

Anche le discariche possono essere sostenibili

Raffaello Cossu

Prima di valutare la sostenibilità di una discarica controllata occorre dire quale definizione di sostenibilità ambientale adottare per una discarica. Una possibile risposta sta nell'utilizzo del bilancio di massa (calcolato per carbonio ed azoto quali principali componenti da controllare) che consente di valutare le diverse alternative impiantistiche ed operative atte a garantire il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale in un tempo prefissato.

Mettere in pratica il principio della sostenibilità ambientale rappresenta uno dei principali obiettivi dell'attività scientifica, svolta negli anni più recenti, sulla discarica controllata.

Molti aspetti, insieme tecnici e legali, devono essere affrontati. Queste le domande che attendono risposta:

- Quale definizione di sostenibilità ambientale adottare per una discarica?
- Come definire gli obiettivi di qualità finale della discarica sostenibili per l'ambiente?
- Quali tecnologie od accorgimenti adottare per raggiungere la sostenibilità ambientale?
- Quali modifiche/integrazioni sono necessarie a livello normativo per rendere operativo il criterio della sostenibilità ambientale?
- Quale responsabilità economica e legale rimane a carico del gestore di una discarica?

Un utile strumento per implementare il criterio della sostenibilità ambientale e per definire le conseguenti scelte progettuali e gestionali è il bilancio di massa, calcolato per le principali componenti da controllare (carbonio ed azoto). Attraverso il bilancio di massa è possibile valutare le diverse alternative impiantistiche ed operative atte a garantire il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale in un tempo prefissato.

Qualità dei rifiuti e bilancio di massa

Sulla base della Figura 1, in una discarica si può, per una data sostanza, definire un bilancio di massa tra il carico in ingresso associato ai rifiuti, il carico in uscita associato al gas, al percolato raccolto e alle sostanze che si degradano e il carico trattenuto dai sistemi di impermeabilizzazione. La differenza tra carico in ingresso, carico in uscita e carico trattenuto, rappresenta il carico che si disperde verso l'ambiente, connesso alla diffusione incontrollata di percolato e biogas.

Tra le sostanze di maggiore interesse ambientale da tenere sotto controllo rientrano il carbonio e l'azoto, entrambi associati alla sostanza organica contenuta nei rifiuti. Quest'ultima è presente in quantità e forme che differiscono tra diverse realtà socioeconomiche e geografiche. Per esempio, nei paesi in via di sviluppo la sostanza organica putrescibile può raggiungere l'80% in peso dei rifiuti, con scarsa presenza di plastica e di carta mentre in una città europea la sostanza organica putrescibile può scendere al di sotto del 20% con una superiore presenza delle altre componenti merceologiche. In termini generali la quantità di carbonio mediamente presente in un rifiuto europeo è valutabile intorno al 20-25% [1], distribuita tra le diverse componenti merceologiche organiche indicate in Tabella 1.

Figura 1. Flussi di massa in ingresso ed in uscita da una discarica.

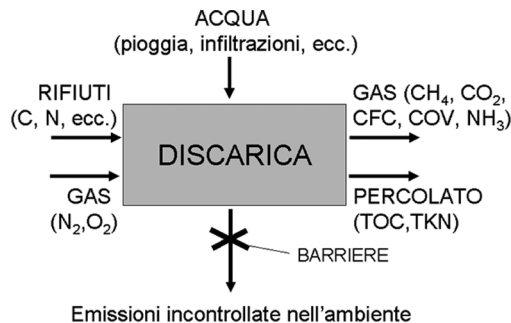


Tabella 1.
Composizione media di un generico rifiuto europeo, espressa come percentuale dei Solidi Totali [1-7].

Componente	%
<i>Sostanze organiche</i>	
Lignina	6
Emicellulosa	7
Proteine	3
Additivi carta (organico+inorganico)	8
Cellulosa	16
Idrocarburi	9
Grassi, resine, cere	2
Plastica	18
<i>Sostanze inorganiche</i>	
Additivi plastica	3
Minerali	13
Ceneri	4
Sostanze pericolose	1
Metalli	10

Da un punto di vista della mobilità nella composizione dei rifiuti si possono distinguere due diverse frazioni di sostanza organica:

- x_s = frazione solida non mobilizzabile (non solubile, non degradabile);
- s_s = frazione solida mobilizzabile.

La frazione mobilizzabile del carbonio, per lisciviazione, per biodegradazione o altre reazioni, si trasferisce dal solido al liquido (s_L = frazione lisciviata) o alla fase gas (s_G = frazione gasificata) o si trasforma in forme solide non mobilizzabili che vanno ad incrementare la frazione x_s .

Un discorso analogo si può fare per qualsiasi altro elemento, come l'azoto o i metalli pesanti.

Assumendo che la discarica si comporti come un reattore completamente miscelato CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), con l'assunzione quindi che la concentrazione di una data sostanza sia sempre uniformemente distribuita nel volume del reattore, l'equazione del bilancio di massa può essere concettualmente rappresentata come segue:

$$\text{accumulo} = \text{ingresso} - \text{uscita} \pm \text{reazione} \quad (1)$$

Il termine *ingresso* indica la massa di una data sostanza (es. carbonio, azoto) che entra in un dato tempo nella discarica di volume V , associata sostanzialmente ai rifiuti conferiti. Se si considerano " n " flussi di " i " tipologie di rifiuto con portata Q_i (t/anno), ciascuna di esse con diverse concentrazioni della data sostanza (ad esempio carbonio) nella fase solida, differenziata nelle due forme prima viste (non mobilizzabile x_{si} e mobilizzabile s_{si}) misurate, ad esempio, in g/t di rifiuto, l'*ingresso* può essere così espresso:

$$\text{Ingresso} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot (x_{si} + s_{si}) \quad (2)$$

Il termine *uscita* nell'equazione (1) rappresenta la massa uscente dalla discarica associata alle portate di biogas (q_G , Nm³/anno) e di percolato (q_L , m³/anno). Se le concentrazioni del carbonio nel biogas (CO₂, metano, ecc.) e nel percolato (TOC) sono rispettivamente s_G (mg/Nm³) e s_L (mg/l), si ha:

$$\text{Uscita} = s_L \cdot q_L + s_G \cdot q_G \quad (3)$$

Distinguendo le frazioni di percolato e di biogas che vengono raccolte (q_{Lc} e q_{Gc}) da quelle che si disperdono in modo incontrollato attraverso le barriere del sistema discarica (q_{Ld} e q_{Gd}), si può scrivere:

$$q_L = q_{Lc} + q_{Ld} \quad \text{e} \quad q_G = q_{Gc} + q_{Gd} \quad (4)$$

Il termine di accumulo, che rappresenta l'incremento di massa (m) nel sistema discarica nel tempo (t), espresso come dm/dt , ha un valore positivo e crescente nel corso del deposito dei rifiuti in discarica e diventa zero, a discarica esaurita.

