

METODOLOGIA AD INDICI PER L'INDIVIDUAZIONE DEI SITI IDONEI AL DEPOSITO SUPERFICIALE DI RIFIUTI RADIOATTIVI

Astiaso Garcia D.¹, Florio A.¹, Gugliermetti F.¹, Guidi G.², Violante A.C.¹

¹ Dipartimento di Fisica Tecnica, Università Sapienza di Roma, Via Eudossiana 18, 00184, Roma

² Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleari, ENEA, Via Anguillarese 301, 00123, Roma

SOMMARIO

Il presente lavoro illustra una nuova metodologia per l'individuazione dei siti più idonei alla messa in opera di depositi superficiali di rifiuti radioattivi, basata sul calcolo di un indice di idoneità in grado di quantificare semplicemente ed immediatamente l'attitudine di un'area ad ospitare il deposito di rifiuti radioattivi a bassa-media attività. Tale indice è la somma pesata di alcuni sottoindici che tengono conto della sicurezza, dell'idoneità idrogeomorfologica, dell'interazione col trasporto di merci pericolose, dell'impatto ambientale e di quello socio-economico. E' stato tenuto nella giusta considerazione anche il parametro molto attuale della *security*, in modo da poter valutare la vulnerabilità del deposito ad attacchi terroristici. Qualora due o più siti ottengano un punteggio molto simile, la metodologia proposta prevede il ricorso ad un indice di presenza di ex installazioni nucleari, che tiene conto dell'esistenza o meno, nei dintorni del sito in esame, di installazioni nucleari ora in fase di *decommissioning*. In futuro, al fine di poter effettuare un confronto più dettagliato tra aree che presentano valori di indice molto simili, è previsto il ricorso a matrici, attualmente in corso di elaborazione, contenenti molti dei parametri considerati nel calcolo dell'indice di idoneità, ma in forma tale da poterli analizzare con maggiore dettaglio.

1. INTRODUZIONE

In questi ultimi anni le necessità di stoccaggio di materiali derivanti dallo smantellamento di impianti nucleari, per la produzione di energia elettrica e/o sperimentali, hanno dato un forte impulso a studi e ricerche orientate all'approfondimento delle tematiche ambientali connesse alla scelta e realizzazione di siti idonei per il deposito superficiali di rifiuti radioattivi. La grande maggioranza degli studi attualmente disponibili presenta percorsi decisionali nei quali prevalgono gli aspetti tecnici delle aree considerate, quali ad esempio le caratteristiche geologiche, idrogeomorfologiche e sismiche, mentre quelli di natura antropica, in termini sociali, economici, paesaggistici e culturali, assumono una posizione piuttosto marginale. Anche i paesi che non ospitano al momento centrali nucleari in funzione necessitano di un deposito per i rifiuti radioattivi a bassa – media attività, non solo per poter accogliere i rifiuti prodotti dagli impianti nucleari dismessi, ma anche per ospitare i rifiuti radioattivi, di origine non elettronucleare, derivanti da impieghi medici, industriali e di ricerca. I rifiuti radioattivi in Italia costituiscono sicuramente un grosso problema; tuttavia se si compara il quantitativo totale di rifiuti radioattivi attualmente da smaltire (circa 100.000 metri cubi) con la sola produzione annua di rifiuti pericolosi in Italia (pari a circa 5,9 milioni di metri cubi nel 2005 – fonte APAT) si può evincere che essi costituiscono quantitativamente un problema di dimensioni alquanto ridotte. La realizzazione di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi a bassa – media attività ha come principale obiettivo quello di isolare i rifiuti dalla biosfera per il tempo necessario a consentire il decadimento della loro radioattività fino a livelli confrontabili con quelli naturali. Il deposito è costituito da una serie di barriere artificiali e naturali. Gli elementi che costituiscono le barriere artificiali sono il manufatto prodotto dal condizionamento dei rifiuti (matrice solida cementizia e contenitore di acciaio), le pareti in calcestruzzo delle unità di smaltimento ed il riempimento interposto tra i manufatti e le pareti delle celle (*backfilling*), costituito da materiale cementizio o da altro materiale con adeguate proprietà isolanti. Le barriere naturali sono rappresentate dalle formazioni rocciose che caratterizzano l'ambiente geologico ed idrogeologico del sito in cui il deposito è realizzato. Tali formazioni sono caratterizzate da proprietà fisico-chimiche in grado di impedire o rallentare i processi di migrazione e trasporto dei radionuclidi nell'ambiente. In particolare è necessario evitare che i rifiuti possano venire in contatto con l'acqua. La presenza di acqua nel deposito rappresenta non solo l'unico fattore naturale in grado di causare la degradazione del manufatto e pertanto il rilascio di radionuclidi, ma anche un mezzo di trasporto preferenziale degli stessi nella geosfera ed in seguito nella biosfera. Per i primi 300 anni (periodo di controllo istituzionale) il deposito deve garantire il perfetto isolamento dei rifiuti dall'ambiente circostante; in tale periodo il manufatto è tenuto sotto controllo e

