



**BioMAc 2016**  
**Bioreattori a Membrane (MBR)**  
 e trattamenti avanzati per la depurazione delle Acque

---

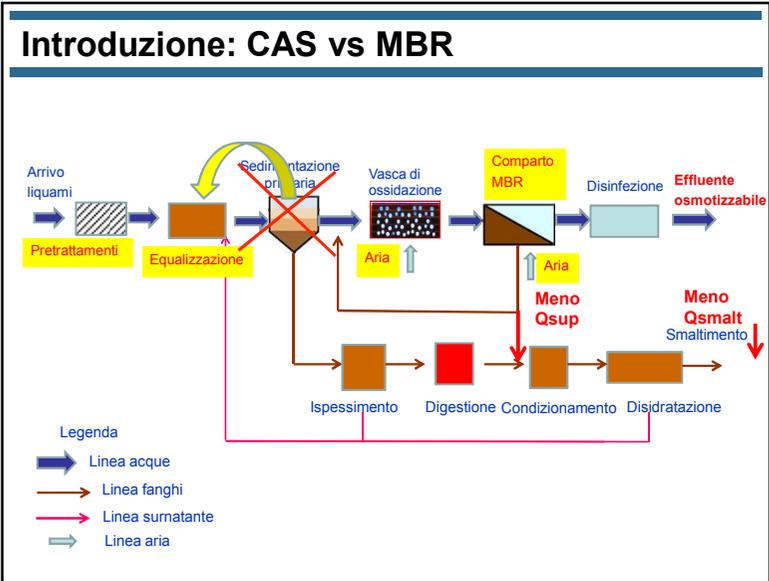
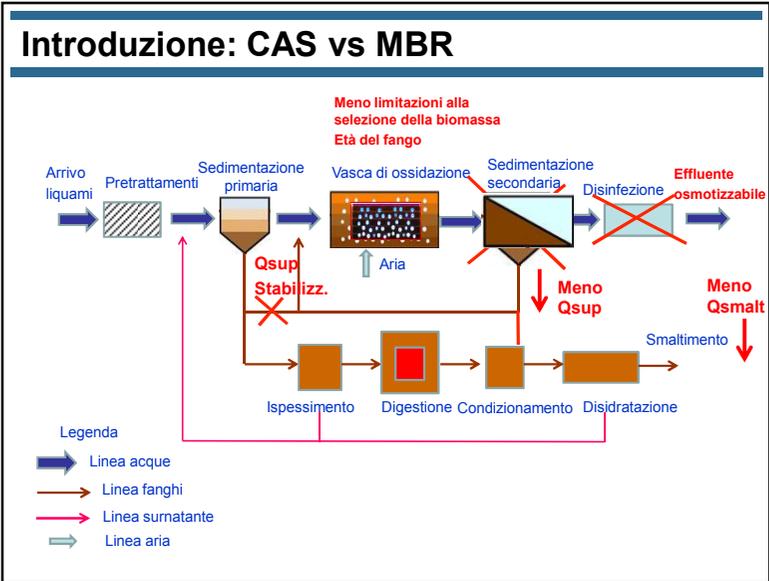
## I costi d'investimento e di esercizio degli impianti MBR

Paolo Roccaro, Federico G. A. Vagliasindi  
 (Università degli Studi di Catania)

Palermo, 27-28 ottobre 2016

### Sommario

- CAS vs MBR
- Costi di trattamento
  - Curve di costo: CAS vs MBR
  - Caso studio: fattibilità tecnico-economica MBR vs CAS (aerazione estesa)
- Inserimento degli MBR in impianti multi-barriera
- Costi - fattibilità – sostenibilità
- Monitoraggio: costi e sistemi real-time



### Costi di trattamento

- Forte variabilità dei costi di costruzione degli impianti di trattamento delle acque reflue connessa a:
  - Dimensione degli impianti;
  - Caratteristiche delle acque reflue;
  - Articolazione in linee parallele (flessibilità di funzionamento a fronte dei fuori esercizio);
  - Modalità realizzative;
  - Fattori locali.

### Costi di trattamento

- **Valutazione dei costi capitali ed operativi:**
  - **Analitica: Computo metrico**
    - Progettazione esecutiva;
    - Difficoltà a reperire i costi di attrezzature ed opere elettromeccaniche per impianti di depurazione (non esistono voci specifiche sui prezzi regionali)
  - **Non analitica: stima di massima per la valutazione dei costi unitari di trattamento (€/m<sup>3</sup>) ricavabili da:**
    - Dati e metodologie proposte in letteratura
    - Database regionali dei costi di costruzione e gestione degli impianti esistenti

### Costi di trattamento

- **I costi capitali vengono espressi in € e includono:**
  - Scavo e preparazione del sito
  - Attrezzature
  - Calcestruzzo
  - Acciaio
  - Manodopera
  - Tubazioni e valvolame
  - Attrezzature e strumentazioni elettriche
  - Edifici.

### Costi di trattamento

- **Tra i costi capitali vanno inoltre considerate le somme a disposizione della stazione appaltante:**
  - IVA
  - Spese tecniche (relazione geologica, progettazione e direzione lavori)
  - Acquisto area ed espropri
  - Servitù
  - Allacciamenti (elettricità e servizio idrico)
  - Imprevisti (<5%).

## Costi di trattamento

- I costi di esercizio vengono espressi in €/anno e includono:
  - Personale operativo e di impianto
  - Spese energetiche
  - Reagenti di processo
  - Smaltimento fanghi
  - Manutenzione ordinaria e straordinaria delle opere (compresi i materiali di consumo)
  - Vanno inoltre valutati i costi di esercizio a livello centrale comprendenti:
    - Costi per il personale amministrativo e di controllo;
    - Spese generali (materiali d'ufficio, automezzi e mezzi d'opera, spese per materiale di laboratorio)

## Costi di trattamento

$$OACC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} C_o$$

OACC = onere annuo di ammortamento €/anno

i = tasso di interesse

n = numero di anni di vita funzionale dell'opera

$C_o$  = costo capitale dell'opera

## Costi di trattamento

- Il **C**osto **U**nitario **T**otale (**CUT**) viene solitamente espresso in €/m<sup>3</sup> di acqua trattata

$$CUT = \frac{OACC + CTE}{Q_{inf}}$$

- $Q_{inf}$  = portata annua influente all'impianto (m<sup>3</sup>/anno)
- OACC = onere annuo di ammortamento dei costi capitali (€/anno)
- CTE = costi totali di esercizio (€/anno)

