

Autori

Prof. Alessandro Antonio Porta – Politecnico di Milano

Ing. Roberto Vespa – MITAmbiente

Titolo

Analisi comparativa di tre metodi di rimozione del Cs-137 da percolato di discarica

1 Premessa

Questo lavoro svolto in collaborazione tra MITAmbiente e Politecnico di Milano vuole essere un'analisi comparativa delle varie tecniche attualmente disponibili o in fase di sperimentazione per la rimozione del cesio-137 dalle acque di percolazione di discarica.

La casistica prescelta trae spunto sia dalle peculiari caratteristiche radiologiche e chimico-fisiche del Cs-137 sia dalle occorrenze di eventi di contaminazione di corpi di discarica o terreni reperiti in letteratura.

Per analizzare il problema sono state considerate diverse metodiche e valutata la soluzione migliore in termini di processo e di risultato, considerando altresì la complessità chimica della matrice di partenza.

2 Il percolato

Le discariche sono strutturate con un basamento specifico per recuperare la componente liquida (percolato) che attraversa il corpo di coltivazione della discarica, e quindi i rifiuti, con la possibilità di portare in soluzioni contaminati di varia natura. Il percolato è originato principalmente dall'acqua piovana e in minor parte dai liquidi condensati già presenti nel rifiuto al momento della deposizione in discarica.

Tutti i liquidi percolanti captati dall'apposito sistema della discarica sono generalmente stoccati in cisterne o vasche situate sul sito della discarica in attesa di essere trattati e rilasciati in corpo idrico.

3 La chimica-fisica del cesio

Il cesio elemento chimico (numero atomico 55) appartenente al primo gruppo e sesto periodo.

È un metallo alcalino di colore argento-dorato, tenero e duttile, fonde ad una temperatura di poco superiore a quella ambiente (28,40°C).

È pericoloso nei mammiferi per la sua natura alcalina, appartiene infatti al primo gruppo come il sodio ed il potassio e ne condivide molte caratteristiche chimiche, seguendo dunque il metabolismo dei metalli alcalini viene bioaccumulato principalmente nei muscoli e in minor parte nello scheletro.

Il suo comportamento molto simile a sodio e potassio rende difficile la sua rimozione selettiva, soprattutto nel caso di acque altamente saline.

Le concentrazioni degli ioni Na⁺ e K⁺ in un percolato rappresentativo sono:

- **Sodio:** 40.920 mg/kg
- **Potassio:** 38.661 mg/kg

Il cesio è inoltre biologicamente incorporato lungo tutta la catena alimentare, nella carne, nei vegetali, nella frutta, nel latte ed altri alimenti derivati, comportando fattori di concentrazione di centinaia o migliaia di volte ad ogni passaggio di matrice.

Composti tipici utilizzati industrialmente includono: CsCl , Cs_2CO_3 , Cs_2O , CsOH , Cs_2SO_4 .

Gran parte dei composti del cesio sono solubili in acqua ma forme meno solubili o insolubili riguardano le particelle di fall-out o frammenti di combustibile irraggiato.

4 Rassegna dei metodi di rimozione

Nei paragrafi seguenti saranno illustrati e commentati i metodi proposti per la rimozione del cesio dalle acque percolate.

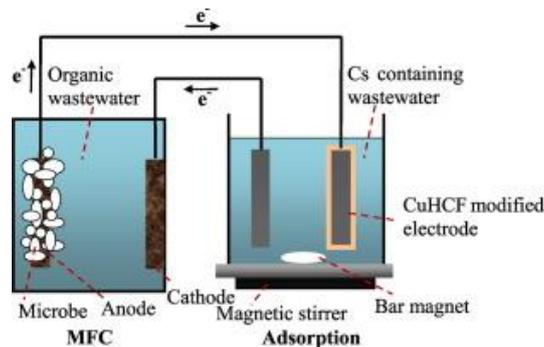
I metodi considerati sono:

- **1° metodo:** rimozione in cella galvanica con potenziale elettrico generato dal metabolismo biologico del BOD7
- **2° metodo:** adsorbimento su membrane di potassio rame esacianoferrato8
- **3° metodo:** rimozione selettiva del cesio attraverso l'utilizzo di microparticelle elettroattive.

1° metodo: rimozione in cella galvanica con potenziale elettrico generato dal metabolismo biologico del BOD7

Metodo

La rimozione del cesio si attua con uno specifico elettrodo selettivo in grado di favorire la riduzione del Cs rispetto ad altri ioni alcalini presenti in soluzione.



Schema delle celle galvaniche.

L'elettrodo modificato consiste in un elettrodo di grafite ricoperto da uno strato speciale, formato da uno ione complesso chiamato CuECF: rame(II) esacianoferrato(III):



Che è uno ione complesso molto semplice da produrre e stabile in un ampio range di pH.

Il problema principale del CuECF è che rappresenta un potenziale inquinante se disperso nelle acque, la sua dispersione però non è più rilevante se viene utilizzato come film sull'elettrodo invece che in forma polverosa come veniva usato in precedenza.

Uno degli aspetti innovativi di questa tecnica è l'utilizzo del COD (Chemical Oxygen Demand, Domanda Chimica di Ossigeno) per fornire l'energia necessaria al funzionamento della cella di assorbimento del cesio; infatti, si utilizza una tecnica detta Microbial Fuel Cell (MFC) che attraverso il metabolismo di specifici microrganismi converte la materia organica nell'elettricità usata dalla cella di rimozione del Cs. L'MFC è composto da due elettrodi di carbonio con una superficie attiva di 7cm² cad. a 0.5cm di distanza, uno dei quali è stato ricoperto dal biofilm elettrogeno mentre l'altro è stato avvolto da un filo di titanio. A causa della natura della membrana biologica il voltaggio massimo producibile dall'MFC è di circa 0.5V per cella, si utilizzano dunque più celle in serie per raggiungere voltaggi superiori.

Questa scelta è ottima nel caso di un refluo che presenta valori di BOD e COD consistenti come ad esempio:

- **BOD5:** 3232 mg/kg
- **COD:** 7723 mg/kg

La reazione RedOx che provoca l'assorbimento del cesio è:



Viene svolta in una cella elettrolitica tra due elettrodi delle dimensioni di: 1.5mm x 20mm x 20mm. L'anodo è di grafite mentre il catodo è di grafite ricoperto da CuECF.

Sono stati svolti alcuni test di prestazioni per verificare l'adsorbimento del cesio e per analizzare l'efficienza del rilascio nel processo di rigenerazione.

