



*Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali
Università di Palermo*

*Associazione Idrotecnica Italiana
Sezione Liguria, Piemonte e Valle d'Aosta
Genova, 21 novembre 2003*

Giornata di studio:

**ACQUE DI PRIMA PIOGGIA:
esperienze sul territorio e normativa**

*Esperienze e studi sulla qualità delle acque di pioggia
P. Calabrò, G. Freni, G. La Loggia, G. Viviani*



Attività di ricerca sulla qualità delle acque di pioggia del DIIAA:

a) Ricerche di campo:

- bacino sperimentale di Parco d'Orlèans (PA) per la misura delle caratteristiche di quantità e qualità delle acque di pioggia;
- bacino sperimentale di Reggio C. per la misura dell'accumulo di solidi su superfici urbane impermeabili;
- bacino fiume Oreto interessato da scarichi concentrati urbani e diffusi

a) Studi modellistici:

- simulazione di idrogrammi e pollutogrammi delle acque di pioggia in fognatura;
- valutazione degli effetti prodotti dalle vasche di pioggia per la riduzione dell'inquinamento prodotto dalle acque di pioggia;
- messa a punto di modelli integrati di drenaggio urbano;
- valutazione dell'inquinamento diffuso in bacini naturali a elevata presenza di carichi concentrati urbani.



***Il bacino sperimentale di Parco d'Orlèans
(La Loggia & Viviani, 1990)***

— limite bacino
— rete fognaria

$S_{tot} = 20,66$ ha
 $S_{imp} = 12,55$ ha
IMP = 68%
sistema misto





Misura di pioggia:

- inizio registrazione nel 1987, con continuità dal 1993;
- numero eventi registrati circa 1.100;
- altezza media annua di pioggia 660 mm/anno;
- intensità massima di pioggia per durata di 1 ora 43,2 mm/h;

Misure di portata:

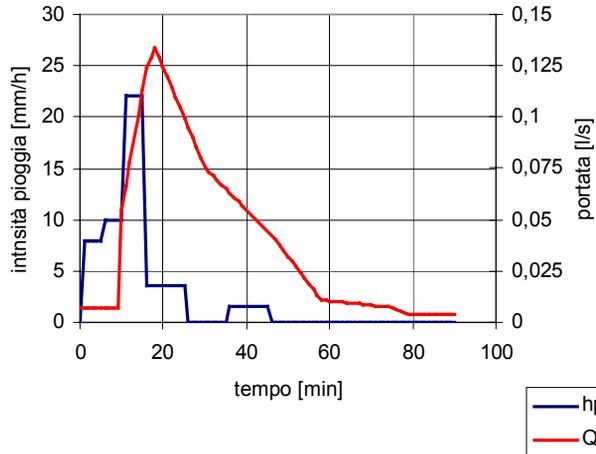
- venturimetro per canali (tarato in lab.) e idrometro ad ultrasuoni;
- sezione terminale collettore semiovoidale $0,70 \times 1,05 \text{ m}^2$, $p=2,67\%$;
- registrazioni con scansione temporale di 30 s;

Misure di qualità:

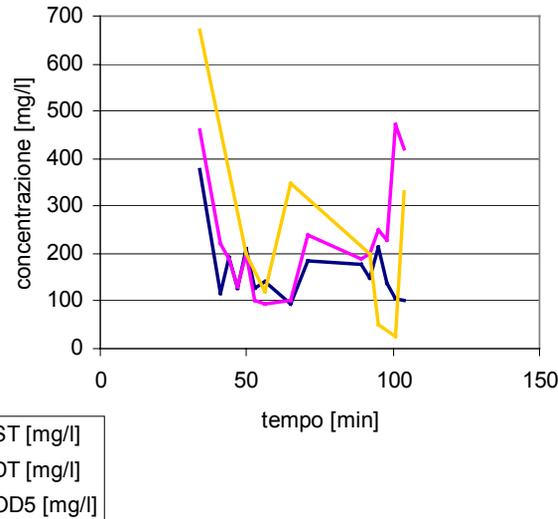
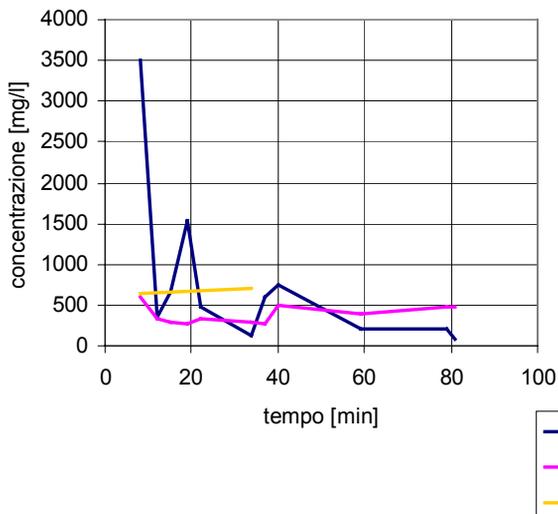
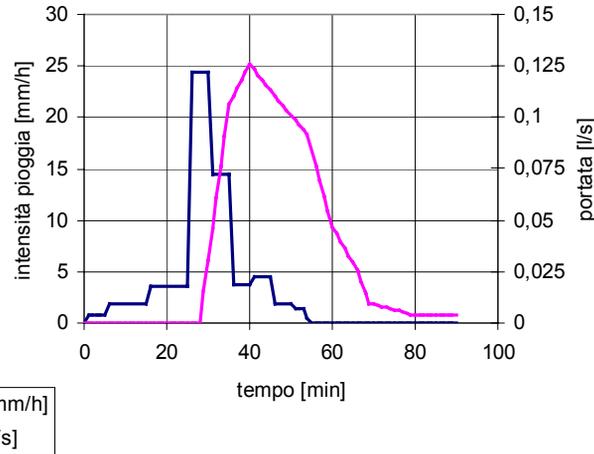
- campionatore automatico a 24 bottiglie modello Sigma 6201, per il prelievo di campioni istantanei a intervalli di 3 min;
- misura della conducibilità con conduttivimetro Endress-Hauser modello Smartec C a induzione magnetica.



Evento del 20/12/91



Evento del 25/12/91



Osservazioni:

- volumi e portate comparabili
- maggiore contenuto inquinante nel primo evento
- maggiore tempo secco antecedente per il primo evento (13 gg) rispetto al secondo (2 gg): maggiore build-up
- effetto di first flush
- colmo del pollutogramma anticipato rispetto a quello dell'idrogramma



***I bacini sperimentali di Reggio Calabria
(Calabrò & La Loggia, 2000)***

Sito A:

- I.T.I. "A. Panella" (cortile interno)
- $S=40 \text{ m}^2$
- pavimentazione in cemento
- pulizia estesa all'intera superficie



Sito B:

- contrada "Pellaro" (periferia Reggio C.)
- $S=120 \text{ m}^2$
- pavimentazione in asfalto + cunette in mattonelle di cemento
- intenso traffico veicolare
- raccolta materiale depositato fino a 1,5 ciglio marciapiede (95% totale)



Periodi di misura: 9-17/3/99 (Sito A); 15-22/5/99 (Siti A e B); 25/5-22/6/99 (Siti A e B)

Divisione dei bacini in aree uguali, in cui si è proceduto alla raccolta del materiale depositato a intervalli regolari.

Prelievo del materiale con aspirapolvere ad azionamento manuale

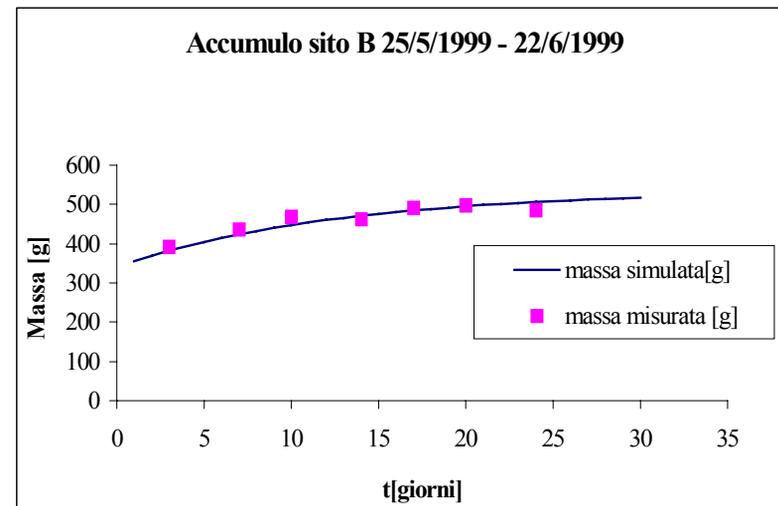
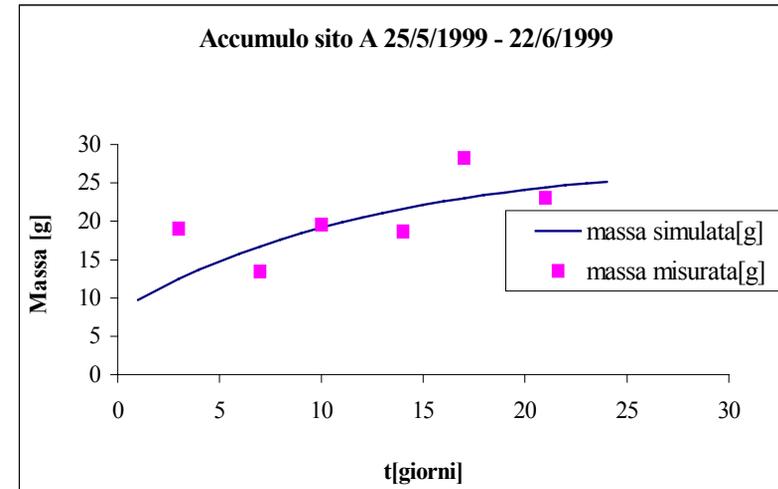
Calibrazione espressione di **Alley e Smith:**

$$M_a = \left(\frac{\text{Accu}}{\text{Disp}} \right) * A * \text{Peim} * \left(1 - e^{-\left(\frac{\text{Disp} * t}{24} \right)} \right) + M_r * e^{-\left(\frac{\text{Disp} * t}{24} \right)}$$

Peim=1 Disp= 0,08 Mr = 1^a misura

ACCU= 4,5 kg/haxg (sito A)
28,5 kg/haxg (sito B)

Valori di letteratura: 10 – 25 kg/haxg (zone residenziali altamente abitate)

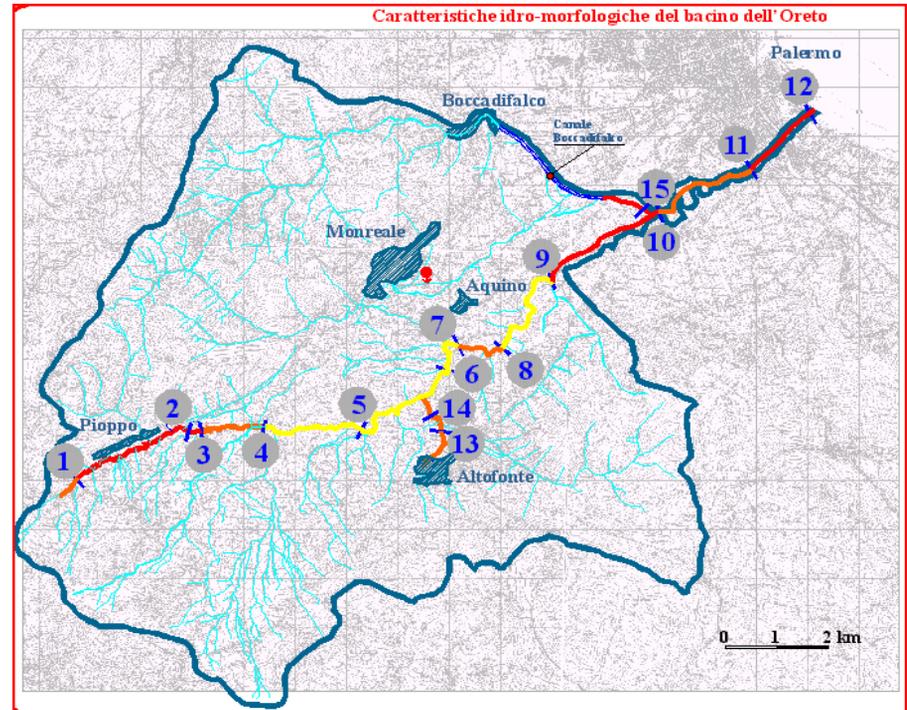




***Indagine su un bacino fluviale a elevata
presenza di scarichi urbani: f. Oreto (PA)
(Viviani et al., 2002)***

Caratteristiche f. Oreto:

- **Superficie bacino imbrifero:** 110 km²
- **Lunghezza asta principale:** 21,5 km
- **Vegetazione:** macchia mediterranea, pascolo e aree boscate
- **Insedimenti urbani:** Pioppo, Altofonte, Monreale (ID), Palermo (P. Maglio-Blandino, V. Ciambra-Malpasso, Boccadifalco)
- **Insedimenti produttivi**
- **Regime torrentizio** (altezza media annua di pioggai 1041 mm/anno; deflusso medio annuo 461 mm/anno)
- **Interesse del caso di studio:** ambientale (proposta di Parco urbano), uso dell'acqua (irriguo e potabile)
- **Elevato degrado del fiume:** necessità di recupero con maggiore controllo dell'uso del territorio e della qualità degli scarichi concentrati e diffusi





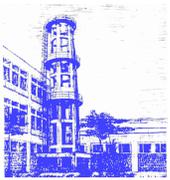
Fasi di sviluppo dell'indagine

a) caratterizzazione di quantità e qualità delle acque del fiume:

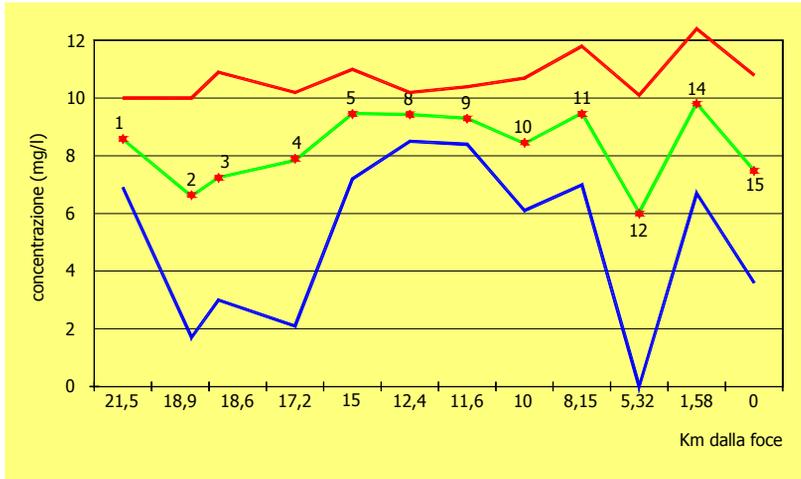
- misure di **quantità** (1 stazione idrometrica + misure in corrispondenza degli scarichi concentrati)
- misure di **qualità** (campionamento automatico e analisi di laboratorio) in 15 sezioni significative del fiume (intermedie e foce)
- **prelievi** a cadenza bimestrale negli anni 1998 e 1999
- **parametri misurati:** BOD, COD, OD, Azoto, Fosforo, Tensioattivi, pH, Temperatura, SST, Conducibilità, IBE

b) valutazione delle fonti inquinanti concentrate e diffuse che determinano lo stato di qualità del corpo idrico:

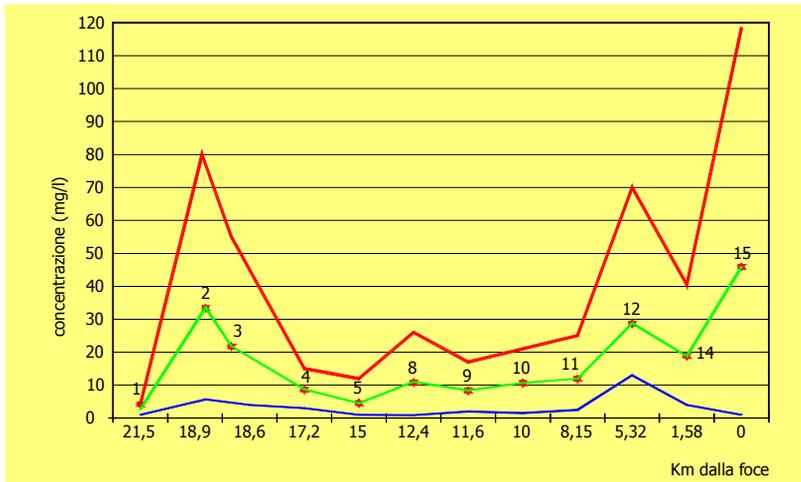
- con metodo **diretto** (concentrazioni x portate)
- con metodo **indiretto** (censimento delle fonti e stima dei carichi in funzione della potenzialità di queste)



Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali Università di Palermo



OD



BOD



Temperatura dell'acqua

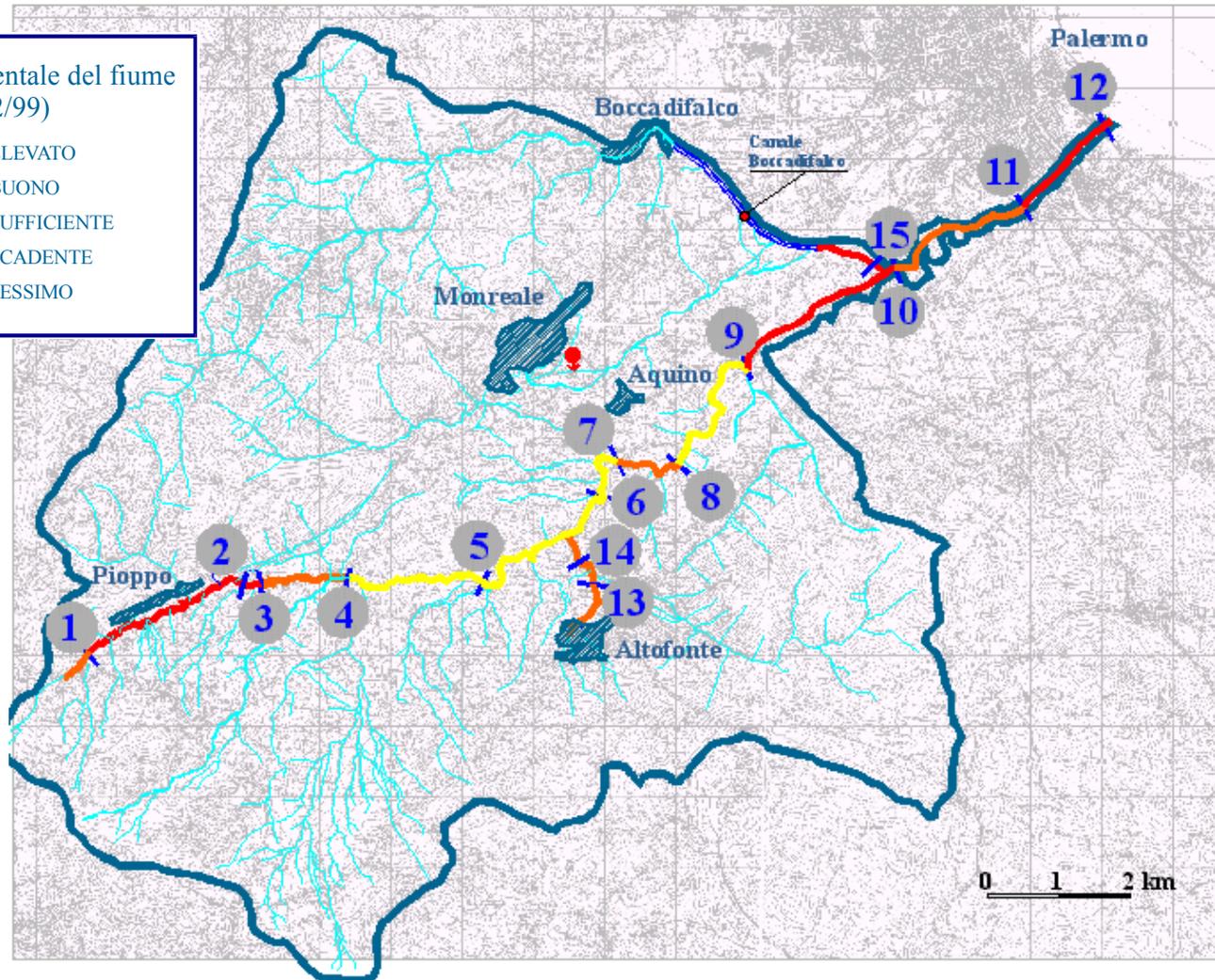


Classificazione asta fluviale ai sensi del D.lgs. 152/99

Caratteristiche idro-morfologiche del bacino dell'Oreto

Classi di qualità ambientale del fiume
(D.lgs. 152/99)

-  Classe 1 - ELEVATO
-  Classe 2 - BUONO
-  Classe 3 - SUFFICIENTE
-  Classe 4 - SCADENTE
-  Classe 5 - PESSIMO





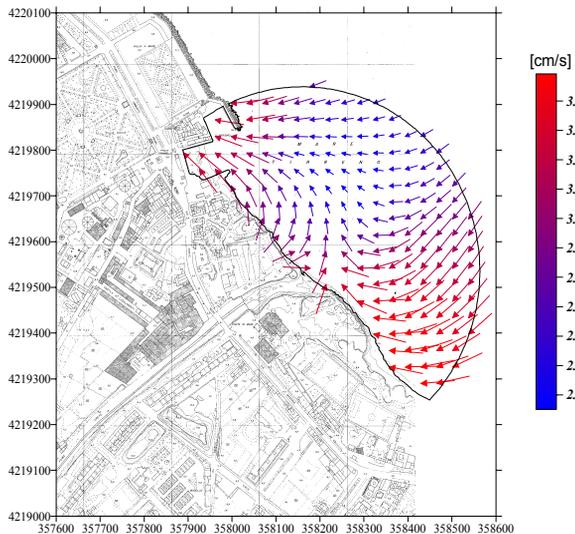
Analisi dell'interferenza tra foce del fiume e tratto di mare

indagine a mare:

- misure batimetriche e correntometriche.
- misure di qualità (salinità, conducibilità, temperatura)
- misure di quantità (portate, livelli)

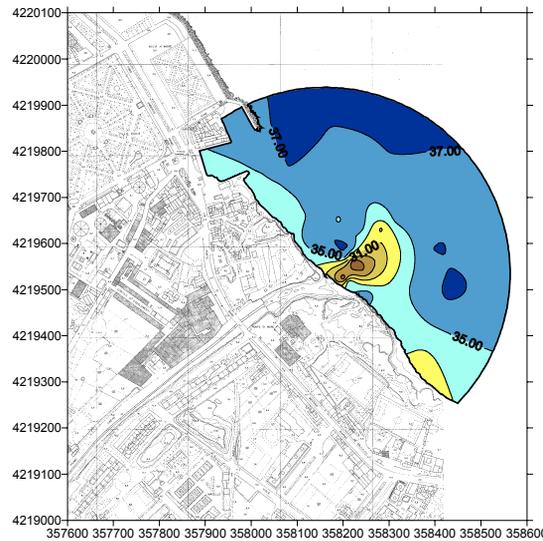
CORRENTOMETRIA RILEVATA AD UNA PROFONDITA' DI 1 m s.l.m.