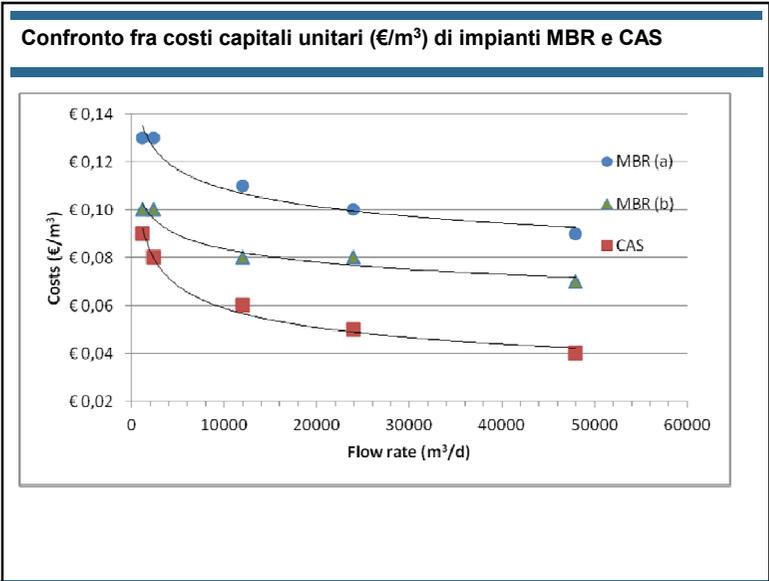
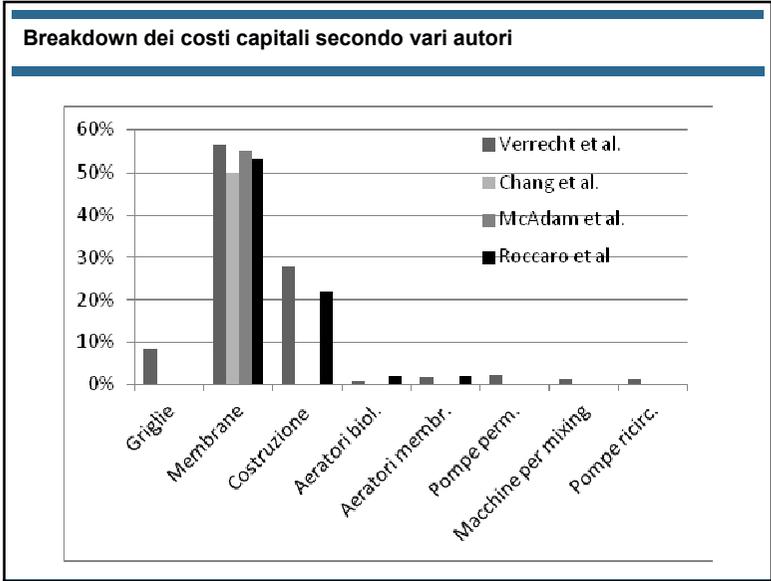
## Costi di trattamento: Schemi e costi a confronto

- SCHEMA 1 (Roccaro, 2010): trattamenti preliminari, sedimentazione primaria, MBR con rimozione biologica di N e P.
- SCHEMA 2 (Verrecht, 2010): trattamenti preliminari, equalizzazione, reattore anossico, MBR (rimozione biologica di N e P).
- SCHEMA 3 (Roccaro, 2010): trattamenti preliminari, sedimentazione primaria, CAS, sedimentazione secondaria.
- SCHEMA 4 (Friedler, 2006): trattamenti preliminari, sedimentazione primaria, CAS, sedimentazione secondaria.

**Costi capitali specifici per impianti di depurazione di diversa tipologia**

| Schema   | Portata (m <sup>3</sup> /d) | AE      | Costi (€/m <sup>3</sup> ) | Costi (€/AE anno) | Riferimento bibliografico |
|----------|-----------------------------|---------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| Schema 1 | 48000                       | 200.000 | 0,09                      | 8                 | Roccaro, 2010             |
| Schema 2 | 59580                       | 248.250 | 0,05                      | 5                 | Verrecht, 2010            |
| Schema 3 | 48000                       | 200.000 | 0,04                      | 3,5               | Roccaro, 2010             |
| Schema 4 | 48000                       | 200.000 | 0,07                      | 6                 | Friedler, 2006            |