Durante i test è stato utilizzato per simulare l'inquinamento da cesio radioattivo il sale forte ¹³³CsNO₃ in concentrazione 20mg/L, mentre per la rigenerazione degli elettrodi è stata utilizzata una soluzione di cloruro di potassio 1 molare (74,55 g/L di KCl). La soluzione è stata continuamente agitata per garantire una composizione costante e l'analisi finale del contenuto di cesio si è svolta con uno spettrofotometro ad assorbimento atomico.

Risultati

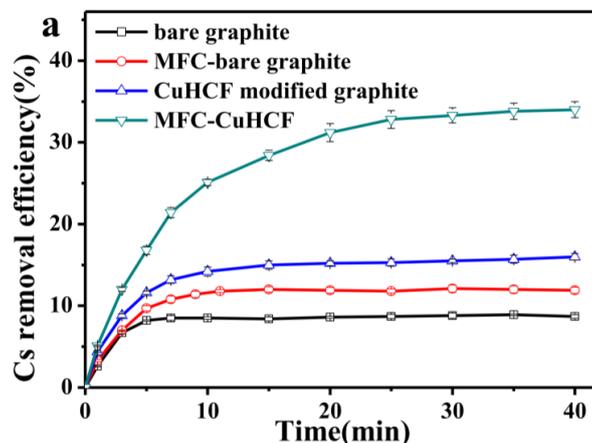
Il rapporto massimo di adsorbimento valutato come [Cs]/[Fe] sull'elettrodo modificato è risultato 0.26, che è un dato significativamente maggiore rispetto allo 0.073 ottenuto con l'utilizzo di CuECF in forma polverosa.

Specie	% Peso	% moli
C	20.58	42.75
N	15.34	27.33
O	5.27	8.21
Fe	18.40	8.22
Cu	28.84	11.32
Cs	11.56	2.17

Tabella 1. Composizione del rivestimento dell'elettrodo modificato dopo l'adsorbimento del cesio

Ci sono diversi fattori che possono modificare l'efficienza di rimozione del cesio e della rigenerazione degli elettrodi.

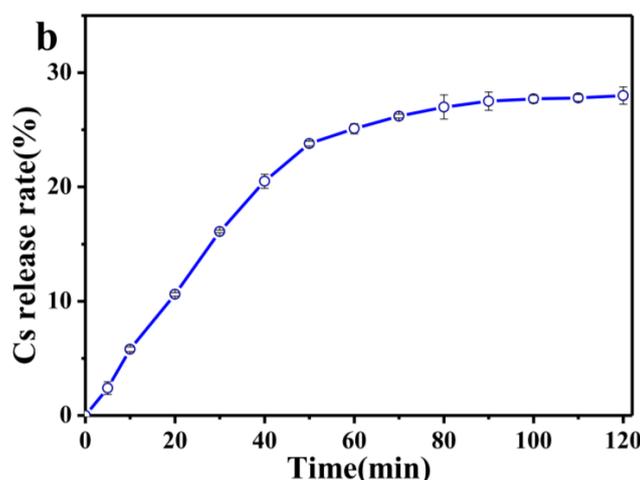
Durante i test la massima rimozione del cesio è risultata di poco superiore al 30%, secondo gli autori dell'articolo il problema potrebbe essere dovuto al basso potenziale fornito dal sistema MFC.



Paragone efficienza di rimozione del cesio con diversi accoppiamenti di celle e di elettrodi.

Per quanto riguarda la rimozione del Cs dall'elettrodo modificato, l'efficienza di rilascio con la tecnica utilizzata è risultata solo del 28%. Per la rimozione del cesio come per l'adsorbimento viene utilizzato il potenziale prodotto dal sistema di celle MFC che anche in questo caso è risultato troppo debole per garantire una buona rimozione, oltre a questo la rigenerazione consiste nel deadsorbire il cesio dall'elettrodo sostituendolo con il potassio nella soluzione di rigenerazione che è un processo sfavorito data la selettività del CuECF a legarsi preferibilmente con il cesio a discapito degli altri metalli alcalini.

L'efficienza di rimozione decresce con il tempo a causa dell'usura dell'elettrodo modificato che perde il rivestimento durante il processo di rigenerazione



Efficienza di rigenerazione dell'elettrodo modificato.

Conclusioni

È chiaro che questa tecnica sia ancora in uno stato acerbo di sviluppo, il metodo dovrebbe risultare molto più efficiente nella produzione di energia, rimozione del cesio e rigenerazione degli elettrodi per essere realmente considerato come applicabile come tecnica, sia per il caso specifico di Capriano ma naturalmente anche per ogni altra applicazione analoga.

Pro:

- Alta selettività dell'elettrodo che può garantire il funzionamento atteso anche in acque ricche di composti salini e di sostanze chimiche di svariate nature.
- Rimozione del carico inquinante del refluo attraverso i microrganismi elettrogeni.
- Autosufficienza energetica o nel caso in cui il COD non sia sufficiente si potrebbe comunque contare sull'MFC per diminuire la richiesta energetica.

Contro:

- L'efficienza di rimozione del cesio non è sufficientemente alta.
- L'utilizzo di colonie batteriche non è adatto a portate di refluo variabili, si avrebbe la morte di gran parte delle colonie durante i periodi di bassa affluenza e lunghi periodi di acclimatazione nei periodi di maggiore affluenza di refluo.
- L'efficienza di rigenerazione degli elettrodi è scarsa.

2° metodo: adsorbimento su membrane di potassio rame esacianoferrato

Metodo

Come nel metodo precedente, anche in questo caso, viene sfruttata la capacità chelante dello ione complesso: potassio rame esacianoferrato.

Il ligando esacianoferrato è in grado di essere complessato dal cesio e quindi adsorbirlo rimuovendolo dall'acqua.

Questo metodo è il frutto di test su vari tipi di membrane filtranti che ha mostrato come miglior candidato il potassio rame esacianoferrato (KCuECF) per la sua efficienza di rimozione e per la sua semplicità di sintesi.

Lo ione complesso è in grado di legarsi a diversi tipi di metalli ma nel caso sia già complessato dal rame la sua stericità si modifica e diventa preferenziale l'adsorbimento del cesio.

Per la filtrazione si usa una membrana detta ECF-PEI-rOG ovvero degli strati di grafite su cui è fissato lo ione complesso adsorbente, gli strati sono distanziati da frammenti del polimero PEI (polietilenimina) che garantisce lo spazio necessario a mantenere un alto flusso d'acqua e di conseguenza ad operare con una portata di refluo maggiore.

L'ossido di grafite (OG) viene prodotto con il metodo Hummers.