Rilievo del 12 giugno 2001

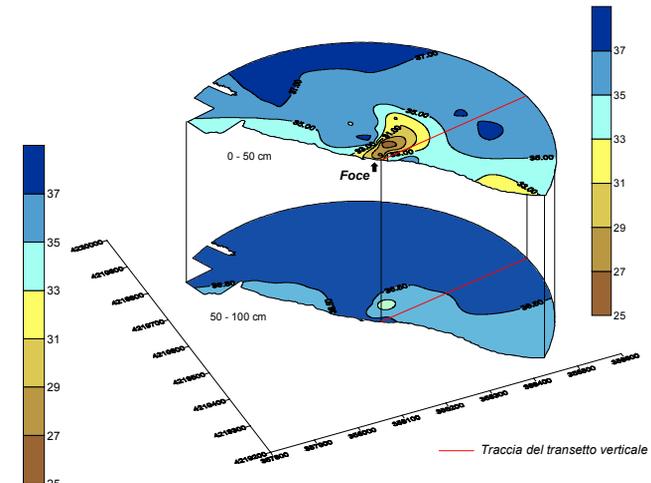


SALINITA' NELLO STRATO COMPRESO TRA 0 E 50 cm

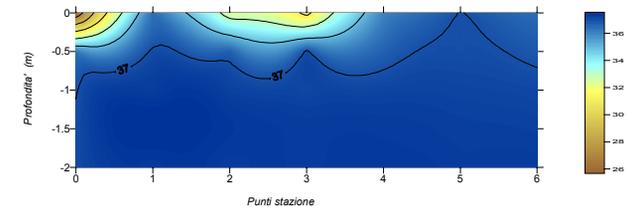
Rilievo del 12 giugno 2001



ANDAMENTO DELLA SALINITA' IN STRATI ORIZZONTALI SOVRAPPOSTI



Andamento della salinità lungo il transetto verticale





Elaborazione delle misure eseguite:

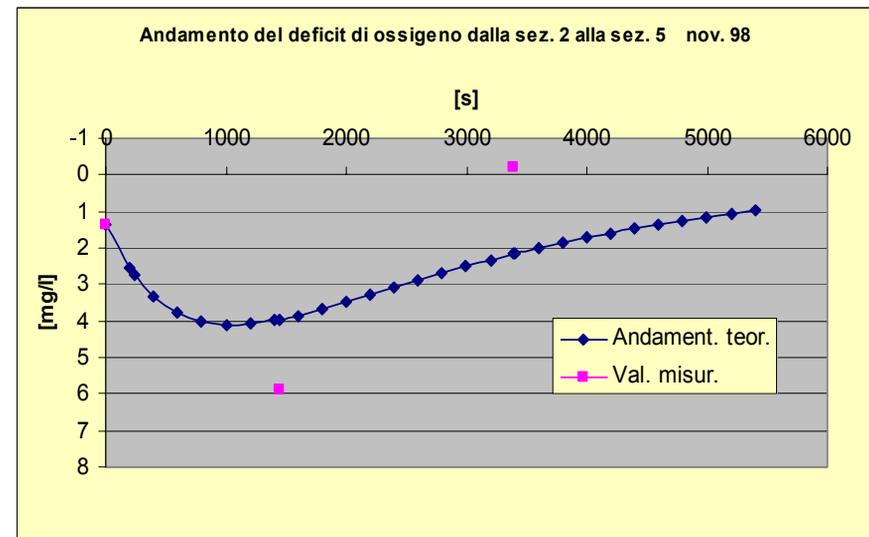
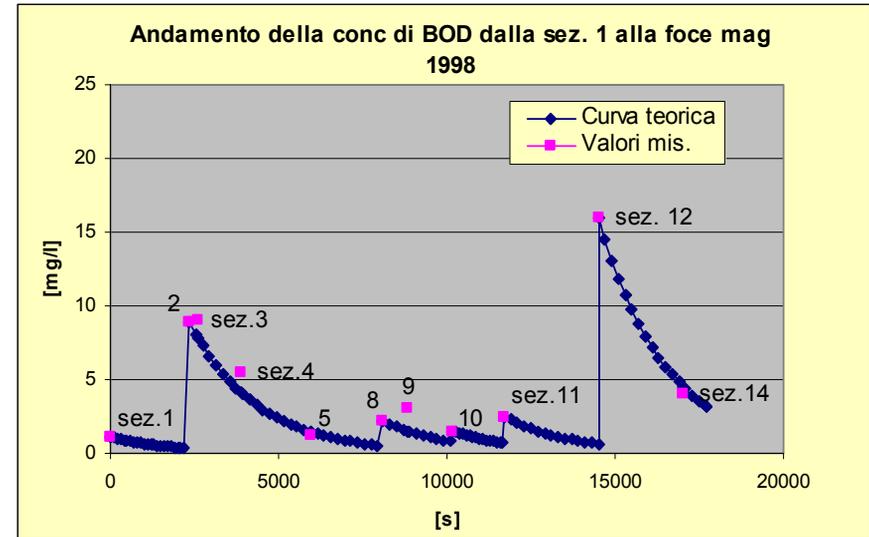
a) Valutazione del coefficiente di deossigenazione K_1 :

decadimento del BOD secondo il modello di Streeter e Phelps:

$$B = B_0 e^{-K_1 t}$$

b) Valutazione del coefficiente di riossigenazione K_2 :

$$D(t) = \frac{K_1}{K_2 - K_1} B_0 (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t}$$





Confronto fra i carichi concentrati e diffusi:

Stima dei carichi con metodo diretto:

a) concentrazioni: campagna di misure di campo

b) deflussi:

- ricostruzione portate nelle sezioni di misura con modello afflussi-deflussi, calibrato con le misure relative alla stazione idrometrica di Ponte Parco;
- misure di portata eseguite alla foce (primavera 1999 - estate 2001).

Stima dei carichi col metodo indiretto:

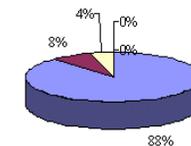
a) Carichi concentrati:

- carichi urbani: $ab.res. \times \text{apporti pro-capite} \times (1 - \eta_{dep})$
- carichi industriali: $ab.eq. \times \text{apporti pro-capite} \times (1 - \eta_{dep})$

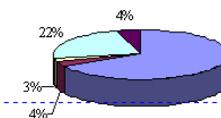
b) Carichi diffusi:

- carichi agricoli: uso dei suoli; apporti specifici x superfici
- carichi zootecnici: apporti unitari x n. capi (4° Cens. agricoltura, 1991)

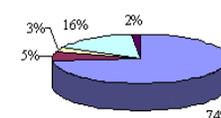
BOD - Sez. 12 (Foce)



Azoto - Sez.12 (Foce)



Fosforo - Sez. 12 (Foce)



Legenda

- Carichi urbani
- Carichi industriali
- Carichi zootecnici
- Carichi agricoli (suoli coltivati)
- Carichi agricoli (suoli non coltivati)



Confronto fra i metodi diretto e indiretto:

- **sottostima** dei carichi talvolta riscontrata col metodo **indiretto** attribuibile alla presenza di scarichi di origine civile e/o produttiva non censiti o fuori dalla norma;
- utilità del duplice approccio (diretto + indiretto) per l'esame dei bacini:
 - metodo indiretto: consente di risalire alle potenziali cause di inquinamento derivanti dall'uso del bacino;
 - metodo diretto: fornisce una verifica di campo degli effettivi carichi sversati nel corpo idrico.

PARAMETRI	U.M.	INVERNO		PRIMAVERA		ESTATE		AUTUNNO		TOTALE ANNUO		
		Diretto	Indiretto	Diretto	Indiretto	Diretto	Indiretto	Diretto	Indiretto	Diretto	Indiretto	U.M.
Metodo di stima												
Carico di BOD	t/mese	23.58	42.75	72.96	41.00	42.46	41.00	66.94	45.10	617.81	509.52	t/anno
Carico di N	t/mese	44.42	20.80	32.09	14.39	6.53	13.33	31.27	21.56	342.92	210.24	t/anno
Carico di P	t/mese	0.63	2.48	0.80	1.92	0.56	1.82	1.64	2.54	10.89	26.27	t/anno



MODELLI MATEMATICI DI SIMULAZIONE DELLA QUANTITÀ E QUALITÀ DELLE ACQUE DI PIOGGIA: COSMOSS (Calabrò, 2001)

Modulo di quantità:

- trasformazione in pioggia netta (piccoli invasi + infiltrazione con coefficiente di afflusso)
- trasformazione afflussi-deflussi (modello del serbatoio lineare; bacino superficiale e rete vengono considerati nel loro insieme)

Modulo di qualità:

- accumulo:

$$M_a = \left(\frac{\text{Accu}}{\text{Disp}} \right) * A * \text{Peim} * \left(1 - e^{-\left(\frac{\text{Disp} * t}{24} \right)} \right) + M_r * e^{-\left(\frac{\text{Disp} * t}{24} \right)} \quad (\text{Alley e Smith})$$

- dilavamento valutato mediante l'espressione:

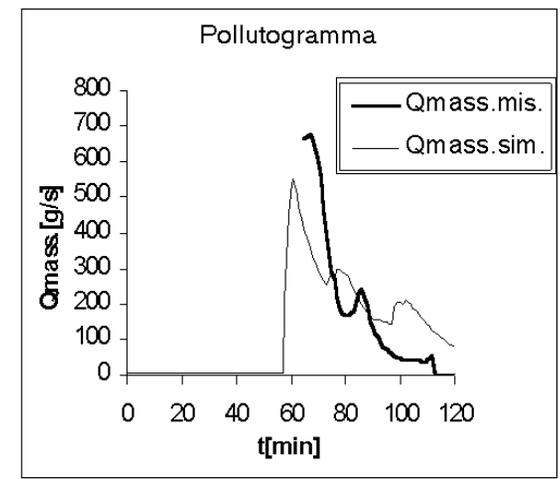
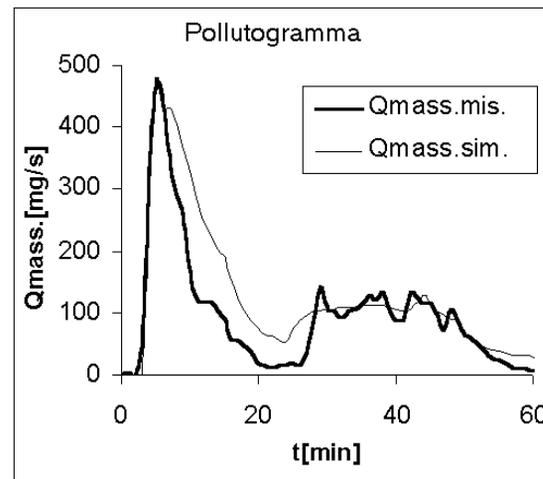
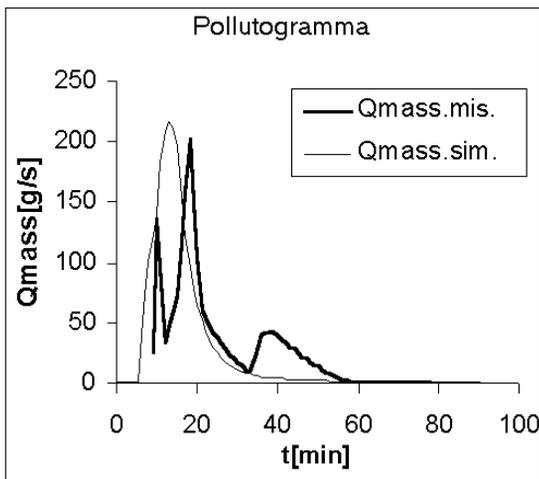
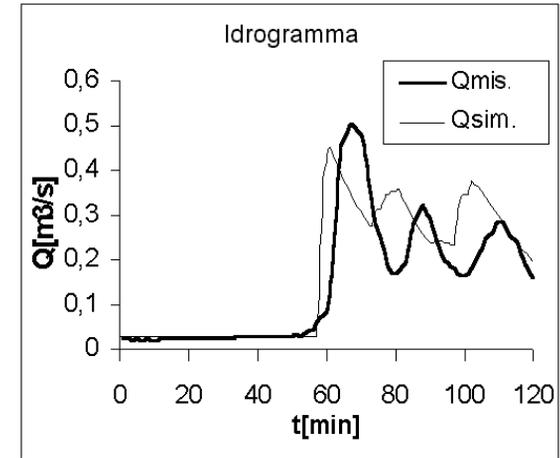
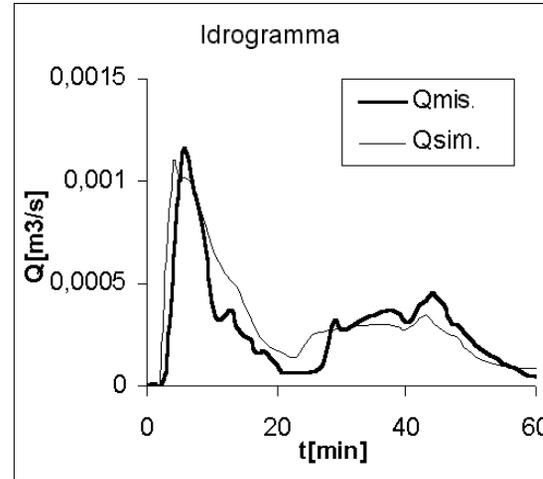
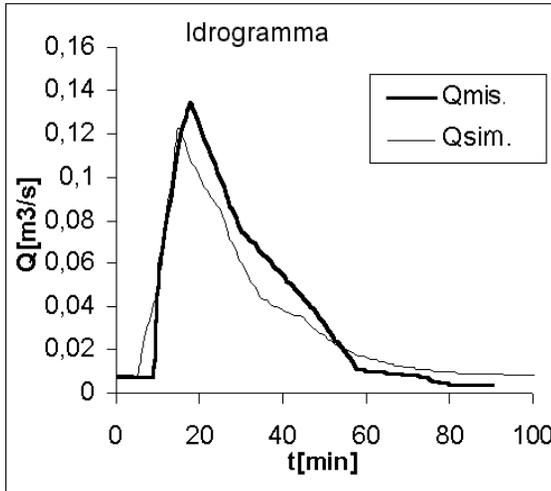
$$Fa(t) = e^{-(Wr * Vd(t))}$$

Calibrazione modello:

- misure relative ai bacini di Parco d'Orléans (PA), Fossolo (BO) e Milijacovac (Belgrado);
- calibrazione tasso di accumulo (**Accu**) e coefficiente di dilavamento (**Wr**)



Esempi di simulazione:



Parco d'Orlèans, 20/12/91

Milijakovac, evento n. 31

Fossolo, 13/11/95



Analisi delle vasche di pioggia

Obiettivi delle ricerche eseguite:

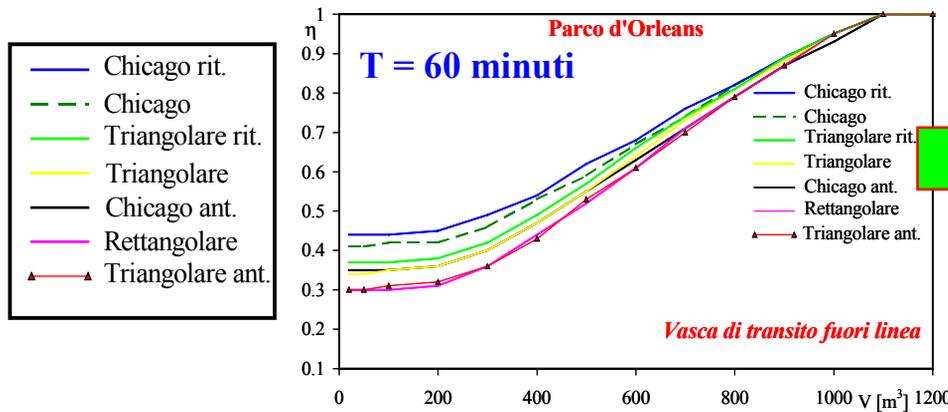
- messa a punto di criteri di dimensionamento legati al rendimento di rimozione degli inquinanti veicolati dalle acque di pioggia;
- analisi e confronto delle differenti tipologie di vasche;
- analisi per singolo evento (influenza del tipo di ietogramma di progetto);
- analisi con simulazione in continuo (effetto di eventi consecutivi).



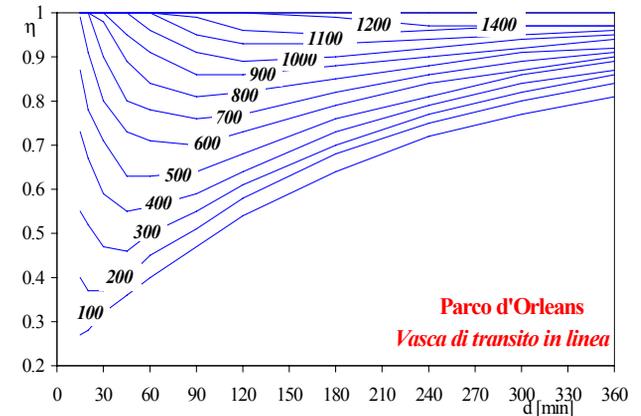
Caratteristiche del modello:

- Ietogrammi di forma varia:
- Idrogrammi e pollutogrammi con modello COSMOSS (calibrato su P.d'Orlèans e Fossolo)
- Calcolo rendimento vasche: $\eta = \frac{M_i - M_s}{M_i}$ M_i = massa totale di SST dell'evento
 M_s = massa scaricata nel corpo idrico

a) rendimenti in funzione del volume della vasca, per fissata forma dello ietogramma



b) rendimenti in funzione della durata della pioggia, per fissato volume della vasca (ietogramma triangolare anticipato)

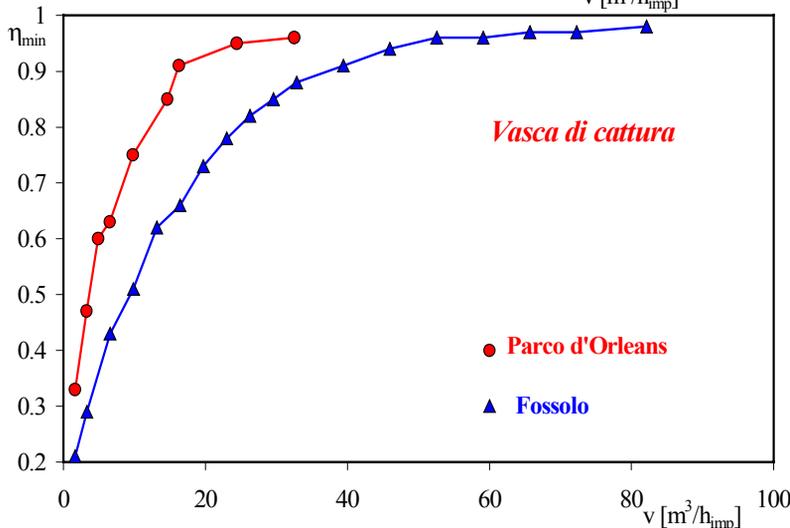
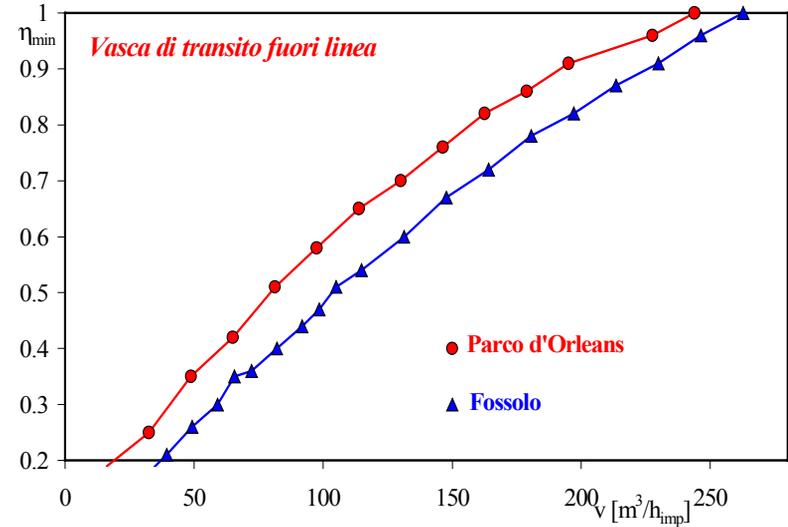
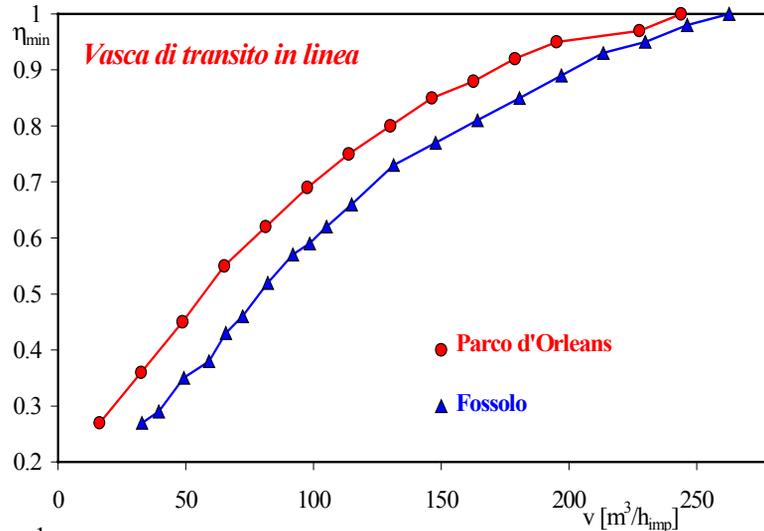


Osservazioni:

- per ogni volume della vasca è possibile individuare un valore “critico” della durata per la quale risulta minimo il rendimento ottenuto (η_{\min})
- per fissato rendimento, è quindi possibile ricavare il volume minimo della vasca, e la corrispondente durata dell'evento critico



Andamenti dei rendimento minimo in funzione del volume specifico vasca



Osservazioni:

Vasche di transito: η_{\min} cresce con andamento analogo per i due bacini esaminati; rendimenti comparabili per schemi in linea a fuori linea