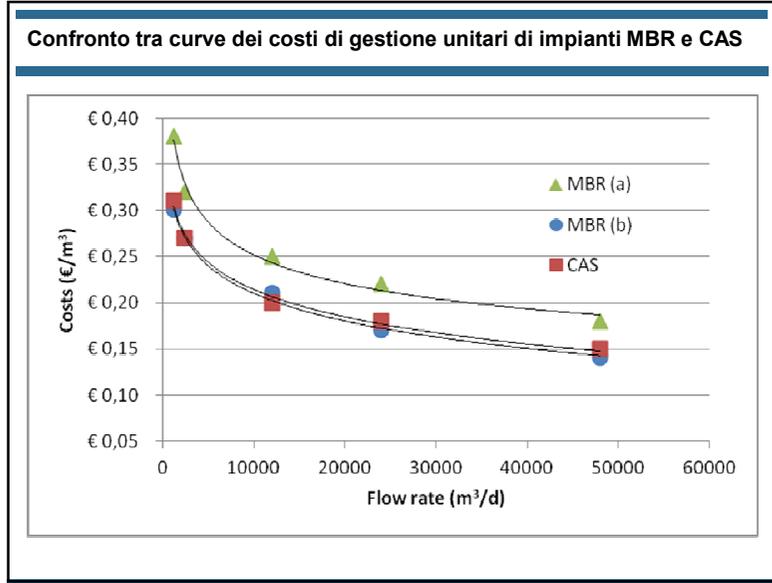
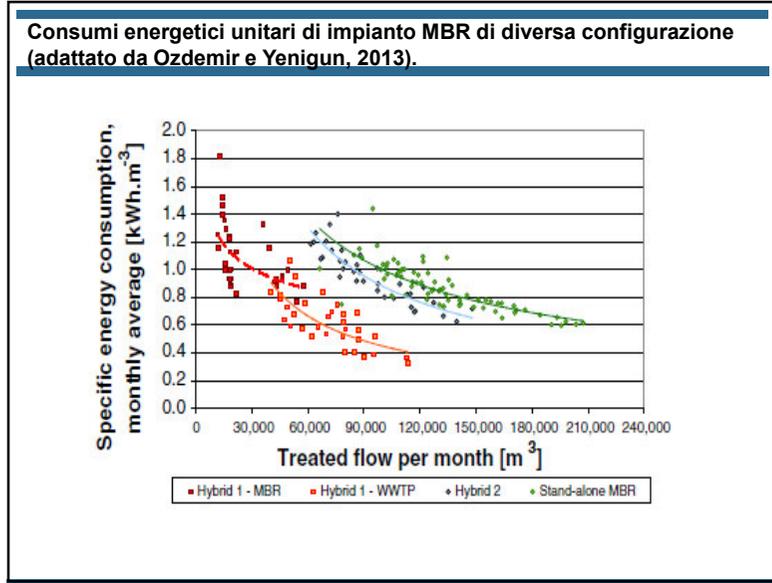
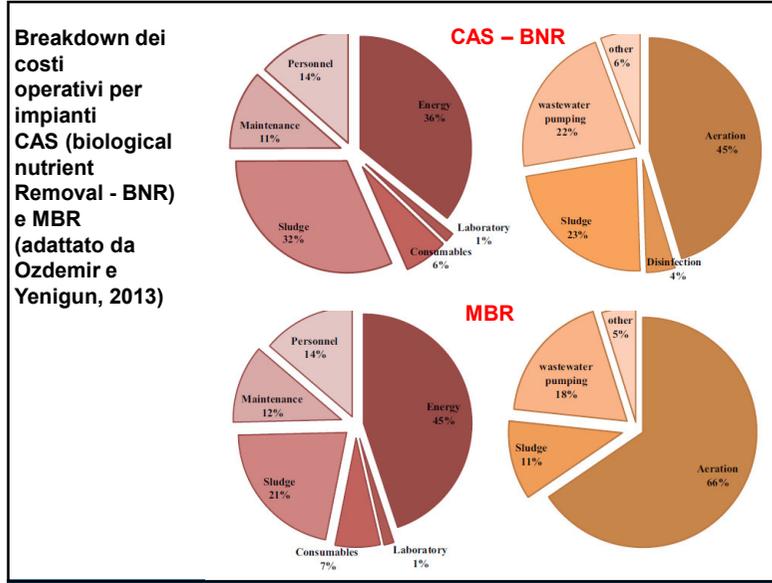
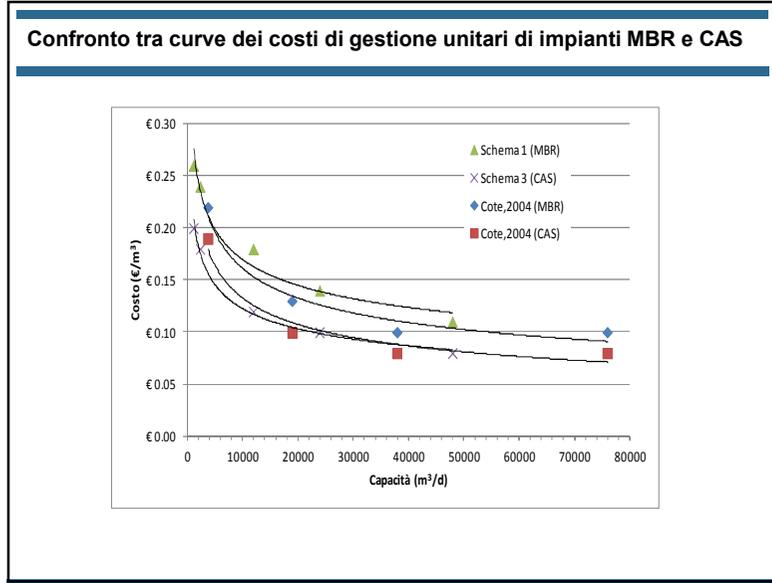
In tutti gli schemi non sono stati considerati i costi relativi a strutture di servizio, sistemazione area, IVA, spese di progettazione ed altre somme a disposizione e costi di acquisto dell'area.



**Costi di gestione unitari per impianti MBR**

| Schema d'impianto | Portata (m <sup>3</sup> /d) | Costi (€/m <sup>3</sup> ) | Riferimento bibliografico |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Schema 1          | 48000                       | 0,16                      | Roccaro, 2010             |
| Schema 2          | 20851                       | 0,12                      | Verrecht, 2010            |
| Schema 5*         | Scala lab.                  | 0,40                      | Gil, 2010                 |
| Schema 6**        | 18120                       | 0,29                      | Krzeminski, 2012          |
| Schema 6**        | 38000                       | 0,10                      | Côtè, 2004                |

\*Schema 5: sedimentazione primaria, denitrificazione, MBR;  
 \*\*Schema 6: trattamenti preliminari, MBR.



**Caso studio: Metodologia per il calcolo di costi di trattamento**

- Dimensionato delle singole unità di trattamento presenti negli schemi di trattamento proposti
- Valutazione dei costi

**Caso studio: Metodologia per il calcolo di costi di trattamento**

- Il costo delle opere civili è stato calcolato, dopo un dimensionamento di massima delle unità di trattamento e delle opere civili (calcestruzzo e acciaio), tramite il computo metrico relativo alle seguenti voci:
  - scavo opera
  - cemento
  - acciaio
  - casseforme
- Per il calcolo dei costi si è fatto riferimento al prezzario regionale per il Lavori Pubblici nella Regione Siciliana.

**Caso studio: Metodologia per il calcolo di costi di trattamento**

- I costi delle singole apparecchiature elettromeccaniche sono stati reperiti attraverso opportune indagini di mercato, contattando aziende che operano in questo settore:
  - SIEMENS
  - XYLEM
  - ECOMAC srl.
  - OFFICINE MECCANICHE SAVI
  - PIERALISI
  - INDUSTRIE CHIMICHE CAFFARO
  - Etc.