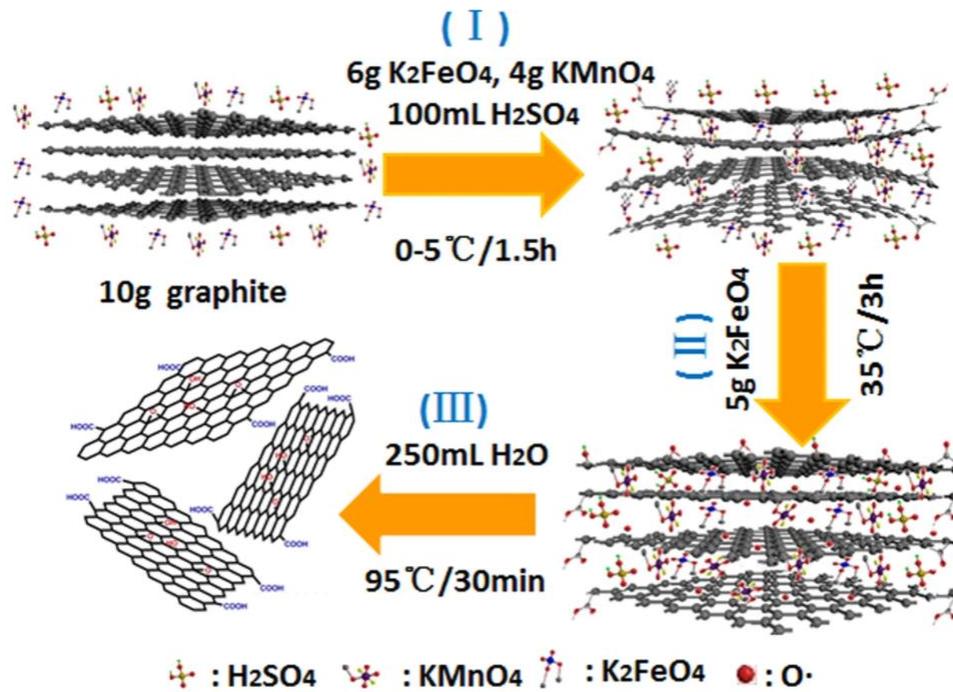
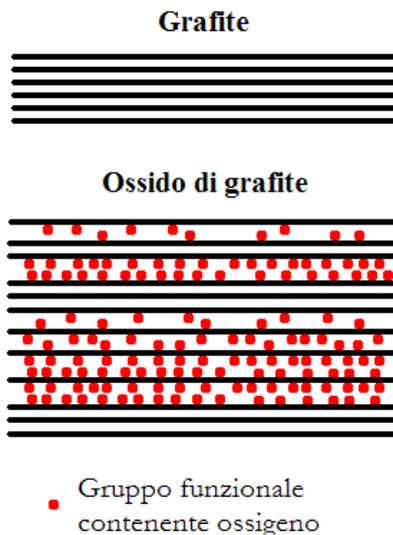


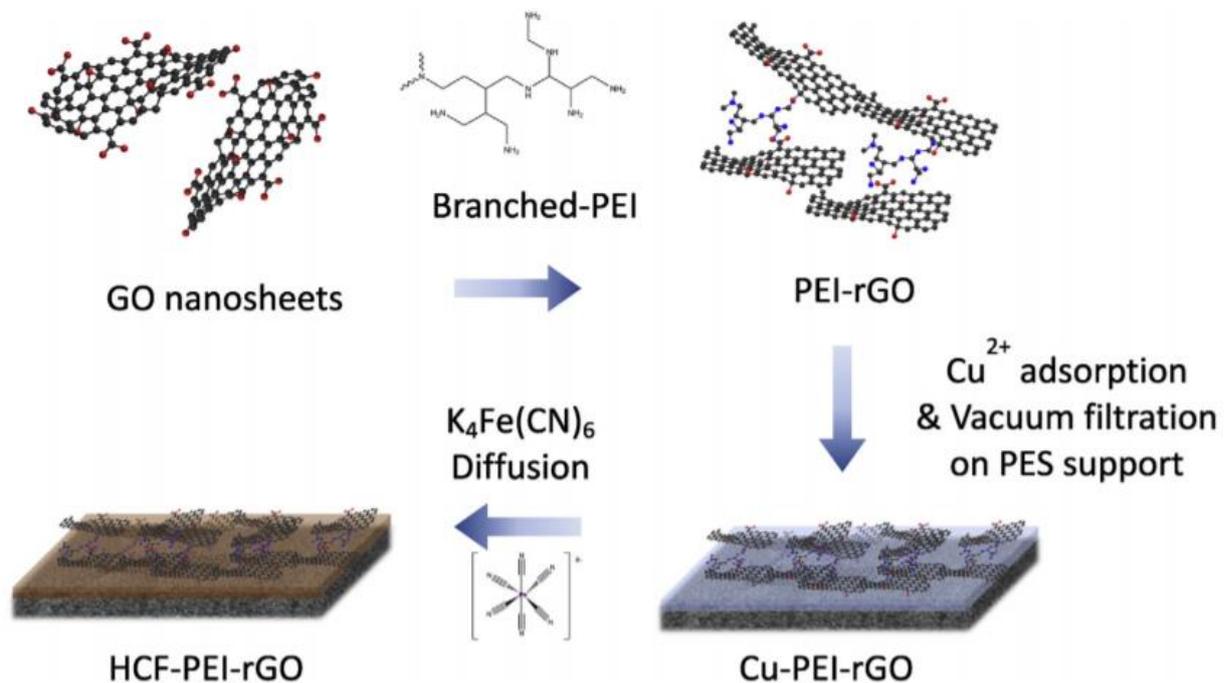
Illustrazione del metodo Hummers per la produzione di ossido di grafite.

L'ossido di grafite è un composto simile alla grafite dove però sono presenti alcuni gruppi funzionali contenenti ossigeno che distanziano i fogli.



Confronto strutturale Grafite - Ossido di Grafite (OG)

Sui gruppi sostituenti legati ai fogli di grafite vengono inseriti dei frammenti di PEI in condizioni alcaline ed in fine aggiunto il rame e il ligando esacianoferrato. In base alla quantità in milligrammi di ECF-PEIrOG depositato sulla base di PES (polietersulfone) le membrane prendono il nome di ECF-PEI-rOG-0.5, ECF-PEI-rOG-1 e ECF-PEI-rOG-2.



Schema di produzione della membrana ECF-PEI-rOG.

Per i test è stata utilizzata una membrana di 7.065 cm^2 , l'esperimento si è svolto alla pressione di 1 bar ed è stato utilizzato come rilevatore della concentrazione del Cs un sistema ICP-MS ovvero uno spettrometro di massa dove lo ionizzatore è una torcia di argon ionizzato.