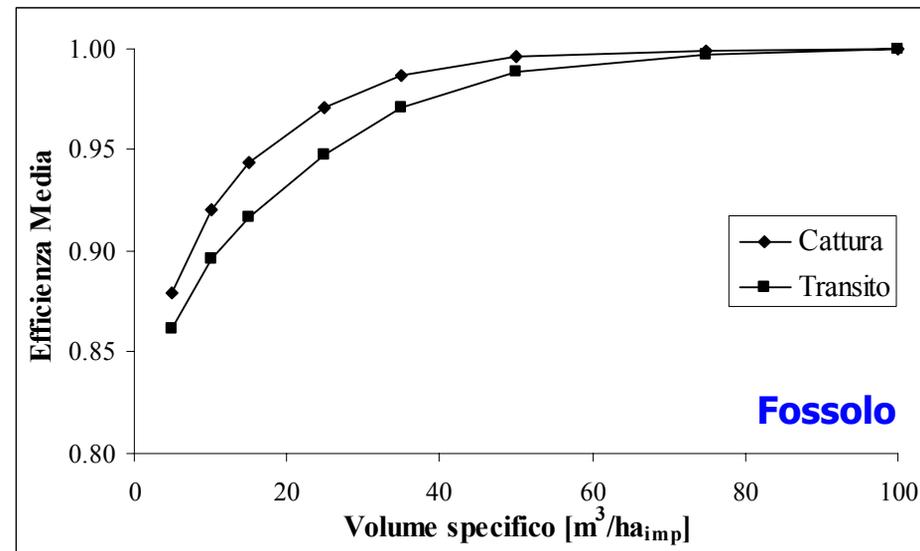
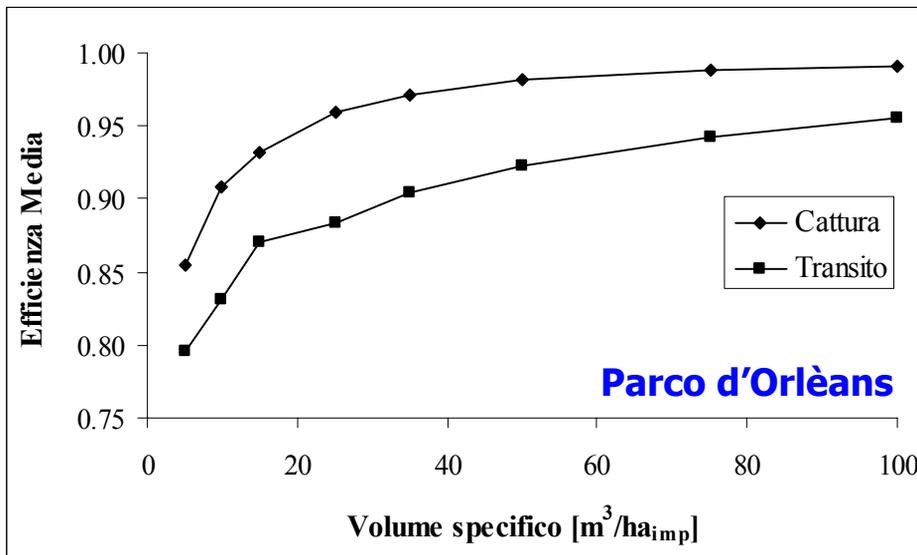
Vasche di cattura: rendimenti nettamente più elevati rispetto alle vasche di transito; conseguenza dell'effetto di "first flush"



ANALISI CON SIMULAZIONE IN CONTINUO (Calabrò, 2002; Calabrò & Viviani, 2003)

- simulazione con COSMOSS usando 5 anni di dati di pioggia registrati a Parco d'Orlèans e 1 anno a Fossolo;
- applicazione per le vasche di cattura

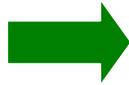
Analisi dei risultati: efficienza media vs. volume specifico:



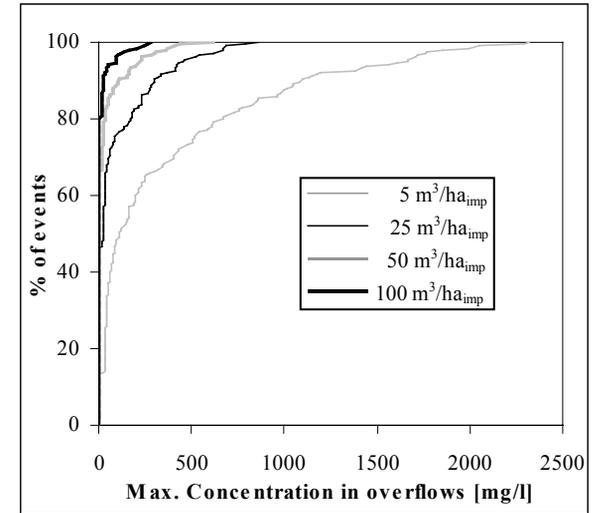
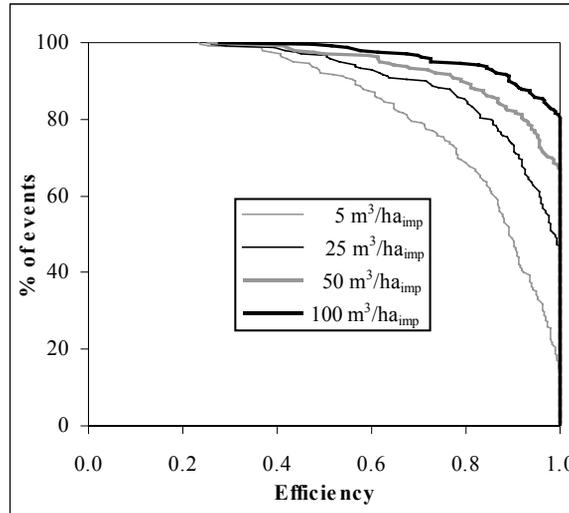


Analisi dei risultati: frequenze di non superamento

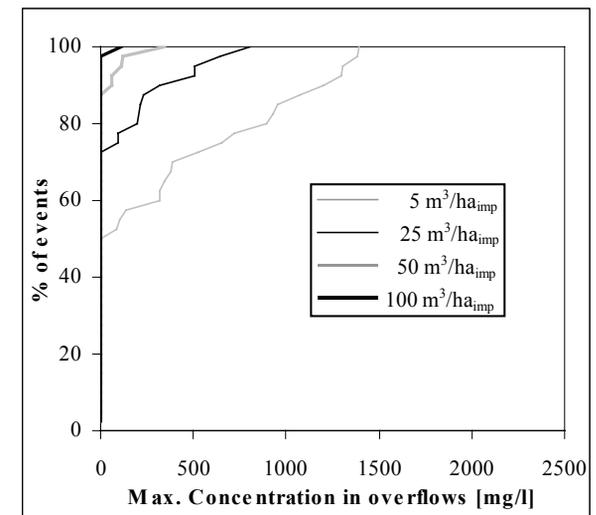
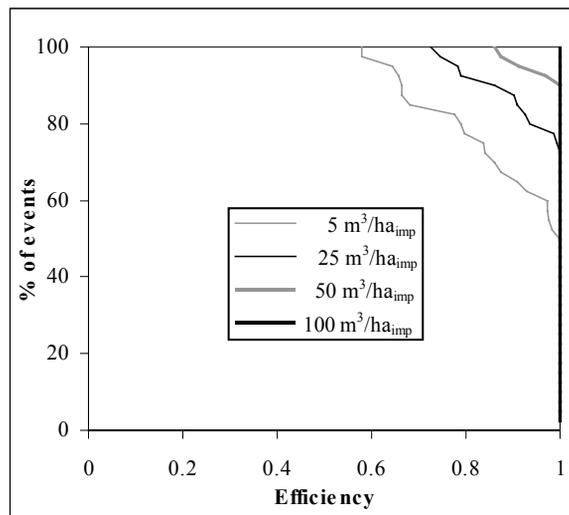
Esempio per
vasche in linea



Parco d'Orlèans



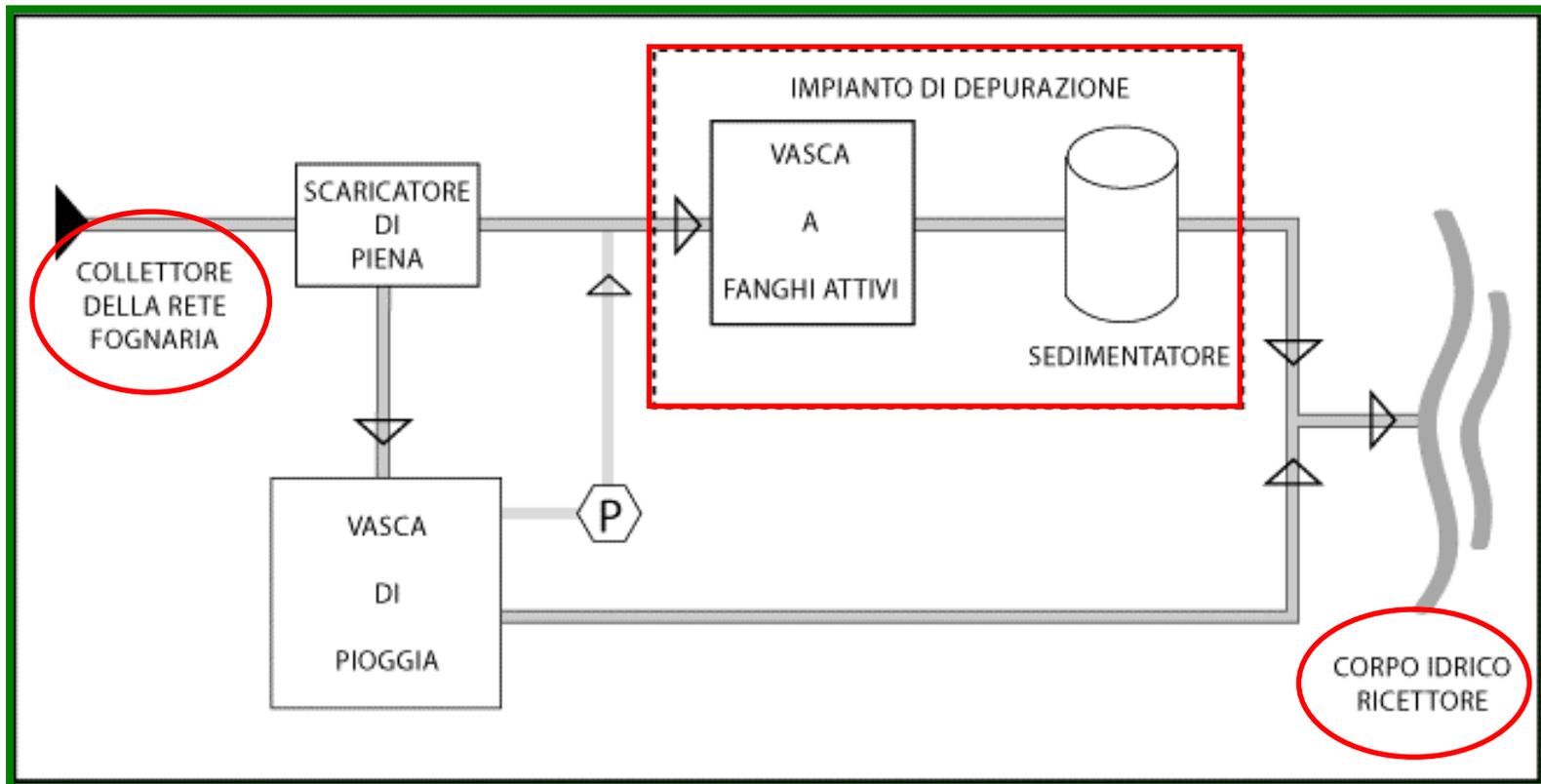
Fossolo





***Modelli integrati di drenaggio urbano
(Mannina, Viviani e Freni, 2003)***

Schema di un modello integrato:



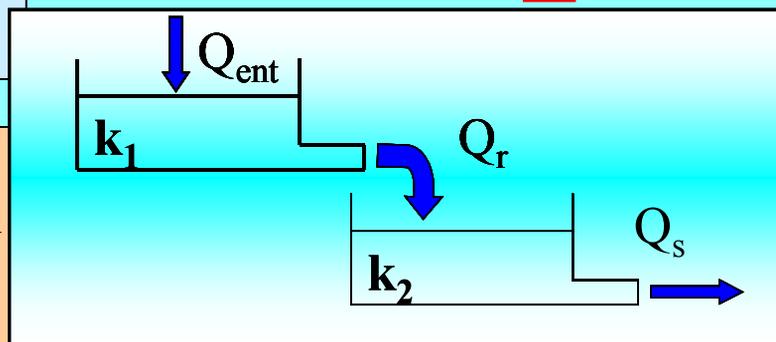
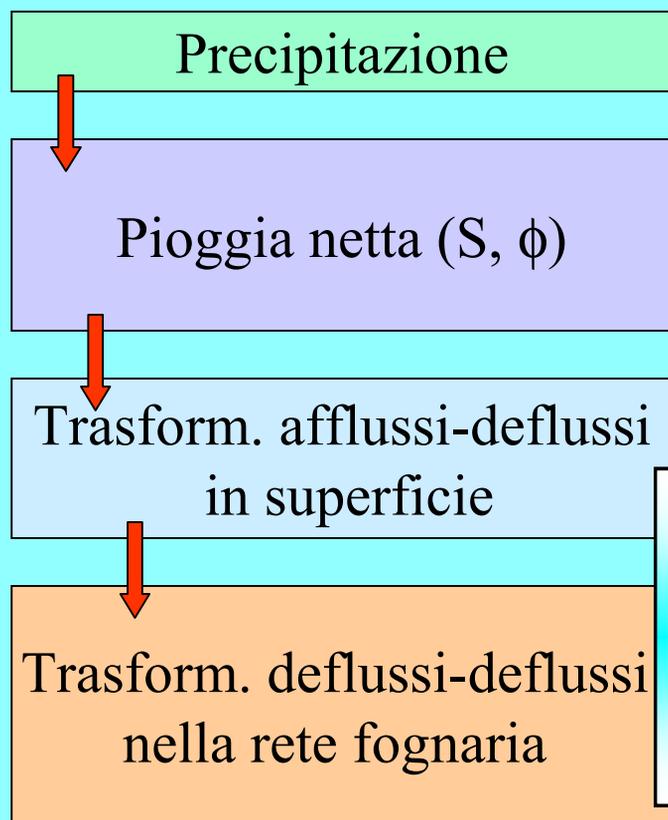


Ragioni che giustificano l'applicazione di metodologie integrate:

- Possibilità di mettere in relazione lo **stato di qualità dei corpi idrici** con le **caratteristiche delle acque** veicolate dai sistemi di drenaggio urbano, in essi sversati attraverso gli scarichi di piena (CSO) e gli impianti di depurazione
- Risoluzione di problematiche relative alla **gestione coordinata delle attività presenti a scala di bacino**
- Definizione di strategie mirate al **risanamento dei corpi idrici ricettori**, per il raggiungimento delle classi di qualità previste dal D.lgs 152/99.



Modulo fognatura (sottomodulo quantità):



L'utilizzo di due serbatoi consente di separare i fenomeni idraulici sul bacino da quelli all'interno della rete fognaria

IUH₁

$$u(t) = \frac{1}{k_1} \cdot e^{-\frac{t}{k_1}}$$



Modulo fognatura (sottomodulo qualità):

Bacino superficiale

Accumulo in tempo secco dei solidi sul bacino

$$M_a(ts) = \left(\frac{Accu}{disp}\right) \cdot A \cdot IMP \cdot (1 - e^{(-disp \cdot ts)}) + M_r \cdot e^{(-disp \cdot ts)}$$

Dilavamento in tempo di pioggia
dei solidi accumulati in tempo secco

$$M_{ent}(t) = M_a(t - \Delta t) \cdot (1 - e^{-(Arra \cdot Pn(t)^{wash} \cdot \Delta t)})$$

Fognatura

Accumulo in tempo secco dei sedimenti
in fognatura

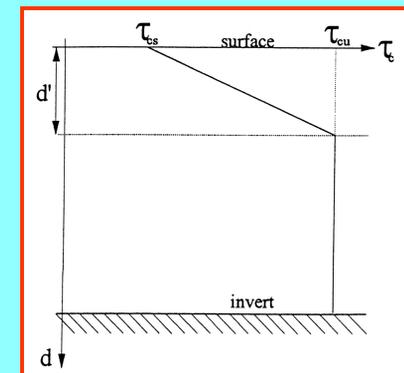


Erosione dei sedimenti in fognatura
in tempo di pioggia
(Parchure e Metha, 1985)

$$M_{ero}(t) = M \left(\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right)$$

Sforzo
tangenziale
indotto dalla
corrente

Sforzo
tangenziale
resistente del
materiale





Modulo fognatura (sottomodulo scaricatore di piena):

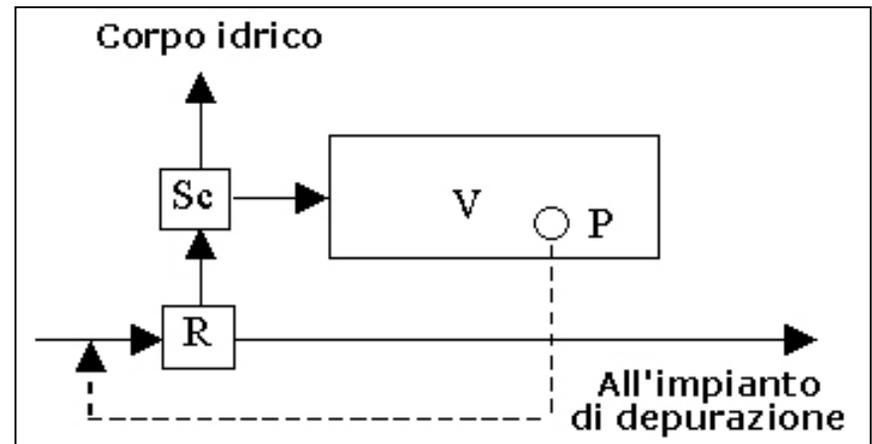
- valutazione di idrogrammi e pollutogrammi avviati all'impianto di depurazione e al corpo ricettore
- è tenuta in conto l'efficienza dello scaricatore di piena:

$$\begin{cases} Q_{\text{imp}} = Q_{\text{coll}} + \left\{ Q_{\text{max},tP} + (Q_{\text{max},p,im} + Q_{\text{max},tP}) \cdot [1 - e^{-(k \cdot Q_{\text{coll}})}] \right\} & \text{se } Q_{\text{coll}} > Q_{\text{max},tP} \\ Q_{\text{imp}} = Q_{\text{coll}} & \text{se } Q_{\text{coll}} \leq Q_{\text{max},tP} \end{cases}$$

Modulo fognatura (sottomodulo vasca di pioggia):

Vasca fuori linea:

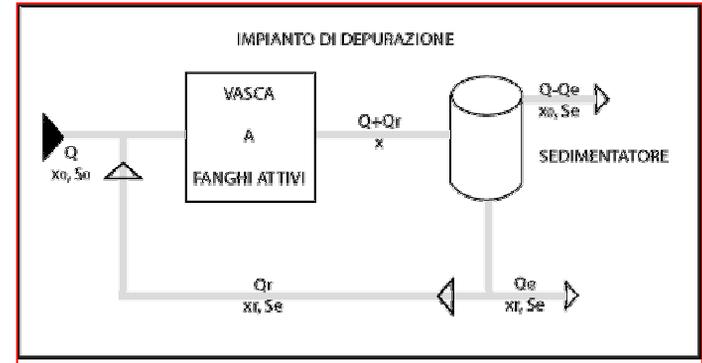
- calcolo di volumi e carichi avviati alla vasca e al corpo ricettore
- ipotesi di vasca a completa mix





Modulo impianto di depurazione:

- ⊕ Consequenze delle variazioni in tempo di pioggia delle caratteristiche quali-quantitative dei reflui sui rendimenti dei trattamenti biologici .
- ⊕ Possibilità di dilavamento dei solidi dai sedimentatori finali per sovraccarico idraulico



a) sottomodulo vasca a fanghi attivi:

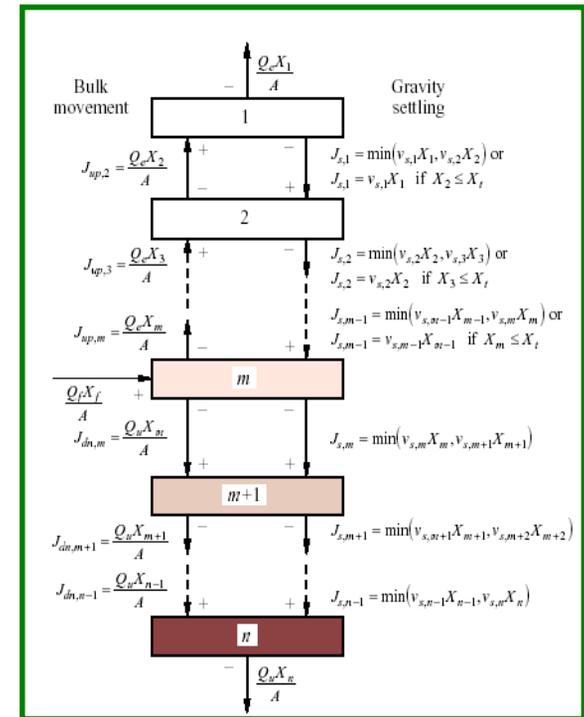
bilancio di massa;
 cinetica di Monod:

$$V \frac{dS}{dt} = Q \cdot S_F - v \cdot X \cdot V - Q \cdot S_E$$

$$V \frac{dX}{dt} = Q \cdot X_F - (\mu - k_d) X \cdot V + Q_R \cdot X_R - (Q + Q_R) X$$

b) sottomodulo sedimentatore:

teoria di Vitasovic; velocità di sedimentazione di Takacs





Modulo corpo idrico ricettore:

Modello monodimensionale di simulazione dei processi di deossigenazione e riossigenazione per effetto degli scarichi in tempo di pioggia, provenienti da impianti di depurazione e CSO.

a) sottomodulo di quantità:

modello cinematico

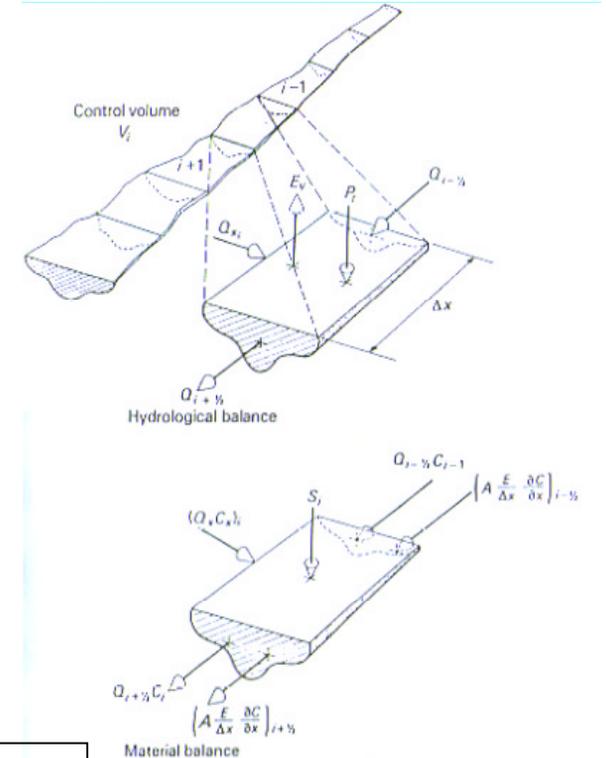
b) sottomodulo di qualità:

diffusione - reazione

$$\frac{\partial C(t, x)}{\partial t} = -u(t, x) \frac{\partial C(t, x)}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C(t, x)}{\partial x^2} - f(C(t, x))$$

$$\frac{\partial \text{BOD}(t, x)}{\partial t} A = \frac{\partial \left(A \cdot D \frac{\partial \text{BOD}}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial (A \cdot U \cdot \text{BOD})}{\partial x} + A [-(k_d + k_s) \text{BOD}]$$

$$\frac{\partial \text{OD}(t, x)}{\partial t} A = \frac{\partial \left(A \cdot D \frac{\partial \text{OD}}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial (A \cdot U \cdot \text{OD})}{\partial x} + A [k_a (\text{DO}^S - \text{OD}) - (k_d + k_s) \text{BOD}]$$