Il termine *reazione* nell'equazione (1) rappresenta la massa di sostanza organica che si mineralizza o comunque stabilizza a seguito dello svolgersi delle reazioni di degradazione biologica o di rimozione chimico-fisica (precipitazione, adsorbimento, complessazione, ecc.) e può essere rappresentata tramite una cinetica di ordine zero o di primo ordine (con r espresso, ad es., in $g/m^3 \cdot anno$):

$$Reazione = r \cdot V \quad (5)$$

Le reazioni possono avvenire in un ambiente anaerobico, con formazione di CH_4 e CO_2 (tipico biogas da discarica) o in condizioni aerobiche con ingresso di aria e formazione di gas contenente principalmente N_2 e CO_2 .

Le velocità in ambiente aerobico sono indicativamente di un ordine di grandezza superiori a quelle in ambiente anaerobico.

I diversi termini del bilancio, appena definiti, sono rappresentati graficamente, per il Carbonio, in Figura 2.

Il reattore discarica può concettualmente essere diviso in tre reattori in cascata, uno per ciascuna fase della vita della discarica. All'interno di ciascun reattore si possono considerare due parti una reattiva, nella quale si svolgono le reazioni di degradazione e di stabilizzazione dei rifiuti, ed un'altra dove si accumula la frazione solida non mobilizzabile, come schematizzato in Figura 3.

Considerando la parte reattiva del reattore si può rappresentare il bilancio come segue:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot (x_{Si} + s_{Si}) - s_L \cdot q_L - s_G q_G - rV - s_S Q_S - \sum_{i=1}^n Q_i \cdot x_{Si} \quad (6)$$

Il termine ($s_S Q_S$), dove s_S è la concentrazione di carbonio mobilizzabile nei rifiuti presenti in discarica in quantità Q_S , indica la quantità residua di carbonio

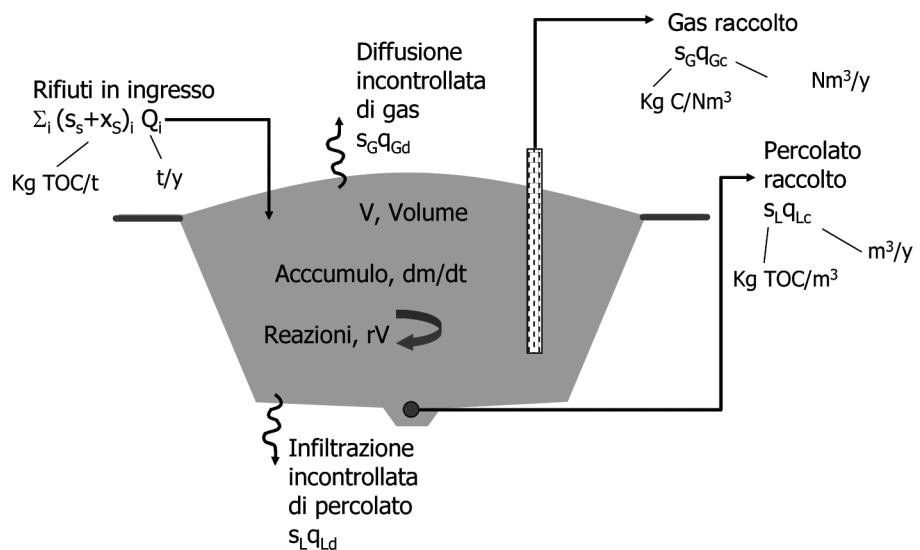
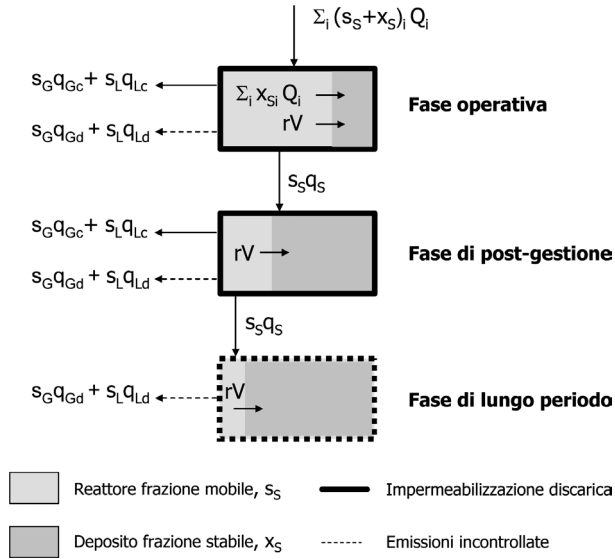


Figura 2.
Rappresentazione grafica dei termini del bilancio di massa applicato ad una discarica.

Figura 3.
Rappresentazione grafica della schematizzazione del reattore discarica in una serie di reattori in cascata, ciascuno corrispondente alle diverse fasi di vita di una discarica.



mobilizzabile presente nei rifiuti ed è indicativa del potenziale di emissione di carbonio del sistema. Per tale motivo fino a che questo potenziale di emissione è alto il reattore discarica deve risultare protetto cioè deve essere attivo il sistema di barriere fisiche costituito dalle impermeabilizzazioni e dai drenaggi.

Ipotizzando il raggiungimento di condizioni stazionarie e cioè $dm/dt = 0$, considerando che la frazione non mobilizzabile dei rifiuti in ingresso non prende parte alla reazione ed è quindi costante, suddividendo le emissioni nei due flussi secondo la (4) e semplificando, l'equazione (6) può essere così riscritta:

$$0 = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot s_{Si} - (s_L \cdot q_{Lc} + s_L \cdot q_{Ld}) - (s_G q_{Gc} + s_G q_{Gd}) - rV - s_S Q_S \quad (7)$$

Portando a primo membro nell'equazioni di bilancio (7) i termini che esprimono le emissioni incontrollate di percolato e di biogas e la quantità di sostanza mobilizzabile residua, cioè quei termini che nella progettazione di una discarica è compito dell'ingegnere ambientale minimizzare e controllare, si ottiene:

$$s_L \cdot q_{Ld} + s_G q_{Gd} + s_S Q_S = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot s_{Si} - s_L \cdot q_{Lc} - s_G q_{Gc} - rV \quad (8)$$

Da questa equazione risulta chiaro, in termini matematici, che, se si vogliono ridurre le emissioni incontrollate ($s_L \cdot q_{Ld}$ e $s_G \cdot q_{Gd}$) e la sostanza mobilizzabile residua ($s_S \cdot Q_S$), occorre minimizzare i termini positivi a secondo membro del bilancio di massa e massimizzare quelli negativi.