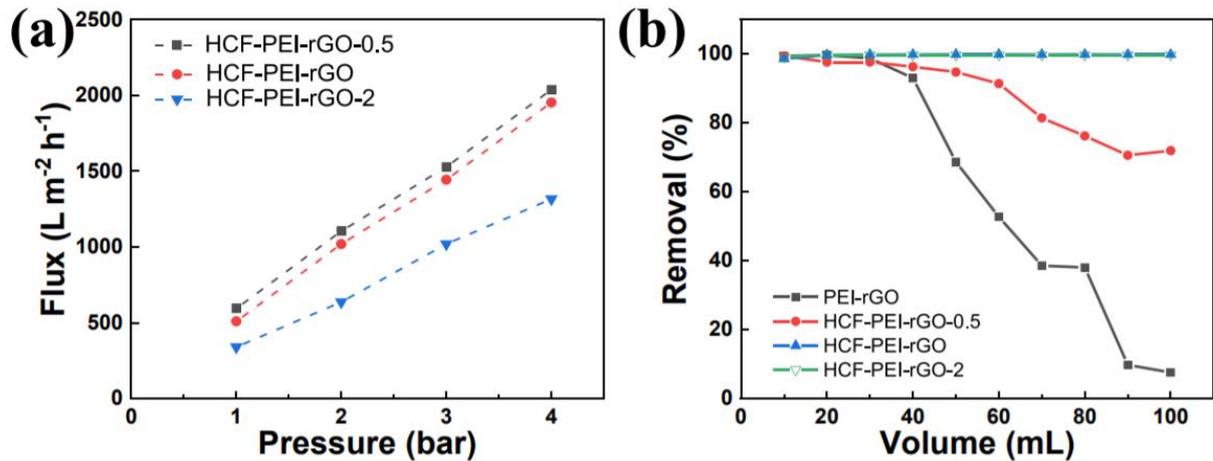
Risultati

Prima dei test di rimozione del cesio sono state svolte alcune prove sulla permeabilità della membrana con acqua distillata, come è visibile in figura (a) la portata a pressione atmosferica nel caso 0.5 è di poco inferiore a $600 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$, e come era facilmente prevedibile la portata aumenta con la pressione e diminuisce con la quantità di substrato adsorbente depositata.

È importante notare che la portata specifica di queste membrane è sensibilmente maggiore rispetto alle portate specifiche di membrane di nanofiltrazione o ad osmosi inversa⁹ che sono inferiori a $100 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$.

L'adsorbimento del cesio è stato valutato misurando la concentrazione nel permeato raccolto ad intervalli regolari, la matrice preparata per la filtrazione consisteva in una soluzione di cloruro di cesio $^{133}\text{CsCl}$ in concentrazione 1ppm.

Durante le analisi si è notato come il solo substrato PEI-rOG sia in grado inizialmente di filtrare la matrice inquinata (b), una capacità che perde dopo pochi mL di filtrato dato che non è comunque in grado di ritenere il metallo. ECF-PEI-rOG-0.5 ha garantito una rimozione inferiore all'80% a causa dello scarso contatto tra il Cs^+ e le molecole di ione complesso presenti sulla membrana filtrante in piccole quantità, forse diminuendo il flusso di permeato attraverso la membrana le prestazioni del ECF-PEI-rOG-0.5 sarebbero potute aumentare. ECF-PEI-rOG-1 e ECF-PEI-rOG-2 sono risultati molto efficienti rimuovendo più del 99% del Cs^+ nella soluzione da 100 mL.



(a) permeabilità delle membrane; (b) efficienza di rimozione

Circa 130 mg di Cs possono essere rimossi da 1m² di membrana, ed è un ottimo risultato per ridurre il volume del rifiuto contaminato.

Questa tecnica presenta però un problema, ovvero la rimozione del cesio adsorbito sulla membrana, non è risultato infatti semplice la rigenerazione.

Per determinare gli effetti della selettività di adsorbimento della membrana sono state preparate alcune soluzioni contenenti 1ppm di Cs⁺ e alte concentrazioni si K⁺, Na⁺ e Ca²⁺.

Com'è visibile nella figura sono riportati i risultati dell'adsorbimento competitivo tra gli ioni metalli ci e si nota come vari l'efficienza a seconda della quantità e tipologia di metallo aggiunta.

Con una soluzione di sodio 1 molare (22,93 g/L) l'efficienza di rimozione del Cs è scesa all'89%, con una soluzione di calcio 1 molare (40,08 g/L) l'efficienza di rimozione del Cs è invece scesa al 92%, questi risultati sono logici dato che la dimensione deli rispettivi ioni idrati sono molto maggiori rispetto al Cs⁺.

È invece risultata significativa la riduzione di selettività con l'aggiunta di una soluzione concentrata di potassio¹⁰.

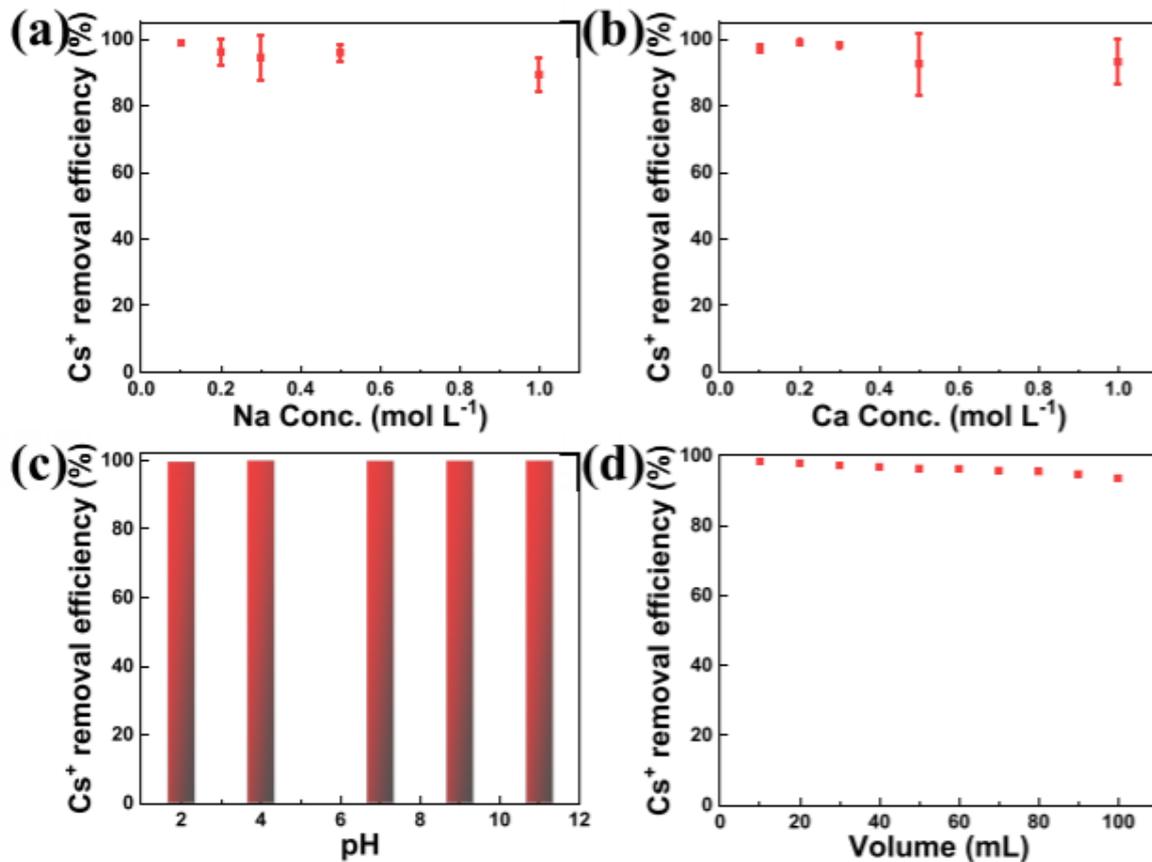
È stato analizzato anche l'adsorbimento in un range di valori di pH tra il 2 e il 12 per poter garantire l'efficienza a diverse condizioni di acidità/basicità.