**Caso studio: Metodologia per il calcolo di costi di trattamento**

- I costi di esercizio sono stati stimati, sulla base dei dati di letteratura (Bonomo, 1992) adattati e aggiornati, considerando le seguenti voci:
  - personale operativo di impianto
  - energia
  - reattivi di processo
  - smaltimento fanghi
  - manutenzione ordinaria e straordinaria delle opere (compresi materiali di consumo)



**Caso studio: Risultati**

Si vuole effettuare un confronto tra la soluzione CAS e quella MBR analizzando i costi relativi alle opere edili, elettromeccaniche e di esproprio.

| VOCI COMPUTO  | IMPORTO IMPIANTO CAS (€) | IMPORTO IMPIANTO MBR (€) | DIFFERENZA (€) | DIFFERENZA PERCENTUALE (%) | VOCI  | QUANTITA'                             | COSTO SPECIFICO                               | COSTO TOTALE (€)                        |                        |
|---|--------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|---|---------------------------------------|---|---|------------------------|
| Scavo di sbiancamento   | 23665                    | 4129                     | 6536           | 32                         | Membrane  | 4426 m <sup>2</sup>                   | 60 €/m <sup>2</sup>                           | 265569                                  |                        |
| Ritorno   | 489                      | 972                      | -483           | -50                        | Opere elettromeccaniche*                                    | -                                     | -   | 14000                                   |                        |
| Conglomerato cementizio fondazioni                                  | 38099                    | 29546                    | 8549           | 22                         | Opere civili  | -                                     | -   | 122238                                  |                        |
| Conglomerato cementizio elevazioni                                  | 68563                    | 48600                    | 19963          | 29                         | TOT   | -                                     | -   | 291806                                  |                        |
| Asfalto   | 143235                   | 81065                    | 62170          | 43                         | Elemento  | Numero                                | Costo unitario (€)                            | Costo totale                            |                        |
| Cassonetto  | 47964                    | 32542                    | 15422          | 32                         | Ponte raschiatore   | 1                                     | 38000   | 38000                                   |                        |
| Impianto di materiale a densità (solo demolizione impianto attuale) | 7648                     | 7648                     | 0              | 0                          | Pompa ricircolo fango*                                      | 2                                     | 6000  | 12000                                   |                        |
| Demolizioni (solo demolizioni impianto attuale)                     | 1342                     | 1342                     | 0              | 0                          | Microfiltrazione  | 1                                     | 69700   | 69700                                   |                        |
| Formasi profilati ferro (travi HE) per passerelle                   | 13005                    | 9069                     | 3936           | 47                         | Disinfezione acido peracetico (pompa dosatrice e serbatoio) | 1                                     | 1730  | 1730                                    |                        |
| Impermeabilizzazione  | 21550                    | 14408                    | 7142           | 33                         | Espositore a gravità**                                      | 1                                     | 14430   | 14430                                   |                        |
| Spariti di mala in preparazione all'impermeabilizzazione            | 10708                    | 7524                     | 3184           | 30                         | Centrifuga  | ***                                   | ***   | 20000                                   |                        |
| Tubazioni PEAD corrugato (tot.)                                     | 11828                    | 6805                     | 5023           | 42                         | TOT   | -                                     | -   | 151860                                  |                        |
| Saracinesche  | 14350                    | 5450                     | 8900           | 62                         | Tipo di impianto  | Area da espropriare (m <sup>2</sup> ) | Percentuale di esproprio sull'area totale (%) | Prezzo di esproprio (€/m <sup>2</sup> ) | Oneri di esproprio (€) |
| TOT   | 398442                   | 259100                   | 139342         | 35                         | Aerazione prolungata  | 1543                                  | 42,5  | 4                                       | 6172                   |
|   |                          |                          |                |                            | MBR   | 909                                   | 25,0  | 4                                       | 3663                   |

**Caso studio: Risultati**

$$\Delta C = C_{edili} + C_{apparecchiature} + C_{esproprio} - C_{membrane} = 140000 + 152000 + 2500 - 292000 = 2500 \text{ €}$$

|     | Costi capitali unitari (€/m <sup>3</sup> ) | Costi di gestione unitari (€/m <sup>3</sup> ) | Costi totali unitari (€/m <sup>3</sup> ) |
|-----|--|---|--|
| CAS | 0,17                                       | 0,37  | 0,54                                     |
| MBR | 0,20                                       | 0,32  | 0,52                                     |

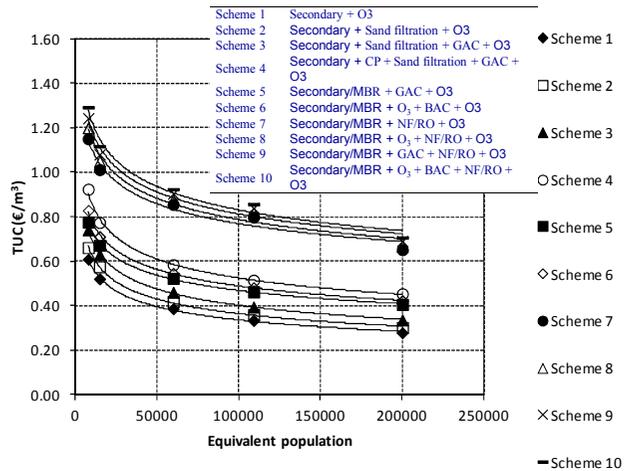
**Inserimento degli MBR in impianti multi-barriera (Roccaro et al., 2013)**

**Approccio multibarriera**

| Scheme    | Treatment processes  | Removal efficiency % range |                |       |
|-----------|--|----------------------------|----------------|-------|
|           |  | UV                         | O <sub>3</sub> | AOPs  |
| Scheme 1  | Preliminary + Primary + AS + Settling + UV/OX                              | 18-94                      | 48-99          | 56-99 |
| Scheme 2  | Preliminary + Primary + AS + Settling + Sand filtration + UV/OX            | 18-94                      | 48-99          | 56-99 |
| Scheme 3  | Preliminary + Primary + AS + Settling + Sand filtration + GAC + UV/OX      | 24-99                      | 60-99          | 65-99 |
| Scheme 4  | Preliminary + Primary + AS + Settling + CP + Sand filtration + GAC + UV/OX | 29-99                      | 62-99          | 66-99 |
| Scheme 5  | Preliminary + Primary + <b>MBR</b> + GAC + UV/OX                           | 24-99                      | 60-99          | 65-99 |
| Scheme 6  | Preliminary + Primary + <b>MBR</b> + O <sub>3</sub> + BAC + UV/OX          | 84-99                      | 87-99          | 87-99 |
| Scheme 7  | Preliminary + Primary + <b>MBR</b> + NF/RO + UV/OX                         | 69-99                      | 75-99          | 75-99 |
| Scheme 8  | Preliminary + Primary + <b>MBR</b> + O <sub>3</sub> + NF/RO + UV/OX        | 75-99                      | 75-99          | 75-99 |
| Scheme 9  | Preliminary + Primary + <b>MBR</b> + GAC + NF/RO + UV/OX                   | 69-99                      | 80-99          | 80-99 |
| Scheme 10 | Preliminary + Primary + <b>MBR</b> + O <sub>3</sub> + BAC + NF/RO + UV/OX  | 90-99                      | 92-99          | 92-99 |