Questo, tradotto in termini operativi, significa:

- minimizzare la massa di carbonio mobilizzabile introdotta in discarica ($s_{Si} \cdot Q_i$), controllandone sia il flusso (Q_i) sia la qualità (s_{Si}) in ingresso, mediante ad esempio riduzione della produzione dei rifiuti e impiego di diverse tipologie di trattamento prima del deposito in discarica;
- massimizzare la massa associata al biogas e al percolato raccolti ($x_L \cdot q_{Lc}$ e $x_G \cdot q_{Gc}$), controllandone sia il flusso che la composizione;
- velocizzare i processi di stabilizzazione (rV), per esempio creando condizioni

Figura 4.
Rappresentazione grafica dell'accumulo nel tempo di massa mobilizzabile (a) e di emissioni incontrollate (b) che si hanno in una discarica di rifiuti. M_a e e_a rappresentano rispettivamente la massa accumulata e le emissioni accettabili per l'ambiente. Nel grafico (a) sono anche riportati i termini di bilancio (eq. 8) in una discarica sostenibile.

aerobiche mediante immissione di aria, naturale o forzata.

È importante evidenziare, contrariamente alla generale tendenza normativa ed applicativa, quanto sia importante consentire un controllato ingresso di acqua nella discarica. L'acqua infatti rappresenta un necessario reagente per lo svolgersi dei processi biologici [8], in assenza del quale il termine di degradazione rV risulterebbe nullo e si avrebbe una sorta di mummificazione dei rifiuti. L'acqua inoltre promuovendo la produzione di percolato consente, tramite drenaggio e raccolta di quest'ultimo, di allontanare dal sistema le sostanze mobilizzabili che così non saranno più disponibili per una loro diffusione incontrollata nell'ambiente.

Accumulo di massa e comportamento delle emissioni

L'accumulo di elementi mobilizzabili (carbonio, azoto) nel sistema discarica, descritto matematicamente dalla (6), segue l'andamento del grafico riportato in Figura 4a.

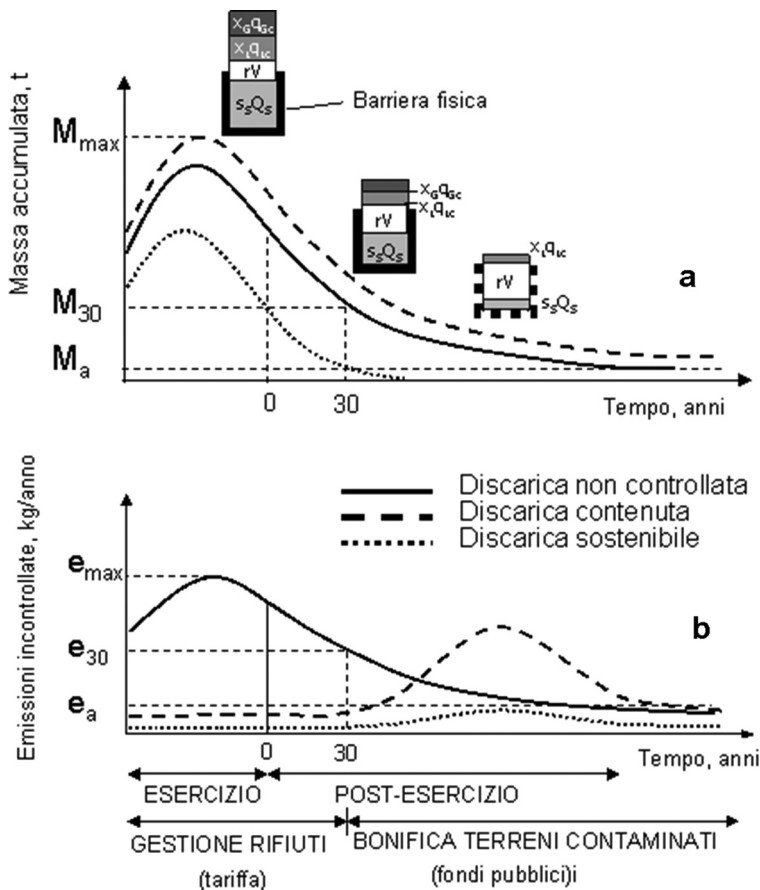
La massa accumulata M (esprimibile in t) raggiunge un massimo durante l'esercizio, per poi, arrivati alle condizioni stazionarie, diminuire secondo la (7), in conseguenza dello svolgersi dei processi di degradazione e della formazione di biogas e percolato.

Nel tempo la massa della sostanza organica residua ($S_s Q_s$) accumulata nella discarica, e contenuta dal sistema barriera, è destinata a ridursi. La discarica potrà considerarsi stabile e sicura quando la massa accumulata avrà raggiunto un valore M_a , sostenibile ed in equilibrio con l'ambiente.

In conseguenza di questo accumulo di materia mobilizzabile nella discarica le emissioni incontrollate di percolato e di biogas espresse dall'eq. (8) avranno un andamento che dipende dalla tipologia di discarica, come indicato nel grafico di Figura 4b.

Nel deposito incontrollato le emissioni incontrollate sono massime durante l'esercizio per poi attenuarsi nella fase di post-esercizio, fino al raggiungimento nel tempo di un livello di emissioni residue accettabile per l'ambiente, che si ha in corrispondenza dell'accumulo di massa M_a .

I valori di M_a e di e_a , che insieme esprimono l'accettabilità ambientale della discarica, possono essere definiti attraverso predefiniti standard di qualità sulla base di valori tabellari di concentrazione delle emissioni (in analogia con quanto la normativa prevede per le acque di rifiuto e gli effluenti gassosi) e sulla base di un'analisi di rischio sito specifica, che tiene conto delle date condizioni ambientali e tecniche nell'area della discarica.



Nel caso di una discarica controllata le emissioni incontrollate si mantengono al di sotto del valore di emissione accettabile per tutto il tempo in cui le barriere fisiche (impermeabilizzazione e drenaggio del percolato) mantengono la loro efficienza.

Quando le barriere perderanno, a breve o medio termine, la loro efficienza per una disfunzione, allora si potranno registrare emissioni incontrollate che possono superare (anche di molto) il livello di accettabilità e_a ed il superamento sarà tanto maggiore quanto più rilevante sarà l'accumulo di materia mobilizzabile residua.