La membrana si è dimostrata prestante mantenendo sempre un'efficienza di rimozione attorno al 98%, per l'acidificazione si è utilizzato acido cloridrico mentre per la basificazione idrossido di sodio, pur essendo presente lo ione sodio durante i test in condizioni basiche non si è riscontrata una diminuzione dell'efficienza.

Per la valutazione dell'efficienza anche in soluzioni saline composte da diversi sali disciolti è stata svolta un'analisi con una soluzione composta da:

Na⁺=146 ppm, K⁺=6 ppm, Mg²⁺=21 ppm e Ca²⁺= 5 ppm.

Si nota (figura (d)) come l'efficienza diminuisce con il volume di filtrato.



Efficienza di rimozione del Cs in (a) soluzione di sodio, (b) soluzione di calcio, (c) diverse condizioni di pH, (d) soluzione salina.

Conclusioni

Questa tecnica risulta essere molto promettente data l'elevatissima efficienza di rimozione ma soprattutto dalla riduzione volumetrica del refluo; infatti, questa tecnica riuscirebbe teoricamente a ridurre il volume della totalità del percolato a pochi litri.

Pro:

- Elevata efficienza di rimozione del ¹³⁷Cs.
- Elevata riduzione volumetrica del rifiuto radioattivo.
- Portata volumetrica elaborata molto superiore ad altre tecniche di filtraggio.

Contro:

- Il metodo è sensibile alla salinità delle acque trattate.
- Il metodo è sensibile ai solidi sospesi che aumentano (anche in maniera significativa) le perdite di carico attraverso la membrana.
- Complessità nella produzione della membrana filtrante.
- Difficoltà nella rigenerazione della membrana filtrante.

3° metodo: rimozione selettiva del cesio attraverso l'utilizzo di microparticelle elettroattive

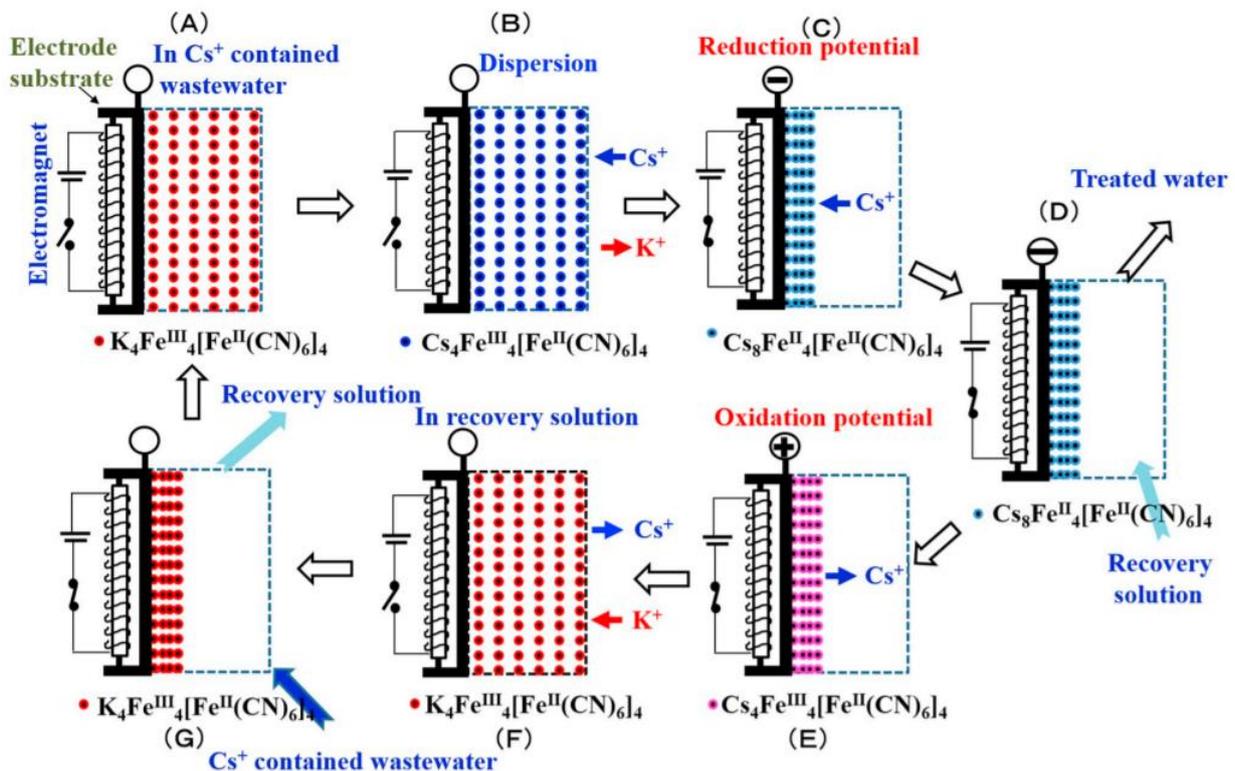
Metodo

Il metodo in questione si differenzia dai precedenti per la natura della componente adsorbente, in questo caso infatti la specie chelante Blu di Prussia è dispersa all'interno della fase liquida. Come è stato visto in precedenza le piccole dimensioni del chelante esacianoferrato e la sua affinità con l'acqua lo rendono un potenziale inquinante difficile da rimuovere nella matrice liquida, per questo motivo in questo caso si utilizzano delle microparticelle magnetiche su cui è depositato un substrato adsorbente in modo da poterlo rimuovere completamente dall'acqua attraverso l'utilizzo di un'elettrocalamita.

