.1	1.1	1.4	0.8	0.3	23.0%
629	640.4	985.3	445.0	139.2	1.6	2.5	1.1	0.4	21.7%
Totale	748.6	891.6	508.6	173.5	15.7	18.6	10.6	3.6	23.2%

Infiltrazione di acque irrigue e percolazione dai canali

Il termine di ricarica dell'acquifero associato alle acque utilizzate in ambito irriguo costituisce un termine significativo all'interno di un bilancio idrologico applicato ad una regione a forte vocazione agricola come quella in esame. La ricarica avviene secondo due distinti meccanismi (a) infiltrazione di una quota parte dell'acqua effettivamente impiegata nelle pratiche irrigue, proveniente sia da pozzi di emungimento che da derivazioni superficiali, e (b) percolazione dal fondo dei canali adibiti alla capillare distribuzione, all'interno dei comizi irrigui, dell'acqua derivata dai principali corpi idrici.

All'interno del territorio oggetto di studio l'acqua destinata ad uso irriguo proviene, oltre che da un insieme di pozzi di emungimento, da 6 canali principali che derivano in sponda sinistra idrografica del fiume Adda. I canali sono: Roggia Cremasca, Roggia Pandina, Canale Pasinetti, Roggia Rivoltana, Canale Vacchelli e Roggia Vailata. Sono state acquisite dal Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca le serie storiche delle portate medie giornaliere in corrispondenza del periodo 2003-2006. Le *Figure D.8 a-b* mostrano l'evoluzione temporale delle portate medie giornaliere derivate in corrispondenza di ciascun canale (a) e complessivamente (b).

E' stato stimato un valore percentuale di percolazione dai canali pari al 30%. Si è considerato, inoltre, che una quota parte dell'acqua derivata, all'incirca il 5%, non venga sfruttata per scopi irrigui ma, una volta attraversato il reticolo idrografico, venga nuovamente recapitata nei corsi d'acqua principali. La portata di ricarica media annua dovuta a percolazione dai canali è stata stimata in **11.20 m³/s**. Il termine di ricarica associato all'infiltrazione di acque irrigue è risultato pari a **6.72 m³/s**.

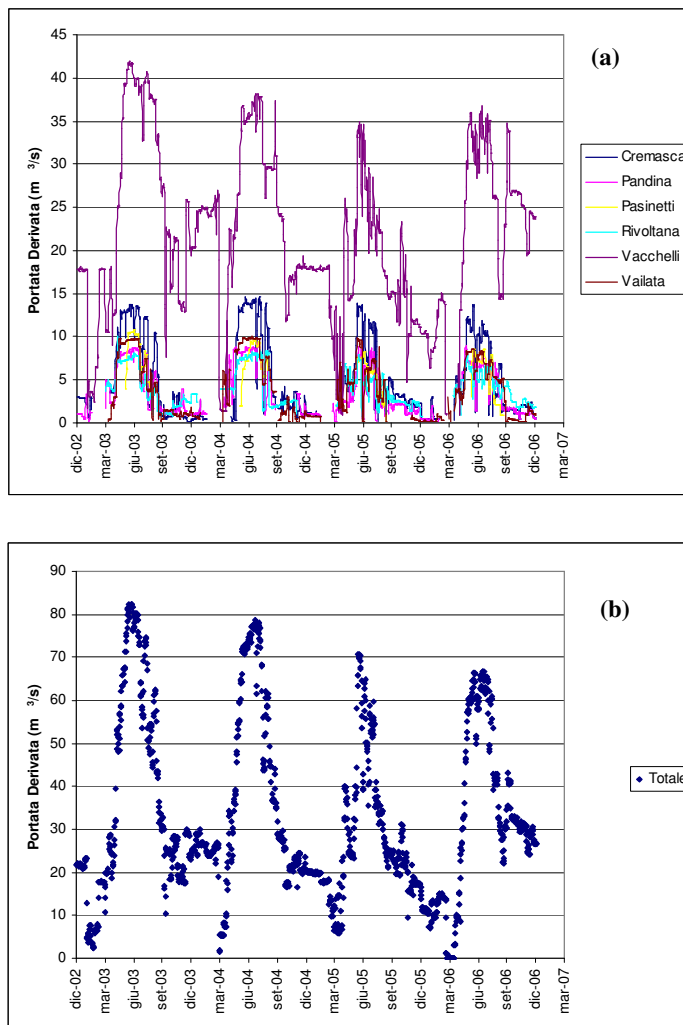


Figura D.8: Evoluzione temporale delle portate medie giornaliere derivate da ciascun canale (a) e in totale (b)