Quindi quelle tipologie di discarica che tendono a mantenere bassi i termini di produzione di percolato (discariche a contenimento, discariche con coperture sigillanti che impediscono l'ingresso di acqua e quindi la degradazione) sono quelle che maggiormente potranno creare problemi ambientali nella fase di post-gestione.

Una discarica sostenibile basata oltre che sulle barriere fisiche anche sul controllo dei termini del bilancio di massa espressi dall'equazione (8), mostrerà idealmente un livello di emissioni comunque basso durante l'esercizio, quando l'efficienza delle barriere è alta. Quando le barriere perderanno efficienza (rotture, invecchiamento, ecc.) le emissioni si manterranno comunque al di sotto delle emissioni accettabili perché la massa accumulata residua ($s_s Q_s$) risulterà significativamente ridotta.

Alla luce di queste considerazioni si può ben comprendere la criticità ambientale derivante dall'impostazione del controllo della fase di post-gestione previsto dalla vigente normativa italiana.

Il d.lgs. 36/2003 (art. 14) prevede infatti per la post-gestione un accantonamento finanziario per un periodo di 30 anni. Ma se nell'arco dei 30 anni il valore della massa mobilizzabile residua (M_{30}) ed il valore delle emissioni (e_{30}) non raggiun-

gono i livelli di accettabilità, dopo tale periodo, quando la fase amministrativa della post-gestione si è conclusa, non si avranno più i fondi a disposizione per gestire quello che a tutti gli effetti dovrà essere considerato come un sito contaminato da avviare a bonifica.

Questa visione non è da Cassandra se solo ci si guarda intorno, essendo già numerose le discariche che si trovano in queste condizioni.

Proseguire pertanto nella progettazione, realizzazione e gestione della tipologia di discarica delineata dal d.lgs. n. 36/2003, significa, oggi, progettare, realizzare e gestire non moderni e sicuri impianti di smaltimento ma terreni contaminati!

A riprova di ciò è sufficiente constatare come la gran parte degli interventi di bonifica di siti contaminati riguarda attualmente, come precedentemente accennato, vecchie "moderne" discariche di rifiuti solidi urbani con coperture finanziarie che raramente derivano dalle tariffe dalla pregressa attività di smaltimento ma, piuttosto, provengono da fondi pubblici altrimenti destinati.

Tale aspetto ha pesanti ricadute sui gestori, soprattutto se privati, in considerazione della loro responsabilità ambientale anche dopo il periodo di post-gestione amministrativa, come sancito dalla vigente normativa (art. 13, D.Lgs 36/2003)

In conclusione il Gestore si viene a trovare nella paradossale situazione per cui da un lato deve ottemperare alle prescrizioni tecniche della normativa, anche quando queste sono tali da prolungare l'impatto ambientale di lungo termine (es. coperture sigillanti) e dall'altro deve accollarsi la responsabilità dei problemi ambientali che ne derivano!

Per giunta in assenza, come già sottolineato, di una benché minima definizione degli standard di accettabilità ambientali sui quali l'autorità dovrà commisurare la sua responsabilità!

Controllo del bilancio di massa per la sostenibilità ambientale

Una lettura in termini operativi del bilancio di massa prima illustrato può rappresentare la chiave di volta per calibrare gli interventi tecnici atti, sia in fase progettuale che gestionale, a consentire il raggiungimento dell’obiettivo della sostenibilità ambientale.

I diversi termini del bilancio possono essere condizionati attraverso l’adozione di molteplici tecnologie e modalità gestionali, come riassunto schematicamente in Tabella 2, sempre considerando come elemento il carbonio della sostanza organica.

La minimizzazione esercita un’ovvia influenza sulla portata dei rifiuti da avviare a discarica.

La raccolta differenziata, pur con i limiti legati a calcoli a volte un po’ ottimistici, può portare ad una significativa riduzione della quantità di rifiuti ed, in teoria, potrebbe esercitare una altrettanto significativa influenza sulla loro qualità.

Ad esempio l’adozione di una raccolta differenziata della sostanza organica putrescibile è una misura che, oltre a consentire di poter disporre di un materiale

idoneo per la produzione di compost di qualità, può permettere il raggiungimento degli obiettivi di riduzione della sostanza organica fissati nel tempo dalla Direttiva Europea sulle discariche (75% nel 2005, 50% nel 2008, 35% nel 2010), e recepiti, pur con una diversa modalità di quantificazione, dalla normativa italiana.

Tuttavia, poiché sia la normativa europea sia quella italiana promuovono anche il recupero ed il riciclo delle altre frazioni dei rifiuti (carta, plastica, metalli), il risultato pratico potrebbe essere, come illustrato graficamente in Figura 5, che la presenza di sostanza organica nei rifiuti avviati a discarica si mantenga sostanzialmente inalterata. In altre parole, meno rifiuti vanno in discarica ma con una concentrazione di sostanza organica putrescibile praticamente costante. Se così fosse, la raccolta differenziata si tradurrebbe in un prolungamento della vita delle discariche (meno rifiuti meno impegno di volume) ma non comporterebbe un significativo miglioramento della sostenibilità ambientale della discarica a livello locale. Odori, rischi di inquinamento delle falde, ecc., rimarrebbero pertanto invariati.

Tabella 2. Influenza delle diverse possibili alternative operative sui diversi termini del bilancio di massa per una discarica.

Operazioni	s_{Si}	Q_i	s_L	q_{Le}	s_G	q_{Ge}	rV	$s_s Q_s$
Prevenzione produzione		+						
Raccolta differenziata	+							
Pretrattamento meccanico			+		+		+	
Pretrattamento biologico	+							
Trattamento termico	++	++						
Degradazione anaerobica			+		+		+	
Ricircolo percolato			+				+	
Aerazione in situ aeration						+	++	
Flushing				++			+	
Impermeabilizzazione e drenaggio percolato								++

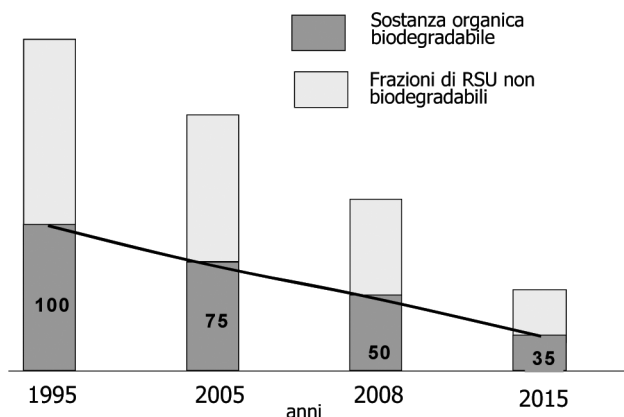


Figura 5. Rappresentazione grafica del criterio adottato, nella Direttiva Europea sulle discariche, per la progressiva riduzione negli anni della sostanza organica biodegradabile da depositare in discarica. È anche indicata la concomitante riduzione delle frazioni di materiali recuperabili che si potrebbe avere adottando strategie gestionali basate sulla prevenzione e la raccolta differenziata.