Precisamente si utilizzano delle particelle di magnetite (ossido ferroso e ossido ferrico) con sopra depositato il chelante; la magnetite è il materiale presente in natura con grandi proprietà magnetiche ed è producibile con il metodo Schikorr:



La vasca dove avviene l'adsorbimento è costituita da un elettrodo che può essere caricato con potenziale ossidante (+) o riducente (-), l'elettrodo è poi collegato da un elettromagnete in modo da poter attirare a se le particelle di magnetite.



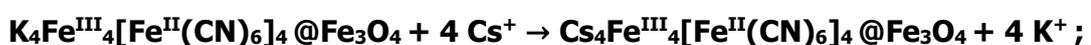
Schema di funzionamento del metodo.

Il funzionamento è illustrato chiaramente nella figura.

a) Vengono disperse nel refluo le particelle magnetite con adsorbito il Blu di Prussia:



b) Avviene la reazione di rilascio del potassio e adsorbimento del Cs⁺:



- c) Chiudendo il circuito l'elettromagnete attira le particelle con il cesio adsorbito, viene applicato un potenziale negativo che riduce il ferro ferrico a ferro ferroso:

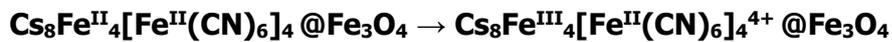


Ora le molecole cariche negativamente sono in grado di adsorbire altro cesio.

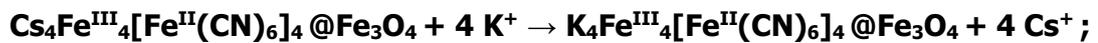


Potenzialmente ogni mole di ligando è in grado di complessare otto moli di Cs^+

- d) Ora la soluzione liquida viene sostituita con una soluzione ricca di K^+ , la soluzione ricca di potassio servirà a rigenerare l'elettrodo e ci verranno riversati gli ioni $^{137}\text{Cs}^+$ adsorbiti in precedenza
- e) Il potenziale dell'elettrodo si inverte e diventa positivo, favorisce l'ossidazione del ferro ferroso che diventa ferro ferrico, in questo modo il chelante rilascia quattro moli di Cs^+ .



- f) Ora l'elettromagnete viene spento e in questo modo le particelle si possono disperdere nella fase liquida, qui avviene lo scambio con la soluzione di potassio.



- g) Per finire viene ricaricata la matrice contaminata da cesio, naturalmente durante questo passaggio l'elettromagnete viene attivato, in questo modo si trattengono nella vasca le particelle adsorbenti.

Le particelle sono completamente rinnovabili, in grado di deadsorbire gran parte del cesio, questo le rende riutilizzabili per molti cicli.

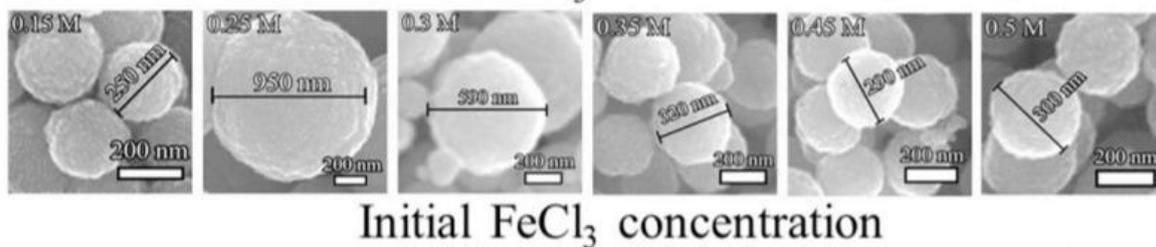
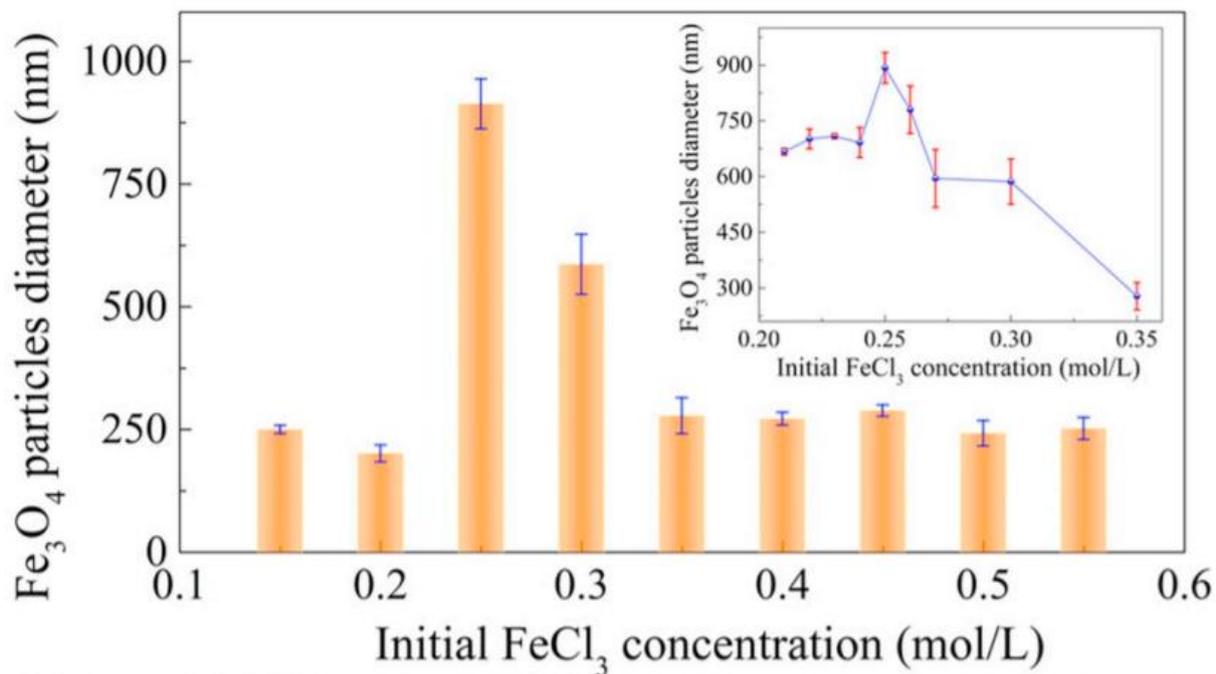
Le particelle utilizzate nei primi test erano nanosfere con un diametro di 34-36 nm, successivamente si sono utilizzate nanosfere con un diametro di 300-900nm.

Le particelle più piccole sono risultate più efficienti nell'adsorbimento, dovuto probabilmente al rapporto maggiore di superficie adsorbente per unità di volume della vasca, ma per praticità nella produzione e anche per evitare che alcune di questa possano non essere catturate dall'elettromagnete, e in questo modo rimanere nella soluzione, le particelle più grosse rappresentano una validissima alternativa.