Flusso in ingresso dal limite settentrionale

Il flusso in ingresso dal limite settentrionale è stato fornito sulla base dei risultati ottenuti da un modello sviluppato per la regione del bacino del fiume Serio ubicata a Nord dell'area di interesse nel presente studio [Rametta, 2008]. Il flusso medio annuo in corrispondenza del limite settentrionale del modello *a grande scala* e adottato nel presente studio è risultato pari a **9.65** m³/s.

La *Figura D.9* presenta, schematicamente, i flussi di ricarica e di prelievo valutati rispetto alla superficie di territorio non urbanizzato.

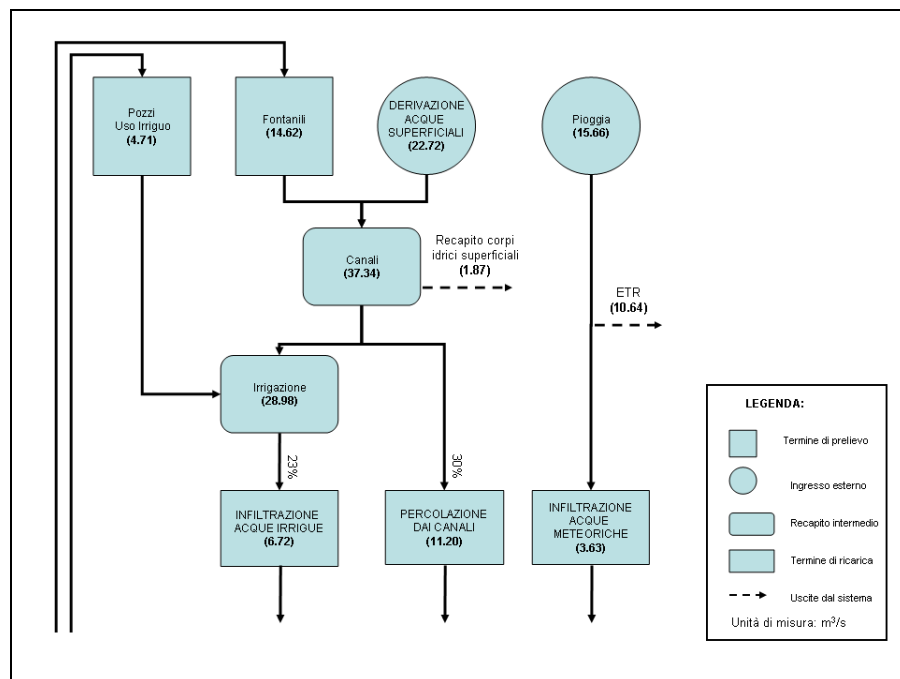


Figura D.9: Schema dei termini di bilancio idrologico applicato all'area non urbanizzata

Risultati riassuntivi

I termini del bilancio idrologico sono riportati in Tabella D.7.

Tabella D.7: Termini del bilancio idrologico

Termini di bilancio		RICARICA	PRELIEVI
		m³/s	m³/s
ZONA URBANA	Pozzi uso civile potabile		1.18
	Pozzi uso civile non potabile		1.29
	Pozzi uso industriale		3.57
	Perdite rete acquedottistica	0.18	
	Perdite rete fognaria	0.45	
ZONA NON URBANA	Pozzi uso irriguo		4.71
	Fontanili		14.62
	Infiltrazione di acque meteoriche	3.63	
	Infiltrazione di acque irrigue	6.72	
	Percolazione dai canali	11.20	
LIMITI	Flusso in ingresso dal limite settentrionale	9.65	
	Flusso in uscita dai restanti limiti (Adda, Serio)		6.46