È quindi necessario che alla minimizzazione della sostanza organica in ingresso si accompagni una forma di trattamento, prima, durante e dopo il deposito, tesa a ridurre l'attività biologica della stessa.

Il trattamento dei rifiuti prima del deposito in discarica può avvenire con diverse tipologie di processi:

- fisici;
- chimico-fisici;
- biologici;
- termici.

Tra i trattamenti fisici rientrano i tipici trattamenti meccanici (triturazione, vagliatura, compattazione, classificazione, ecc.) tesi ad aumentare la superficie specifica dei rifiuti (triturazione), a selezionare alcune frazioni (vagliatura, classificazione), a ridurre il volume (compattazione, in qualche misura anche la triturazione).

La triturazione, oltre ad essere un'operazione preliminare ai successivi trattamenti di vagliatura e classificazione, favorisce una più veloce stabilizzazione della sostanza organica in discarica, dovuta all'aumento della superficie specifica "attaccabile" dai batteri.

La vagliatura e la classificazione consentono di separare frazioni da sottoporre a trattamento prima del deposito in discarica (ad esempio sostanza organica putrescibile da stabilizzare biolo-

gicamente) o da recuperare e riciclare (frazioni ad alto potere calorifico, metalli, ecc.)

La compattazione è volta alla riduzione del volume dei rifiuti e ad una loro agevole movimentazione. Si svolge con produzione di balle legate o "involucrate" con film plastici. Quest'ultima modalità può risultare controproducente ai fini della stabilità in quanto, impedendo l'ingresso di acqua, si "mummifica" l'eventuale sostanza organica presente, rallentando o bloccando la degradazione biologica, impedendone la stabilizzazione.

Un interessante trattamento, classificabile come chimico-fisico per la sua influenza anche sui processi di degradazione idrolitica, è il lavaggio delle frazioni di rifiuto destinate al deposito in discarica. Attraverso tale operazione si tende a fare avvenire in modo controllato quello che si teme possa avvenire in modo incontrollato in discarica e cioè la lisciviazione dei rifiuti con produzione di percolato e conseguente rischio di inquinamento delle acque. I risultati ottenuti da una sperimentazione condotta su diverse tipologie di rifiuti sono decisamente promettenti e tali da far intravedere per questa forma di pre-trattamento una sua evoluzione verso applicazioni in scala reale [9]. A titolo indicativo applicando il prelavaggio dei rifiuti destinati alla discarica si possono osservare nel percolato concentrazioni di COD e TKN (Total Kjeldhal Nitrogen = Azoto organico + azoto ammoniacale) analoghe a quelle che si avrebbero in una discarica tradizionale solo dopo 80 anni!

Il trattamento biologico è teso alla stabilizzazione più o meno spinta della sostanza organica residua contenuta nei rifiuti destinati a discarica e pertanto deve essere accoppiato ad un trattamento meccanico di selezione della stessa (MBT – Mechanical Biological Treatment). Il trattamento (che può avvenire

per via aerobica o anaerobica) può essere più o meno spinto a seconda che sia previsto un completamento della stabilizzazione in discarica con interventi di aerazione *in situ* [10].

La stabilizzazione completa della sostanza organica può risultare infatti molto onerosa in quanto sono richiesti tempi di aerazione, superiori a quelli tradizionali richiesti per il compostaggio, nell'ordine dei 3-4 mesi [11].

Il trattamento termico, condotto con diverse tecnologie (incenerimento, pirólisi, gassificazione) comporta una drastica riduzione della quantità (70%) e del volume (90%) dei rifiuti. Ancora più rilevante risulta la riduzione della concentrazione di sostanza organica putrescibile, virtualmente assente nelle scorie e nelle ceneri residue. Il potenziale lisciviante delle ceneri (previamente stabilizzate) e delle scorie riguarda soprattutto elementi diversi dal carbonio quali i metalli. La loro disponibilità nel tempo, che dipende molto dalle condizioni operative della discarica (carbonatazione, lisciviazione, ecc.), è oggetto di un gran numero di studi [12].

I termini del bilancio di massa possono essere condizionati, oltre che con il pretrattamento di rifiuti in ingresso di discarica, anche con interventi e processi *in situ* sia durante la fase operativa di deposito sia nella fase di post gestione. Tra i possibili interventi *in situ* si possono annoverare:

- degradazione anaerobica;
- ricircolo del percolato;
- aerazione, naturale o forzata;
- flushing.

La degradazione anaerobica è un processo che si svolge normalmente nelle discariche e può essere accelerato con mirati interventi operativi. Oltre al già citato pretrattamento per triturazione, influiscono lo spessore degli strati, la presenza o meno di fanghi depurazione, la velocità di innalzamento del deposi-

to, il pretrattamento biologico aerobico, la disponibilità di acqua. Proprio a quest'ultimo fattore è collegato il concetto della "Discarica Bioreattore" (in inglese *Landfill Bioreactor*), la cui applicazione è molto diffusa negli Stati Uniti, in Australia e, per quanto riguarda l'Europa, in Francia [13, 14].

La disponibilità di acqua, assicurata dal ricircolo del percolato, favorisce infatti (come ricordato in precedenza) le reazioni biologiche attivando l'idrolisi delle sostanze organiche complesse, stadio indispensabile per consentire lo svolgimento dei successivi stadi di fermentazione acida e di degradazione metanigena. Il ricircolo del percolato inoltre mantiene nel sistema le sostanze tampone che controllano l'acidità, favorendo la metanogenesi [8].

La degradazione biologica può essere ulteriormente velocizzata con interventi di aerazione *in situ*, condotti per via naturale o forzata.

Per via naturale è sufficiente, tramite una opportuna configurazione del sistema di drenaggio e raccolta del percolato, creare la possibilità che l'aria possa fluire per convezione naturale dall'esterno verso l'interno della discarica, sfruttando il salto di temperatura tra i due ambienti. All'interno della discarica la temperatura varia infatti tra i 30 e i 45 gradi. Su questo concetto si basa la discarica semi-aerobica, largamente applicata in diversi paesi asiatici, soprattutto in Giappone [15-18].