La produzione delle sfere si svolge secondo il seguente metodo:

Una specifica quantità di cloruro ferrico va mischiata con 0,2 grammi di citrato di sodio trisodico in 20mL di glicole etilenico, dopo 30 minuti di agitazione vanno aggiunti 2g di acetato di sodio ed in fine agitato per altri 30 minuti e 12 ore di autoclave a 200°C.

La dimensione finale delle nanosfere di magnetite è dipendente dalla concentrazione iniziale di FeCl_3 (cloruro ferrico) che viene utilizzato per la sintesi, come illustrato nella figura.



Dipendenza del diametro delle particelle di magnetite dalla concentrazione iniziale di cloruro ferrico.

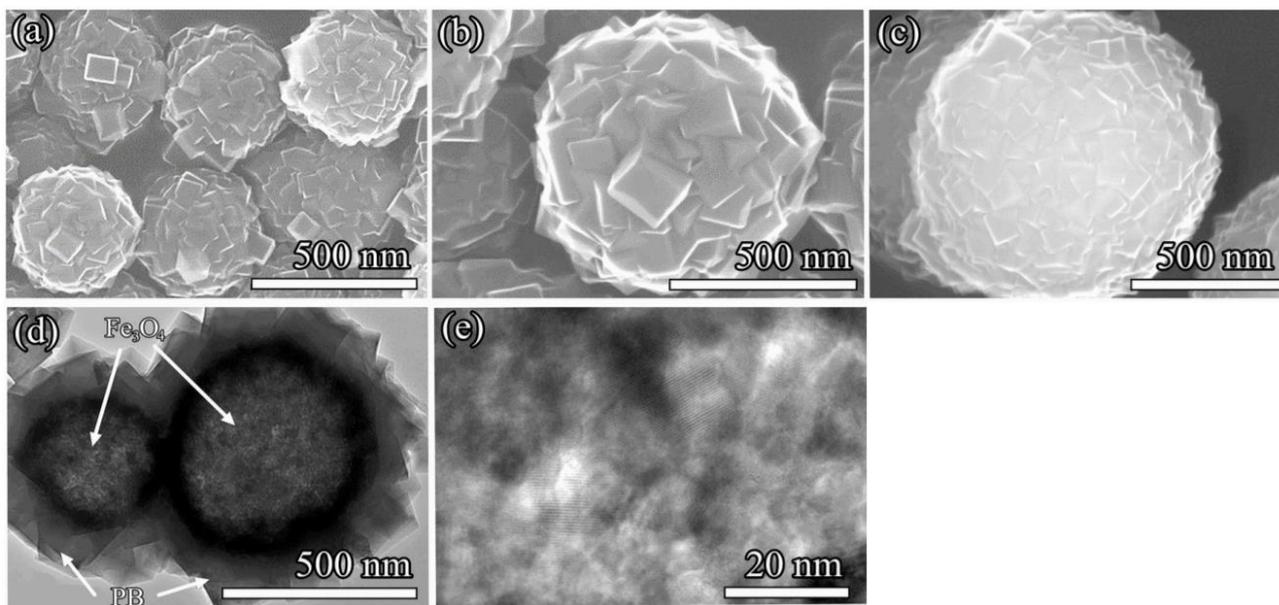


Immagine delle nanosfere adsorbenti catturate da un microscopio elettronico a scansione.

Come è visibile nella figura le particelle di magnetite sono tutte ricoperte in modo omogeneo dal complesso adsorbente; infatti, lo ione complesso ha una struttura cristallina cubica ed è facilmente riconoscibile.

Risultati

Per i test di funzionamento e delle prestazioni di questo metodo è stato utilizzato il ^{133}Cs , l'isotopo non radioattivo del cesio che, pur avendo un numero di massa differente, conserva tutte le proprietà chimiche del ^{137}Cs ed i risultati sono perfettamente analoghi.

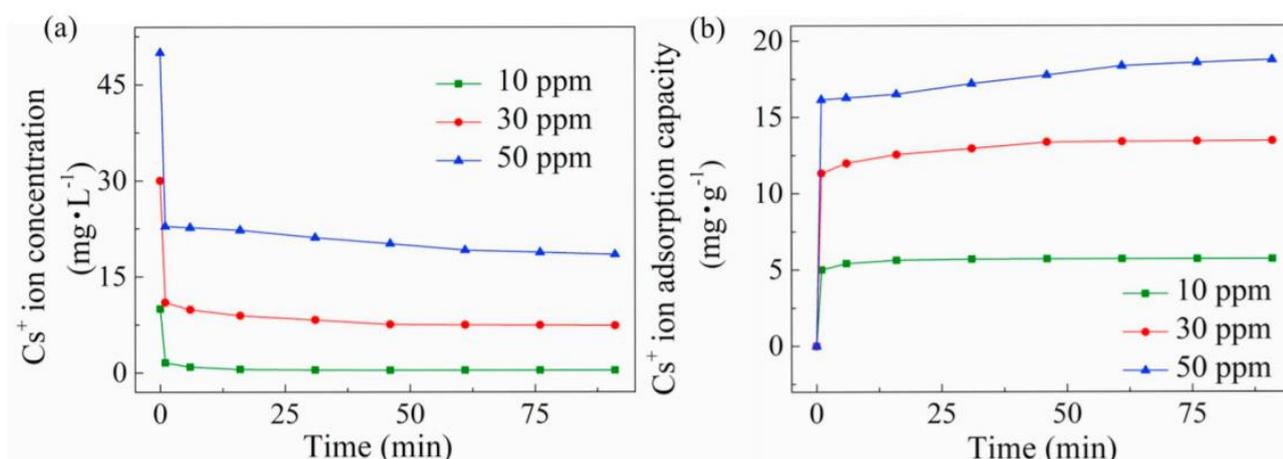
Nello specifico sono state utilizzate diverse concentrazioni iniziali di cesio: una soluzione a 10 ppm di cesio (0.014 g/L di $^{133}\text{CsNO}_3$), una soluzione a 30 ppm di cesio (0.044 g/L di $^{133}\text{CsNO}_3$) e una soluzione a 50 ppm di cesio (0.073 g/L di $^{133}\text{CsNO}_3$).

L'adsorbimento del cesio è stato testato con 50 mL della soluzione contenente l'inquinante in una vasca con tre elettrodi speciali (elettrodo-elettromagnete), sugli elettrodi invece è stata utilizzato un potenziale elettrico di 0,3 V in modo da garantire l'ossidazione e riduzione degli ioni complessi.

Tutte le analisi si sono svolte a temperatura ambiente.