AS: activated sludge, MBR: membrane bio-reactor, GAC: granular activated carbon, BAC: biological activated carbon, CP: chemical precipitation, NF: nanofiltration, RO: reverse osmosis, OX: oxidation processes (O<sub>3</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

**Inserimento degli MBR in impianti multi-barriera: Costi di trattamento (Roccaro et al., 2013)**



### Trattamento delle acque reflue: Costi – Fattibilità - Sostenibilità

- Necessità di investire su
  - trattamenti avanzati delle acque reflue
  - controllo in tempo reale della qualità degli scarichi

### Inquinamento dei corpi idrici



Tabella 3.1.2 – Classificazione dello stato ecologico ed ambientale

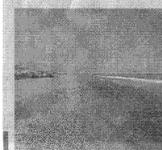
| STAZIONE | Luglio 2005-Giugno2006 |                  |                 |                        |                    | STATO CHIMICO    |                 |
|----------|------------------------|------------------|-----------------|------------------------|--------------------|------------------|-----------------|
|          | IBE                    |                  | L.I.M.          |                        | SECA               |                  | SACA            |
|          | MEDIA                  | C.Q.             | VALORE          | C.Q.                   | C.Q.               |                  | C.Q.            |
| 99       | n.d                    |                  | 170             | SUFFICIENTE            | SUFFICIENTE        | SUFFICIENTE      | < valore soglia |
| 100      | 8/7                    | BUONO            | 200             | SUFFICIENTE            | SUFFICIENTE        | SUFFICIENTE      | < valore soglia |
| 101      | 7                      | SUFFICIENTE      | 220             | SUFFICIENTE            | SUFFICIENTE        | SUFFICIENTE      | < valore soglia |
| 102      | 7                      | SUFFICIENTE      | 300             | BUONO                  | SUFFICIENTE        | SUFFICIENTE      |                 |
| 103      | n.d                    |                  | 145             | SUFFICIENTE            | SUFFICIENTE        | SCADENTE         |                 |
| 104      | 4                      |                  | 180             | SUFFICIENTE            | SUFFICIENTE        | SCADENTE         |                 |
| 105      | 6                      | SUFFICIENTE      | 200             | SUFFICIENTE            | SUFFICIENTE        | SCADENTE         |                 |
| 106      | 4                      | SCADENTE         | 110             | SCADENTE               | SCADENTE           | SCADENTE         |                 |
| 107      | n.d                    |                  | 120             | SUFFICIENTE            | SUFFICIENTE        | SUFFICIENTE      |                 |
| 108      | 6                      | SUFFICIENTE      | 70              | SCADENTE               | SCADENTE           | SCADENTE         |                 |
|          |                        | CLASSE I ELEVATO | CLASSE II BUONO | CLASSE III SUFFICIENTE | CLASSE IV SCADENTE | CLASSE V PESSIMO |                 |

### Inquinamento dei corpi idrici



LA SICILIA 29.03.2013

#### Spiaggia San Marco, scatta il divieto di balneazione



Anche quest'anno, sulla spiaggia di San Marco, si prospetta un'estate "bollente", non per le alte temperature tipiche della bella stagione, ma a causa dell'ormai irrisolvibile problema dell'inquinamento marino. Il sindaco di Calatabiano, Giuseppe Inrelesano, sulla scorta del recente decreto dell'assessorato regionale per la salute e dell'assessorato regionale per il territorio e l'ambiente, che individua i tratti di costa non adibiti alla balneazione, ha emesso un'ordinanza con la quale conferma, con decorrenza immediata e per tutta la stagione estiva 2013, il divieto di balneazione nei tratti di mare a sud del fiume Alcantara (630 metri) e nei pressi del torrente Minissale (25 m a nord e 50 m a sud). Una notizia che non

farà certo piacere ai tanti turisti e bagnanti locali abituate del litorale calatabianese, così come ai gestori delle strutture balneari, che, dopo aver pagato un caro prezzo la scorsa estate in termini di afflusso e guadagni, rischiano, ancora una volta, di dover fare i conti con un'altra stagione povera. Una situazione che danneggia anche l'immagine della stessa località marittima e che, avverte il Comune, lo scorso anno, ad affidare l'incarico a un legale affinché si riaprissero i termini per i finanziamenti europei utili a potenziare il depuratore consortile di Gardini, causa principale del forte inquinamento che viene rilevato dai dati di «Gioletta verde» di Legambiente.