L'aerazione forzata avviene tramite l'immissione, mediante compressori, di aria in tubazioni forate infisse nel terreno con aspirazione dei gas da analoghe tubazioni. Si viene così a creare, come descritto dalla Figura 6, che riporta lo schema applicativo della tecnologia Airflow [19, 20] un flusso orizzontale di aria che garantisce condizioni aerobiche nell'ammasso di rifiuti.

Gli interventi di aerazione agiscono principalmente sulla velocità di degra-

dazione e conseguentemente sia sulla qualità dei rifiuti residui (s_s) sia sulla qualità delle emissioni (s_L , s_G).

In Italia tale tecnologia è stata applicata e studiata con successo in diverse realtà (Modena, Legnago, Campodarsego, Aosta, Sassari). A Modena, in particolare, ha consentito di scavare in sicurezza una trincea per consentire l'attraversamento di una vecchia discarica con la linea del treno ad Alta velocità [21].

Un ulteriore intervento *in situ* è rappresentato dal "Flushing", che consiste nel dilavare la discarica con rilevanti immissioni di acqua [22-24]. Contrariamente al ricircolo del percolato, con il quale il "Flushing" può essere integrato, il "Flushing" viene effettuato sia non predisponendo coperture superficiali impermeabilizzanti e lasciando quindi penetrare tutta la pioggia che insiste sulla discarica, sia immettendo acqua anche in quantità che eccedono le precipitazioni atmosferiche. Le finalità, analogamente al pretrattamento mediante lavaggio, sono quelle di favorire la lisciviazione accelerata e controllata dei rifiuti, riducendone il potenziale lisciviante nella fase di post gestione.

Il "Flushing" influisce sui diversi termini del bilancio sui quali agiscono anche gli altri interventi *in situ* prima visti, ed

in particolare sulla concentrazione di sostanza organica nel percolato.

Da ultimo per completare il quadro di tutti gli elementi che influenzano i termini del bilancio di massa occorre citare le stesse strutture della discarica, quali i sistemi di impermeabilizzazione che garantiscono un accumulo controllato della sostanza organica putrescibile non ancora degradata (s_s , Q_s).

Altre strutture quali le coperture sigillanti o le coperture strutturali (discariche indoor) che evitano la produzione di percolato non vengono considerate in quanto la loro azione ha carattere temporaneo e non sostenibile ambientalmente.

Contrariamente a quanto prescrive oggi la normativa, che al fine del controllo degli impatti delle discariche indirizza solo verso il pretrattamento, l'obiettivo della sostenibilità ambientale (M_a , e_a) può essere raggiunto con una combinazione di interventi. Il punto di verifica non deve quindi essere il rispetto di un dato parametro nei rifiuti in ingresso (come è nella logica del solo pretrattamento) ma il rispetto di parametri che indicano l'effettivo raggiungimento di condizioni di stabilità ambientale nel tempo di una generazione (es. trent'anni). Possibili combinazioni di trattamenti per raggiungere questo scopo sono rappresentate in Figura 7.

Ad esempio ad un trattamento meccanico (Aa), effettuato con operazioni di triturazione e vagliatura con selezione della sostanza organica, può seguire una fase anaerobica in discarica (Ab) con intensa produzione di biogas (ad es. concentrata in un periodo di 10-12 anni) seguita da una fase di post-trattamento con aerazione forzata (Ac) o naturale (Cc). In quest'ultimo caso la discarica semi-aerobica deve essere stata progettata e strutturata fin dall'inizio per funzionare secondo questa modalità operativa.

Le caratteristiche dimensionali, infatti, dei sistemi di drenaggio del percolato ed

Figura 6. Schema operativo della tecnologia "Airflow" per l'aerazione *in situ* delle discariche.

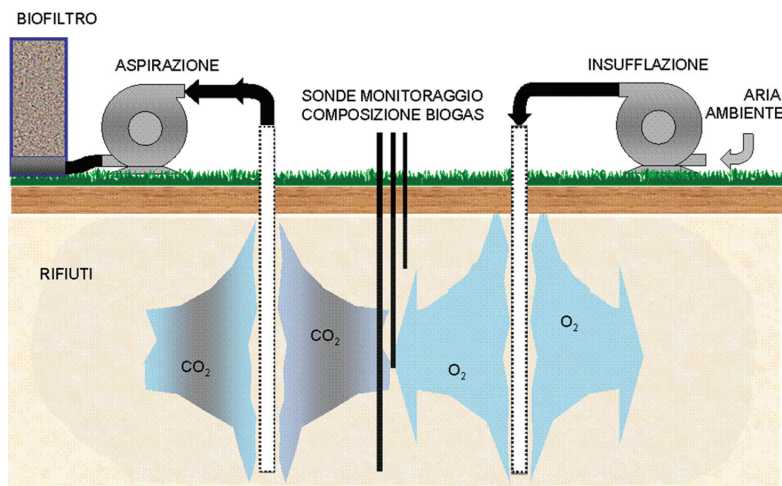
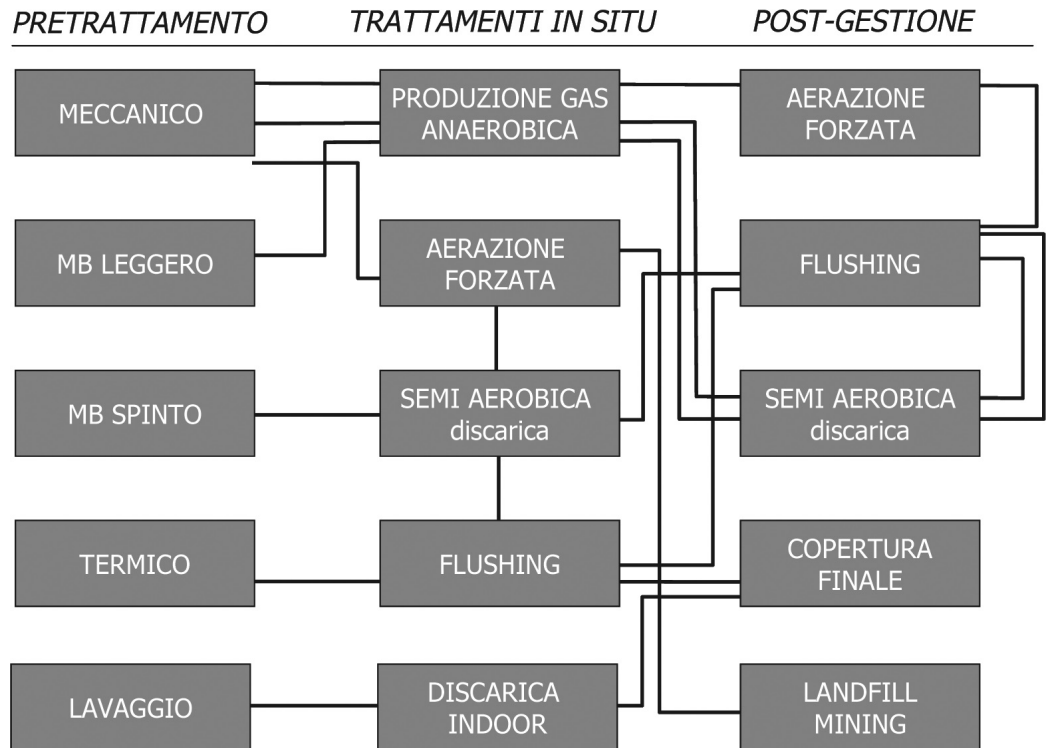