Per l'analisi del contenuto finale di cesio si è utilizzata la cromatografia IC (cromatografia ionica).

Nella figura è visibile (a) il quantitativo di cesio rimosso nel tempo, la rimozione avviene principalmente nei primi minuti; infatti, il 97% del cesio viene adsorbito ed allontanato nei primi 10 minuti.



Efficienza di rimozione del cesio del 3° metodo.

La tecnica non risulta però molto efficiente sotto l'aspetto di mg di cesio adsorbiti per unità di massa delle microparticelle, per l'esattezza ogni grammo di microparticelle è in grado di adsorbire 16,13 mg di Cs⁺, questo nel caso in cui la soluzione utilizzata fosse a 50 ppm, naturalmente il dato diminuisce nel caso di 30 ppm e 10 ppm.

Adsorbent	Experiments method	Adsorption capacity	Removal efficiency	Adsorption time	Reference
PB/Fe ₃ O ₄ /GO nanocomposites	Adsorption	43.52 mg/g	80%	120 min	Yang et al. (2014a)
PB/Fe ₃ O ₄ /GO nanocomposites	Adsorption	55.56 mg/g	70.25%	30 min	Yang et al. (2014b)
Organic-inorganic adsorbent	Adsorption	97.63 mg/g	89%	35 min	Awual et al. (2016)
Modified conjugate adsorbent	Adsorption	65.06 mg/g	81%	30 min	Imanishi et al. (1999)
Conjugate adsorbents	Adsorption	50.23 mg/g	85%	40 min	Nie et al. (2017)
PB@Fe ₃ O ₄ microparticles	Electrochemical adsorption	16.13 mg/g	97%	10 min	This work

Paragone con altre tecniche di rimozione del cesio.

La cinetica dell'adsorbimento è ben rappresentata considerando l'adsorbimento del cesio sull'elettrodo carico come RDS (Rate Determining Step, stadio lento del meccanismo). La formula adottata è:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{K_2 q_e^2}$$

Equazione cinetica. q_t è il Cs^+ adsorbito in mg/g; q_e è il Cs^+ massimo che può essere adsorbito all'equilibrio;

K_2 è la costante cinetica; t è il tempo in minuti

Per analizzare la selettività del metodo, in modo da garantire le prestazioni anche in reflui composti da molte specie ioniche disciolte differenti, la tecnica è stata applicata ad una soluzione di 50 mL contenente 10 ppm di Li^+ , 10 ppm di K^+ , 10 ppm di Na^+ e 10 ppm di $^{133}\text{Cs}^+$. Le condizioni di temperatura e il potenziale applicato all'elettrodo per garantire le ossidazioni e riduzioni, anche in questo caso di analisi della selettività, erano identiche al caso di analisi di efficienza della tecnica senza competizione.

Come è visibile nella figura l'efficienza di rimozione non è variata; infatti, al termine dell'operazione il Cs^+ era presente per 0,3 ppm, questo significa un'efficienza del 97% e dunque un'alta selettività.

È riscontrabile anche:

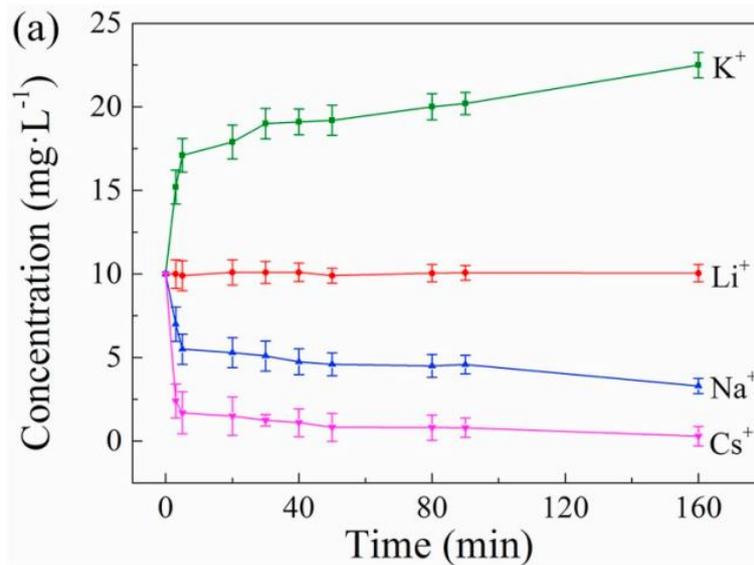
Una diminuzione della concentrazione degli ioni di sodio che è scesa da 10 ppm fin sotto i 5 ppm;
Un aumento degli ioni potassio, com'era prevedibile, dato che il cesio adsorbito sostituisce il potassio negli ioni complessi.

Tuttavia, il potassio aumenta per una quantità maggiore di moli rispetto al Cs estratto e non in rapporto stechiometrico, questo è dovuto ai lavaggi con la soluzione rigenerante ricca di K^+ che lasciano alcuni residui.

Infatti, vengono estratti circa 9,7 milligrammi di cesio ovvero 7.298×10^{-5} moli, ma il potassio non aumenta di questo quantitativo, bensì di 3.197×10^{-4} moli (12,5 mg).

In fine gli ioni di litio, il quantitativo di Li^+ risultato dalle analisi è rimasto circa costante durante il test, anche questo era prevedibile dall'analisi delle dimensioni degli ioni idrati.

Le dimensioni infatti sono K^+ (2.01 Å) < Na^+ (2.76 Å) < Cs^+ (3.25 Å) < Li^+ (3.4 Å), questo esclude il lito nella competizione, infatti le sue dimensioni, superiori agli altri ioni, non gli consentono di complessare il substrato adsorbente.



Competizione della tecnica tra specie ioniche di metalli alcalini.

Conclusioni

Il metodo si è rivelato molto efficace per la rimozione delle tracce di cesio nelle acque reflue, oltre all'altissima percentuale di rimozione del 97% questa tecnica è risultata performante in quanto riesce a raggiungere questo risultato in tempi molto brevi (circa 10 minuti).

La tecnica quindi in generale risulta efficace e abbastanza economica; infatti, la componente più costosa usata nel processo sono le nanosfere ricoperte di adsorbente che però risultano facilmente riciclabili.

Questa tecnica per il funzionamento richiede il consumo di energia elettrica per il funzionamento dell'elettrocalamita-elettrodo e cloruro di potassio per produrre la soluzione rigenerante.

Pro:

- Selettività.
- Efficienza.
- Tempo di contatto.
- Economicità di gestione.

Contro:

- Poco sensibile alla presenza di ioni di Na⁺.
- Costo di produzione del materiale adsorbente magnetico, spesa che comunque dev'essere fatta solo nella fase iniziale di costruzione.