SALVATORE TROVATO

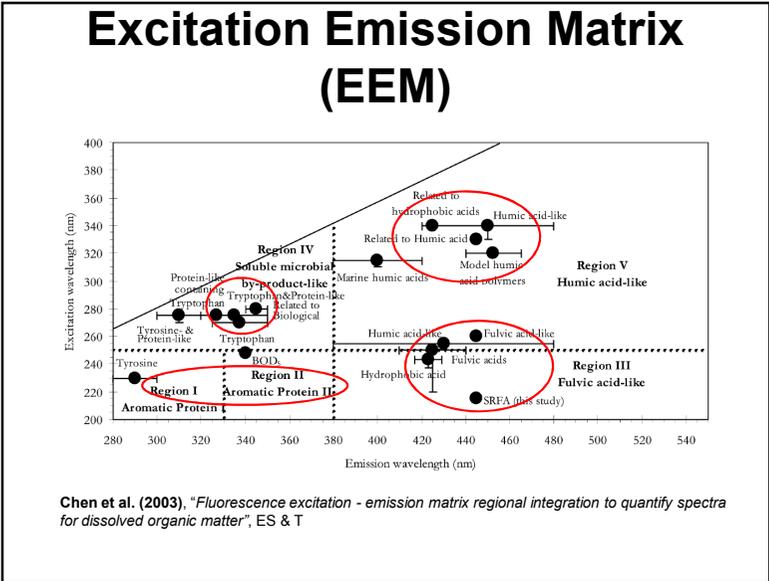
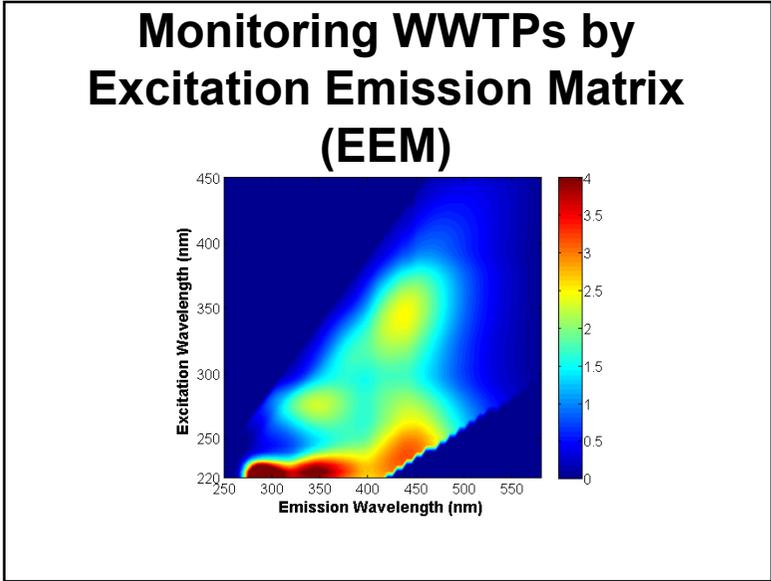
### Trattamento delle acque reflue: Costi – Fattibilità - Sostenibilità

#### Sostenibilità

- Danno per l'ambiente
- Danno per la salute
- Danno per il turismo, PIL
- Sanzioni severe dall'UE
- Mancato recupero di risorse: acqua, nutrienti, energia
- Spreco di acque pregiate e uso di fertilizzanti industriali
- Etc.

### Trattamento delle acque reflue: Costi – Fattibilità - Sostenibilità

- Controllo / monitoraggio / costi
  - Analisi in laboratorio: **tempi e costi**
  - Pochi strumenti disponibili per la misura on-line e real-time (pH, potenziale redox, cloro, conduttività, torbidità, ossigeno, nitrati, ammoniaca)
  - Maggiori difficoltà per la misura in real-time di DOC, COD, composti organici in tracce, composti responsabili del fouling, etc.
  - Nuove tecnologie basate su misure spettroscopiche**



### WWTP schemes

| WWTP | Size (p.e.*) | Treatment train   |
|------|--------------|---|
| 1    | 5300         | preliminary, secondary (activated sludge, extended aeration)  |
| 2    | 34150        | preliminary, primary, secondary (activated sludge, nitrifying), chlorination  |
| 3    | 30000        | preliminary, primary, secondary (rotating biological contactors), chlorination  |
| 4    | 6500         | preliminary, primary, secondary (rotating biological contactors), chlorination  |
| 5    | 55000        | preliminary, primary, secondary (activated sludge, nitrifying), chlorination  |
| 6    | 55000        | preliminary, primary, secondary (activated sludge, nitrification), chlorination   |
| 7    | 25000        | preliminary, primary, secondary (activated sludge, nitrification, denitrification, combined phosphorous removal by ferric chloride), sand filtration, UV disinfection |
| 8    | 432500       | preliminary, primary, secondary (activated sludge, nitrification, denitrification), sand filtration, UV disinfection  |
| 9    | 75000        | preliminary, primary, secondary (activated sludge, nitrification, denitrification), chlorination  |
| 10   | 40000        | preliminary, primary, secondary (activated sludge, nitrification, denitrification), chlorination  |

\*p.e., population equivalent

## Target CECs

| Pharmaceuticals | Personal care products | Pesticides            |
|-----------------|------------------------|-----------------------|
| Atenolol        | Benzophenone           | Atrazine              |
| Benzotriazole   | Triclocarban           | Simazine              |
| Carbamazepine   | Triclosan              | X-ray contrast agents |
| DEET            | Sweeteners             | Iohexol               |
| Diclofenac      | Acesulfame             | Iopamidol             |
| Diltiazem       | Sucralose              | Iopromide             |
| Diphenhydramine | Stimulants             | Flame retardants      |
| Gemfibrozil     | Caffeine               | TCEP                  |
| Ibuprofen       | PEGA                   | TCCP                  |
| Meprobamate     |                        | Surfactants           |
| Naproxen        |                        |                       |

## Analysis

CECs at environmental level - ppt  
(Anumol et al., 2013)

TOC/DOC

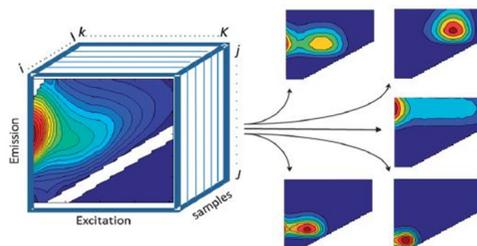
UV/Fluorescence

Others (main conventional water quality parameters)