Figura 7.
Combinazione di diverse possibili alternative operative per influenzare il bilancio di massa in una discarica e garantirne la sostenibilità.



il loro lay-out differiscono sostanzialmente rispetto alle discariche di tipo anaerobico.

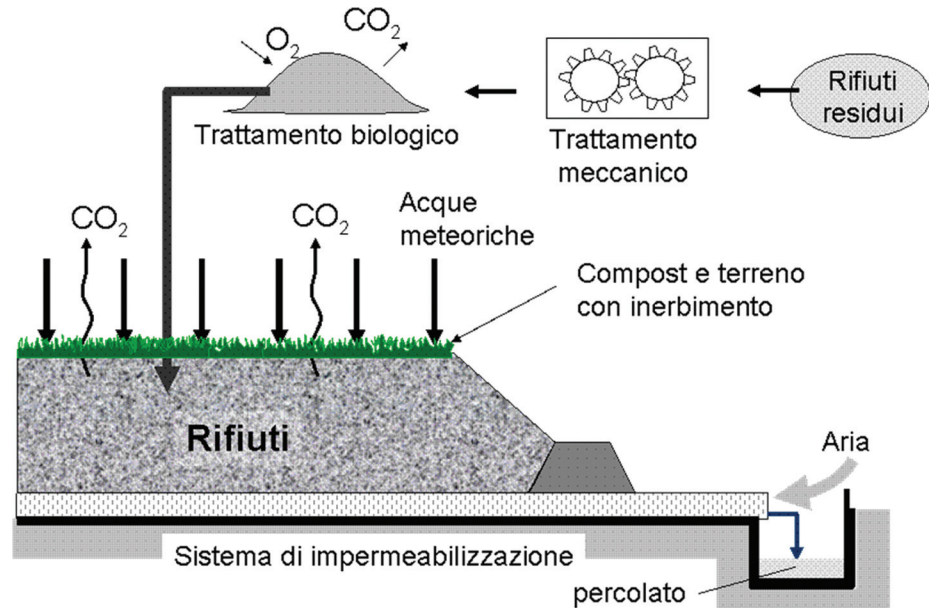
Allo stesso modo per una discarica che si vuole far funzionare direttamente in condizioni semiaerobiche (Cb) è necessario pretrattare i rifiuti con sistemi meccanico biologici spinti (Ca) così da ridurre significativamente l'attività biologica della sostanza organica. Altrimenti durante l'aerazione in situ si potrebbe formare nel sistema di drenaggio una biomassa batterica tale da ostruire i letti granulari del drenaggio stesso. Una discarica di questo tipo potrebbe completarsi con un "Flushing" in post-trattamento (Bc) che ovviamente richiede una copertura finale di tipo aperto.

L'esempio di integrazione appena descritto è il modello PAF, sperimentato presso l'Università di Padova (Dipartimento IMAGE, Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica). Il modello, descritto graficamente in

Figura 8, prevede la combinazione di un pre-trattamento meccanico biologico (P) con aerazione naturale in situ (A) e coperture aperte così da consentire il Flushing (F). Con questo modello di discarica si sono raggiunte concentrazioni finali di BOD e di azoto ammoniacale vicine a quelle richieste dalla normativa italiana per lo scarico delle acque residue nei corpi idrici superficiali [25].

Un altro schema interessante è quello rappresentato dalla linea (Da+Db+Dc). Le scorie che residuano dal trattamento termico durante il deposito in discarica vengono sottoposte a lavaggio e ad aerazione al fine di ridurre il potenziale lisciviante e favorirne la stabilizzazione chimica mediante il processo di carbonatazione [26, 27]. Attraverso tale processo l'anidride carbonica presente nell'aria reagisce esotermicamente con gli ossidi dei metalli alcalino-terrosi (es. calcio e magnesio) contenuti nelle scorie, producendo carbonati praticamente insolubili in acque e chimicamente

Figura 8. Schema del sistema integrato di discarica sostenibile PAF (Pretrattamento meccanico biologico combinato con aerazione per convezione naturale e con dilavamento naturale dei rifiuti [25].



stabili. Successivamente la discarica può essere chiusa con una copertura definitiva. Il processo di carbonatazione è di particolare interesse in quanto costituisce una tecnologia di sequestro e cattura della CO₂ atmosferica, indicata come una delle misure maggiormente percorribili nel breve-medio termine al fine del controllo dei cambiamenti climatici [28, 29].

Bibliografia

1. Stegmann R., Ritzkowski M. (2008). *Landfill fundamentals*. Presentazione power point "Corso di Aggiornamento sulle discariche controllate", IWWG, Lima, Però, maggio 2008.
2. Bidlingmaier, W. (1990). Schwermetalle im Hausmüll, *Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft*, Band 42, pp. 120 ff. [Cit. in Stegmann & Ritzkowski, 2008].
3. El Dawi K.I., Stegmann R., Mast, P.-G. (1997). *Vergleich der Müllzusammensetzung von Abfallbehandlungsanlagen. Bestimmung der Schadstoffe (Schwermetalle)*. In: Hausmüll und hausmüllähnlichen Abfällen. TU Hamburg-Harburg, Mai 1997; Werte für Frischmüll ohne Problemabfälle; Analysenwerte berücksichtigen nicht die Metallfraktion. [Cit. in Stegmann & Ritzkowski, 2008].
4. Neumayer, S. (1999). *Einfluss der mechanisch-biologischen Behandlung auf die Nachsorgephase*

einer Deponie. Diplomarbeit ausgeführt am Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, TU Wien. [Cit. in Stegmann & Ritzkowski, 2008].