Applicazione del modello a un caso di studio "semi-ipotetico":

- calibrazione del **modulo fognatura** per il bacino urbano di Fossolo (BO):

k_1, k_2 per il modulo di quantità

wash, k_{susp}, M per il modulo di qualità

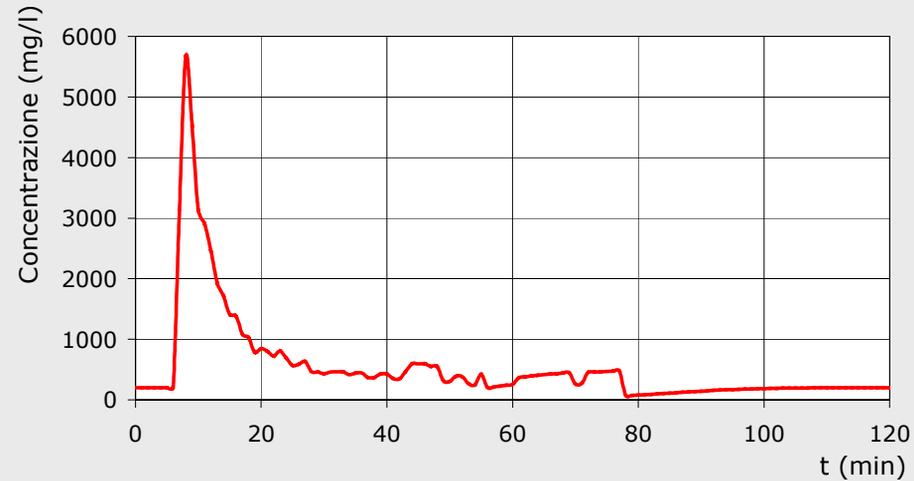
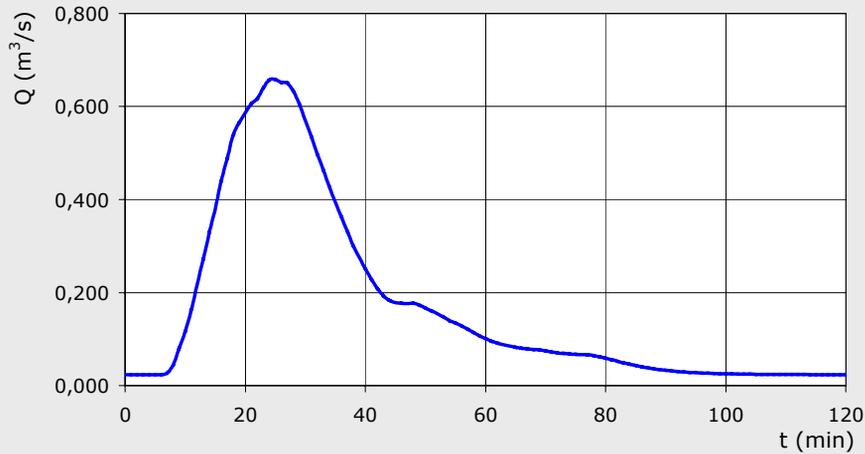
- calibrazione del **modulo del corpo idrico** per il fiume Oreto (PA):

coefficienti K_1 e K_2

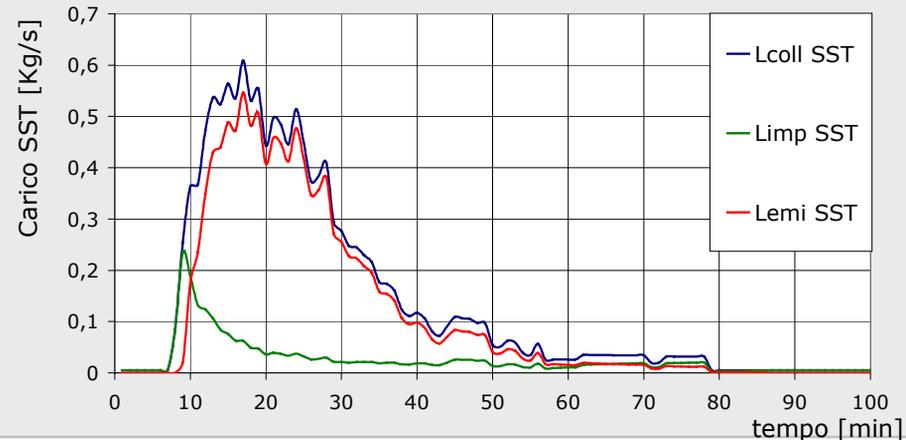
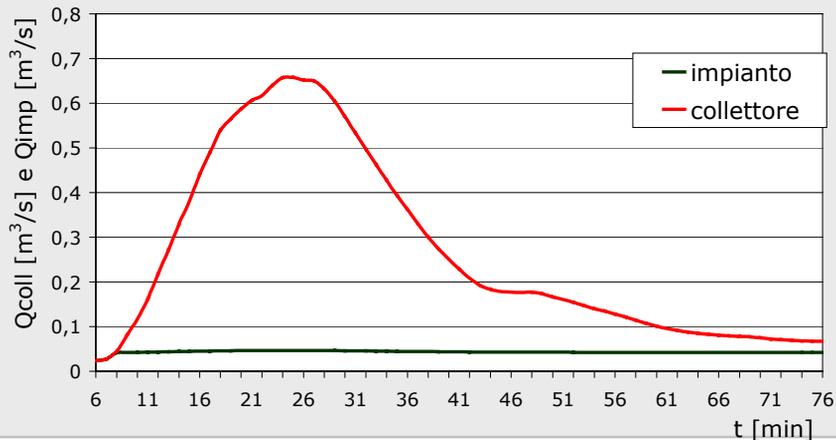


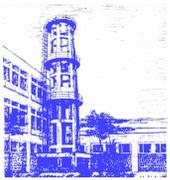
Esempio di applicazione: evento del 25/4/1994

Rete fognaria:

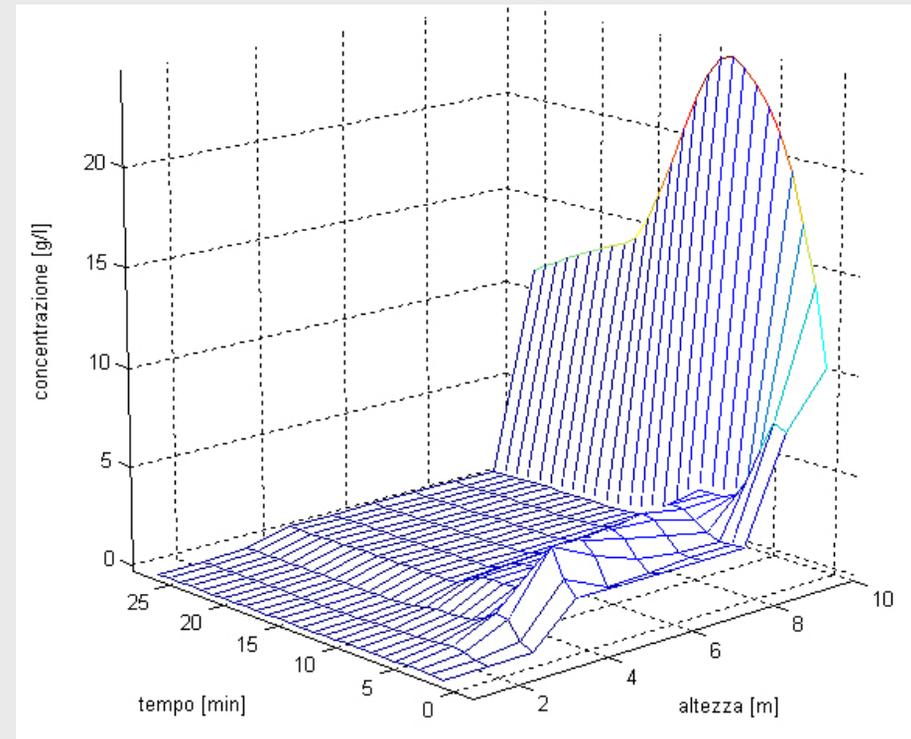
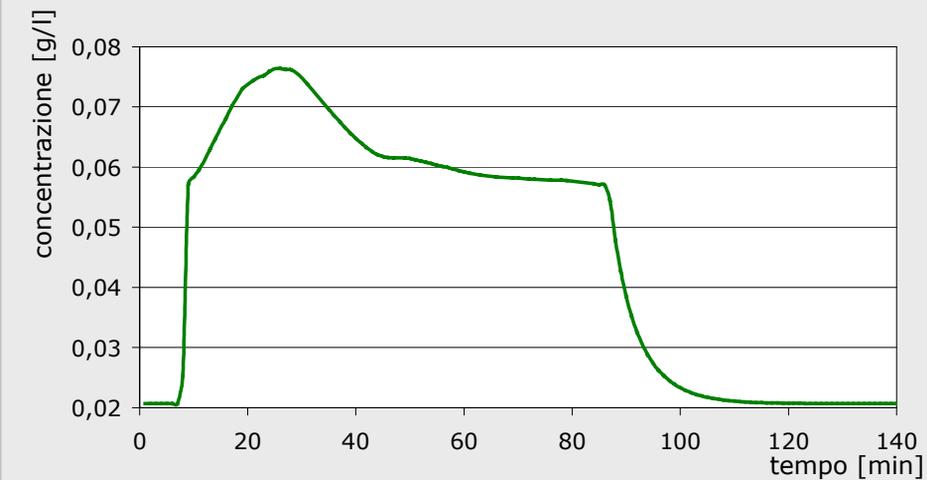
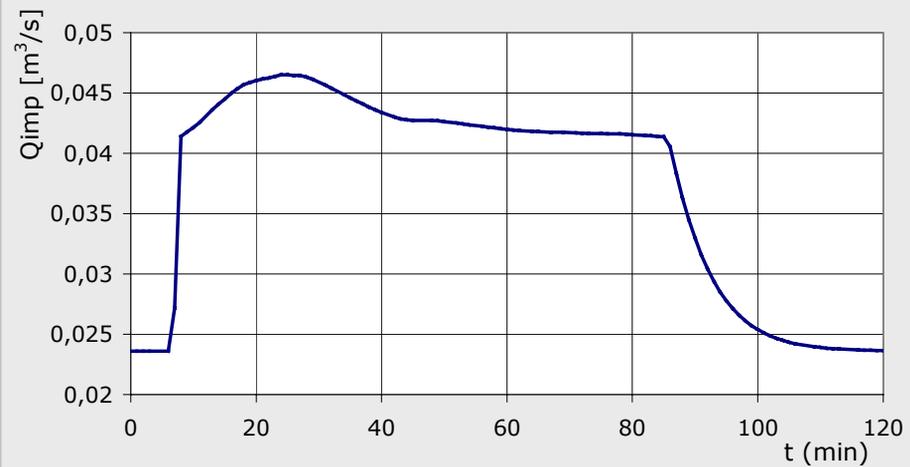