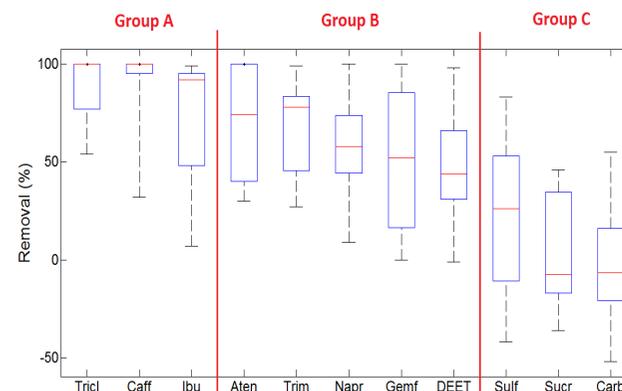


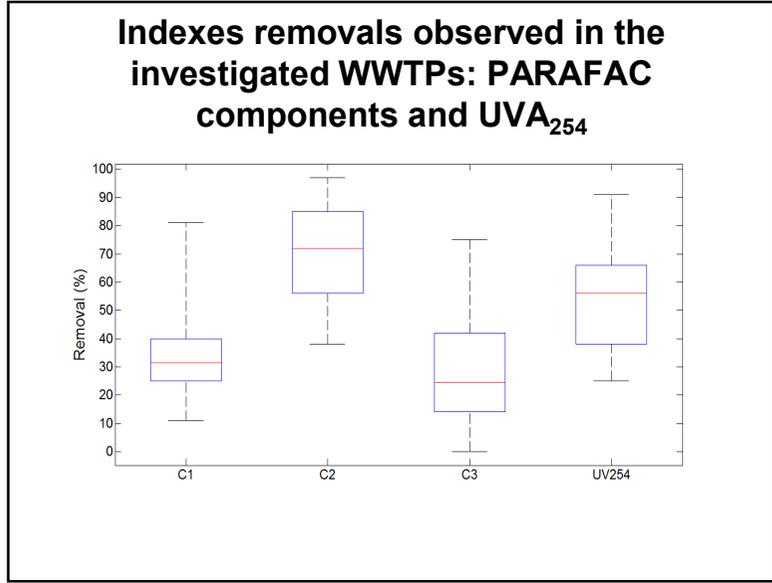
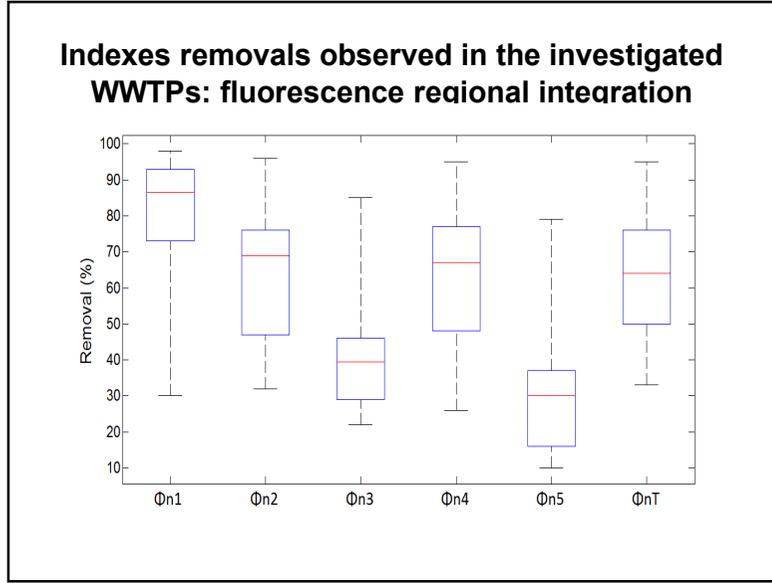
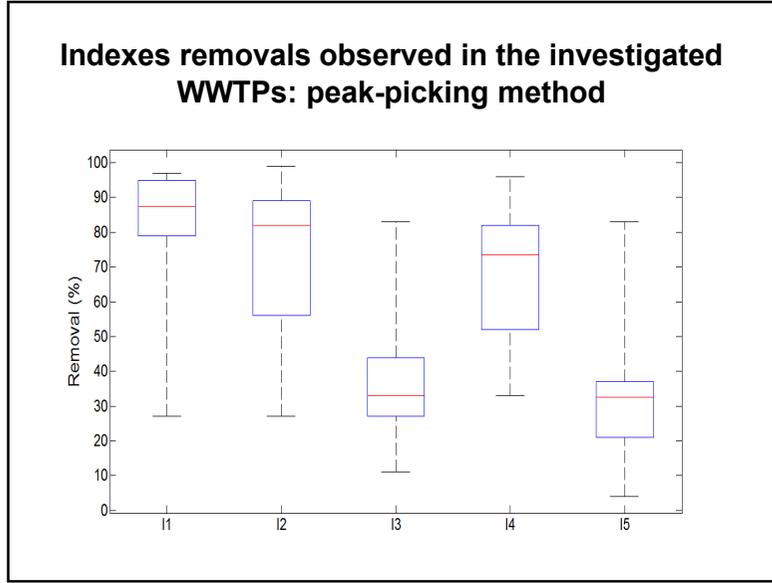
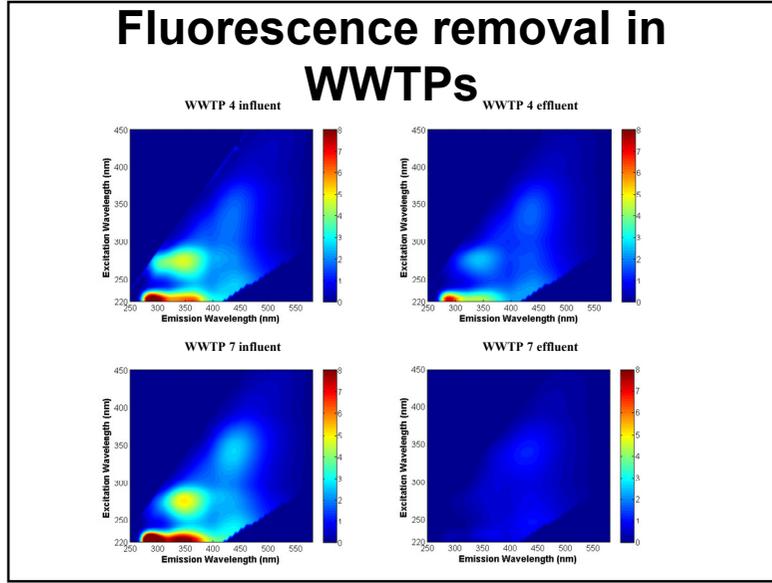
## PARAFAC