5. Zeschmar-Lahl B. (2003). Stoffflussanalyse an einer mechanischen Aufbereitungsanlage - Eintrag und Verbleib von Chlor und Metallen. *Fachtagung Mechanisch-biologische Abfallbehandlung*, Berlin, 2./3.12.2003. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): *Ersatzbrennstoffe* 3, 231-259, 2003. [Cit. in Stegmann & Ritzkowski, 2008].
6. Zeschmar-Lahl B. (2003). Schwermetallentrachtung am Limit. *Müllmagazin*, n. 4. [Cit. in Stegmann & Ritzkowski, 2008].
7. Döberl G. (2005). Evaluation of Models for predicting the long term evolution of MSW landfills. In: *Waste Management in the Focus of Controversial Interests*, P. Lechner (Ed.), 1st BOKU Waste Conference 2005, Facultas Verlags- und Buchhandels AG. [Cit. in Stegmann & Ritzkowski, 2008].
8. Christensen, T.H., Kjeldsen, P. (1989). Basic Biochemical Processes in Landfills. In: Christensen, Cossu, Stegmann (Eds), *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, Academic Press, San Diego, CA, pp. 29-49.
9. Cossu R., Lai T., Pivnenko K. (2010). *Waste washing pre-treatment of municipal and special waste*. Proceedings IWWG 2nd International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management, 5-8 October 2008 Chania, Crete, Greece.
10. Leikam K., Stegmann R. (1997). *Mechanical biological pretreatment of residual municipal solid waste and the landfill behaviour of pretreated waste*. Proceedings Sardinia 97. Sixth Interna-

- tional Landfill Symposium. CISA, Cagliari, vol.I, 463-474.
11. Soyez, K., Pichler, S. (2002) Mechanical-biological pre-treatment of waste: state of the art and potentials of biotechnology. *Acta Biotechnol.* 22 (3-4), 271-284.
12. Johnson C.A, Kersten M., Ziegler F., Moor H.C. (1996) Leaching behaviour and solubility controlling phases of heavy metals in MSWI ash. *Waste Management*, 16, 129-134.
13. Green R., Hater G., Goldsmith C.D., Tolaymat T., Barlaz M. (2007) *Progress report on the outer loop bioreactor landfill project*. Proceedings Sardinia 07, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, CISA Publisher, Italy. ISBN 978-88-6265-003-8.
14. Vigneron V., Budka A., Jimenez E., Hermkes H., Rospars A., Jean B., Belbeze P. (2009). *Bioreactor Landfill: a sustainable waste treatment process*. Proceedings Sardinia 09, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, CISA Publisher, Italy. ISBN 978-88-6265-007-6.
15. Matsuto T., Tanaka N., Koyama K. (1991). *Stabilization mechanism of leachate from semi-aerobic sanitary landfills of organic-rich waste*. Proceedings Sardinia 91. Third International Landfill Symposium. CISA, Cagliari, vol.I, 876-888.
16. Hanashima M. (1999). *Pollution control and stabilization process by semiaerobic landfill type: the Fukuoka method*. Proceedings Sardinia 99. Seventh International Waste Management and Landfill Symposium. CISA, Cagliari, vol.I, 313-325.
17. Matsufuji Y., Sakai M., Tsuji K., Saito H. (2001). *Safety closure and reuse of completed landfill sites by using the recirculatory semi aerobic landfill system*. Proceedings Sardinia 2001. Eight International Waste Management and Landfill Symposium. CISA, Cagliari, vol. IV, 541-550.
18. Matsufuji Y., Tachifuji A., Hanashima M. (2000). *Improvement technology for sanitary landfills by semiaerobic landfill concept*. Proceedings APLAS 2000 Landfill Symposium. Fukuoka, Japan, 163-169.
19. Cossu R., Raga R., Zanella M., Dal Maso A. (2010). *Principi e risultati delle esperienze in Italia dell'aerazione in situ delle discariche*. Atti del workshop "SiCon 2010. Esperienze negli interventi di risanamento", Roma, 11-12 febbraio.
20. Raga R., Cossu R., Dal Maso A. (2010). Effetti dell'aerazione in situ sul bilancio del carbonio e dell'azoto in discarica: test di laboratorio. *Rifiuti Solidi*, n. 2.
21. Cossu R., Rossetti D. (2005). Stabilizzazione dei rifiuti mediante aerazione in situ ai fini dello scavo per la realizzazione della trincea TAV Milano-Bologna. *Siti Contaminati* n. 2/2005.
22. Karnik M., Parry C. (1997). *Cost implication of operating landfills as flushing bioreactors*. Proceedings Sardinia 97. Sixth International Landfill Symposium. CISA, Cagliari, vol. I, 419-426.
23. Novella P.H., Ekama G.A., Blight G.E. (1997). *Effects of liquid replacement strategies on waste stabilisation at pilot scale*. Proceedings Sardinia 97. Sixth International Landfill Symposium. CISA, Cagliari, vol.I, 387-396.
24. Woodman, N.D., Beaven, R.P., Barker, J.A. (2007) *Critique of landfill flushing prediction using exponential models*. In Cossu, Diaz, Stegmann (Eds.), Proceedings Sardinia 07, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, CISA Publisher, Italy.
25. Cossu R., Raga R., Rossetti D. (2003). The PAF model: an integrated approach for landfill sustainability. *Waste Management*, vol. 23, 37-44.
26. Poletti A., Astrup T., Cappai G., Lechner P., Muntoni A., Pomi R., Van Gerven T., van Zomeren A. (2007). *State-of-the-art and outlook on management of waste-to-energy bottom ashes. Part 1: Treatment*. Proc. Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula (CA), 1-5 October 2007, session A13 (su CD ROM).
27. Cappai G., Muntoni A., Piredda M. (2009) *Effetto della carbonatazione accelerata sulle scorie da termovalorizzazione dei RU e sulle singole frazioni granulometriche*. Proceedings Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula (CA), 1-5 October 2007, session I1 (su CD ROM), CISA Publisher, Padova.
28. Lackner K.S., Wendt C.H., Butt D.P., Joyce E.L. Jr., Sharp D.H. (1995). Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy*, 20, 1153-1170. [Cit. in Baciocchi, 2010].
29. Baciocchi R., Costa G., Zingaretti D., Cazzotti M., Werner M., Poletti A., Pomi R., Falasca M. (2010). *Studio sulle potenzialità della carbonatazione di minerali e residui industriali per lo stoccaggio di anidride carbonica prodotta da impianti di piccola/media taglia*. Rapporto Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA Area: Produzione e fonti energetiche, Tema: Centrali elettriche per la coproduzione di energia elettrica e idrogeno, Responsabile Tema: Antonio Calabrò, ENEA.