Scaricatore di piena:



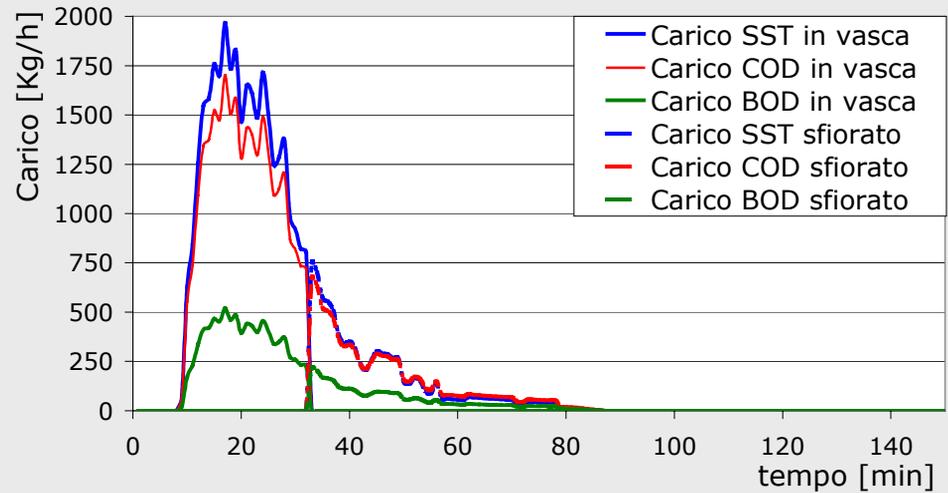
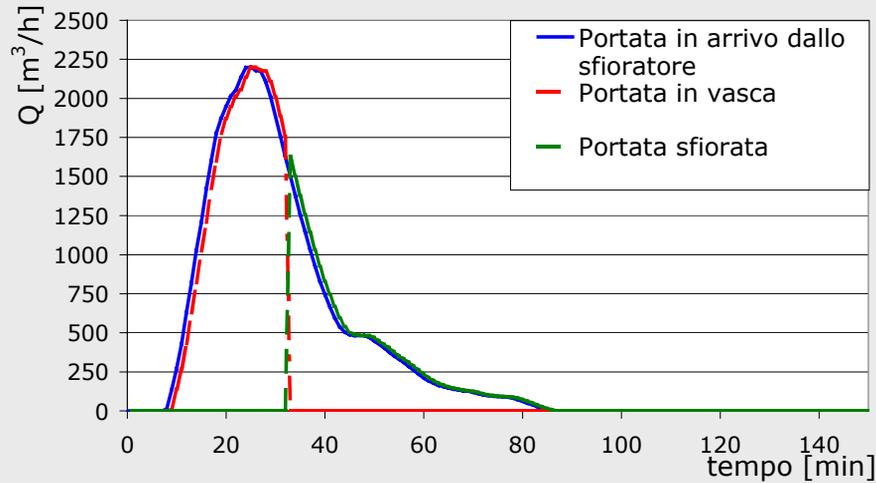


Impianto di depurazione:

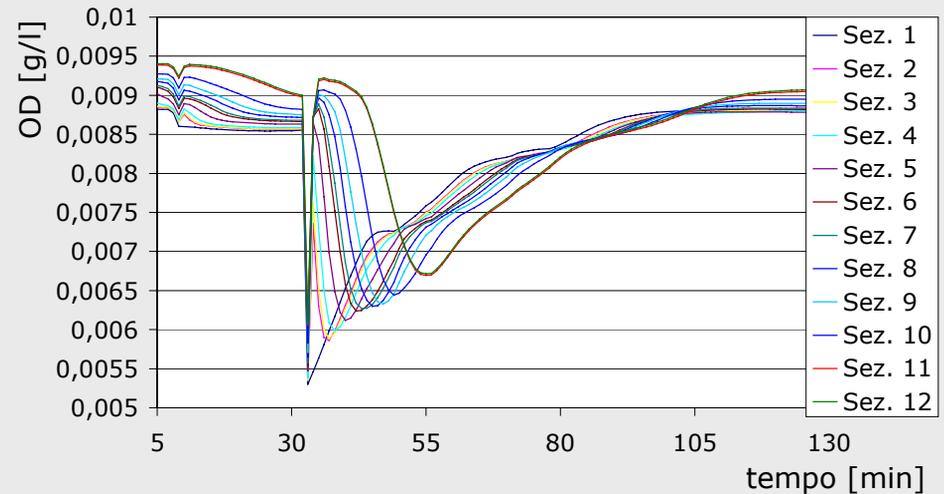
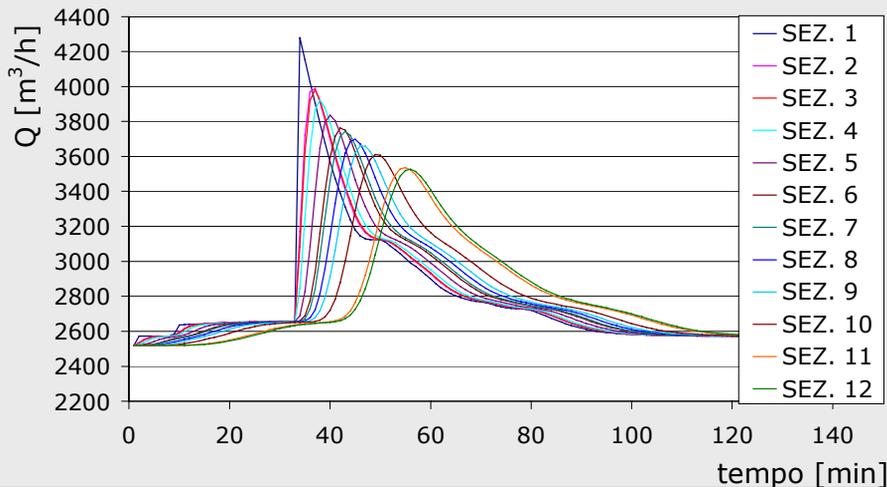




Vasca di pioggia:



Corpo idrico ricevitore:





***Analisi dell'inquinamento diffuso di un bacino fluviale a carattere torrentizio, con elevata presenza urbana
(Candela, Aronica e Viviani, 2002)***

Obiettivo: valutazione della risposta quali-quantitativa di un bacino naturale parzialmente urbanizzato a scala giornaliera

a) modello concettuale di risposta idrologica (teoria dell'IUH):

- deflusso superficiale (surface flow);
 - deflusso profondo a scala giornaliera (subsurface flow)
 - deflusso profondo a scala mensile (baseflow)
- ➔
- 1 Canale**
 - 1° Serbatoio**
 - 2° Serbatoio**

$$IUH(t) = c_0 \cdot \delta(t) + c_1 \exp(-\lambda_1 t) + c_2 \exp(-\lambda_2 t)$$

c_1 c_2 c_0 percentuali pioggia effettiva

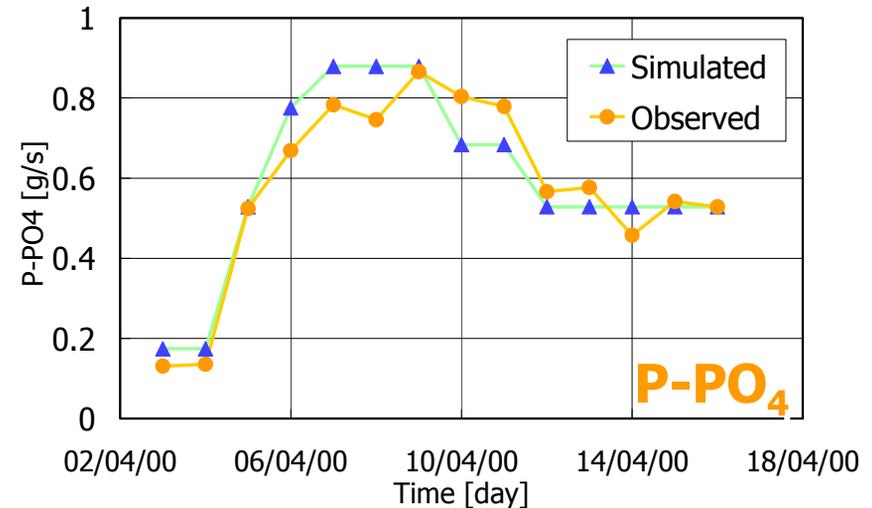
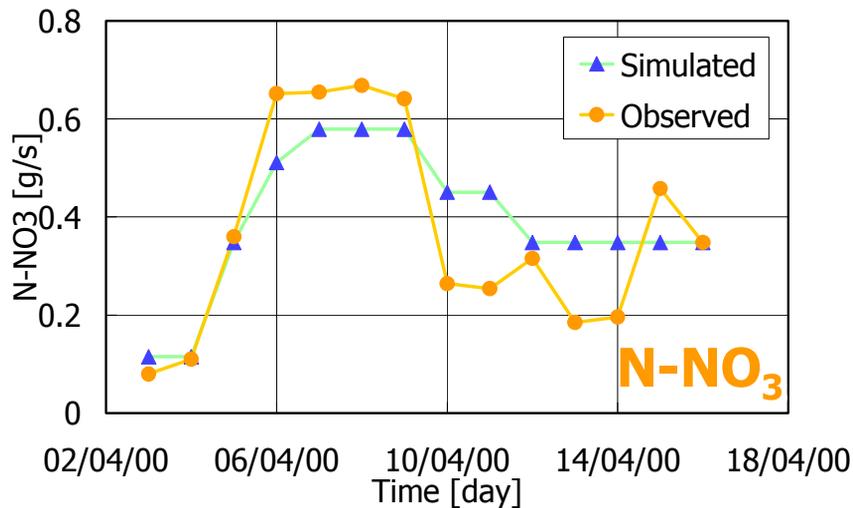
λ_1 λ_2 costanti di invaso per i deflussi profondi.



b) modello concettuale di funzione di risposta dell'unità di massa:

UMRF: Flusso di massa nel tempo in risposta ad un evento di pioggia di intensità e durata unitaria uniformemente distribuita sul bacino (*Zingales et al., 1984*)

Risultati (t. Nocella):





Considerazioni conclusive:

- ✓ **Qualità delle acque di pioggia:** difficile generalizzazione dei risultati delle indagini: maggiore necessità di dati di campo;
- ✓ **Vasche di pioggia:** sufficienti elementi per l'individuazione di metodi di calcolo affidabili; problemi di gestione ??
- ✓ Necessità di strumenti atti a mettere in relazione la qualità degli **scarichi** e quella del **corpo ricettore**
- ✓ Opportunità di tener conto dell'**inquinamento diffuso** nel bilancio globale degli inquinanti a scala di bacino

Ricerche in corso del DIIAA:

- **Modelli integrati di drenaggio urbano:** legame quantitativo tra l'uso del territorio (inquinamento concentrato e diffuso) e qualità del corpo ricettore: rapporto causa-effetto tra limiti allo scarico e standard di qualità del corpo idrico; applicazioni a casi reali: bacini strumentati (PRIN 40% 2002).
- **Modelli distribuiti** di valutazione della quantità e qualità delle acque di pioggia e degli effetti di interventi di mitigazione degli impatti (BMP, DSMP)