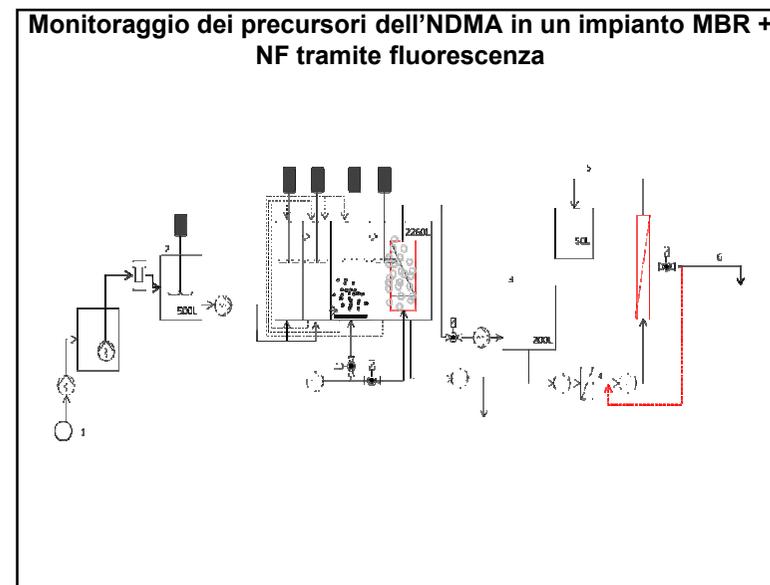
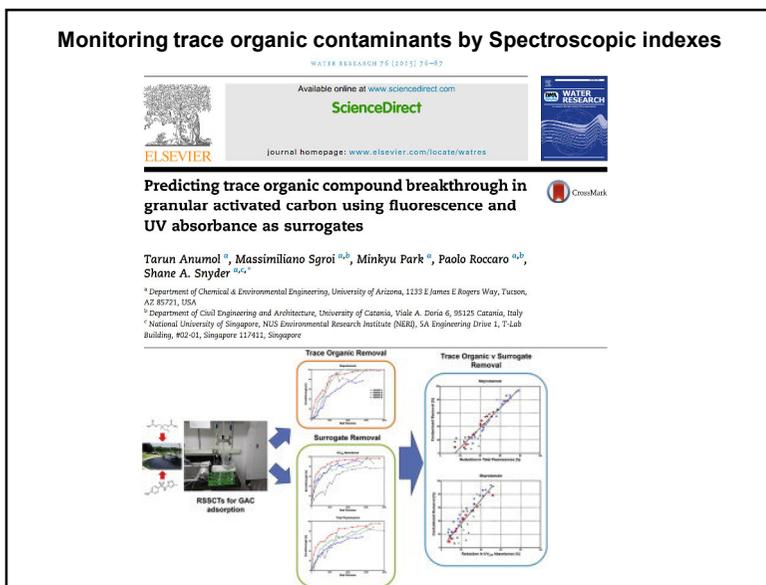
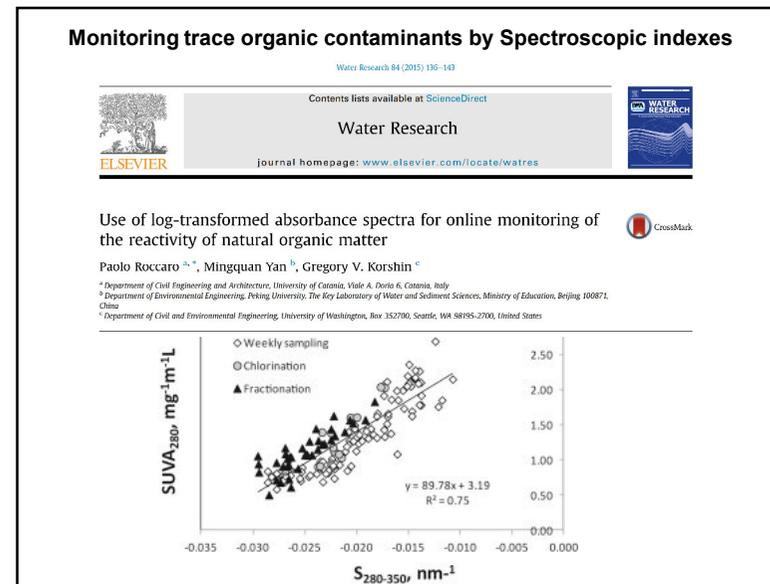
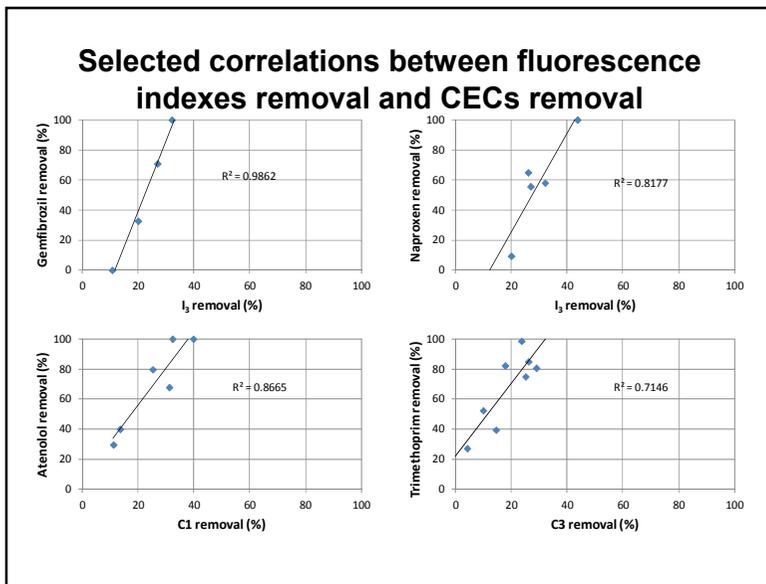
Il PARAFAC (PARallel analysis FACtor) è un modello implementato sulla piattaforma MATLAB che è in grado, a partire da una struttura di dati tridimensionale, di decomporre le matrici EEM in un numero variabile di componenti sottostanti che hanno significato chimico indipendente.



## CECs removals observed in the investigated WWTPs







### Take home message

- Confronto tra costi non agevole a causa dei molti fattori
  - schema d'impianto, tipologia di intervento (costruzione ex novo o adeguamento), spese per la progettazione, acquisto terreno, smaltimento del fango, etc.
- Costi MBR confrontabili con CAS in casi particolari
  - Necessità di trattamento a avanzato
  - Costo e disponibilità aree
  - MBR - incremento di costo capitale (membrane) e di gestione (energia) ma minore produzione di fanghi
- Monitoraggio real-time (indici spettroscopici)
  - controllo continuo, early warning, ottimizzazione processi
  - riduzione dei costi di monitoraggio (analisi convenzionali)