mantenuto perfettamente in efficienza. Anche dopo il periodo di controllo istituzionale, le condizioni geologiche ed idrogeologiche devono essere mantenute stabili. Inoltre il manufatto deve essere realizzato in modo tale da ridurre le probabilità e le conseguenze di un eventuale episodio di intrusione umana che possa mettere a contatto il gruppo critico (gruppo di individui della popolazione maggiormente esposto in relazione ad eventuali fuoriuscite di rifiuti dal deposito) con i rifiuti [1]. La realizzazione del deposito, così come è stato fatto in altri Paesi, dovrebbe essere inserita in un progetto più ampio di sviluppo integrato del territorio. Pertanto il progetto dovrà prevedere la realizzazione di un centro di alta specializzazione, di cui il deposito sarà parte integrante, ma che comprenda anche laboratori specializzati nello studio della durabilità dei cementi e nella caratterizzazione dei rifiuti radioattivi, un centro di informazione e documentazione ed un centro congressi. All'interno del centro saranno previste attività di ricerca in vari campi quali: gestione e condizionamento dei rifiuti radioattivi, qualificazione dei materiali e dei manufatti, interventi robotizzati in ambienti ostili.

2. CRITERI DI SCREENING UTILIZZATI IN AMBITO INTERNAZIONALE

I criteri generali di sicurezza e di radioprotezione ed i presupposti tecnici costituiscono gli elementi essenziali di riferimento sui quali basare la procedura di selezione che porterà all'individuazione di un certo numero di siti idonei ad ospitare il deposito definitivo di rifiuti radioattivi a bassa – media attività. I criteri di screening utilizzati in ambito internazionale, pur nelle specifiche situazioni nazionali, hanno seguito principi generali comuni. Sono state tenute nella giusta considerazione le indicazioni derivanti ad esempio da documenti della IAEA, in particolare quelli della *Safety Series* che consigliano, tra l'altro, di selezionare il sito più adatto restringendo sempre più il campo dei siti idonei [2]. Non tutti i paesi che al momento dispongono di un deposito superficiale hanno seguito i suddetti criteri di screening per la selezione del sito più idoneo. Infatti i paesi che hanno le realizzazioni più significative nel settore dei depositi definitivi per rifiuti radioattivi a bassa – media attività (es. Francia e Spagna) hanno selezionato i siti in prevalenza negli anni '80 o in precedenza, ossia in periodi nei quali o non esistevano ancora i criteri informatizzati o era meno controversa la scelta. Di seguito saranno riassunti i criteri di screening adoperati in alcuni paesi che hanno fatto ricorso a tale metodologia e sui quali sono disponibili informazioni non generiche, quali la Slovenia, il Canada, gli Stati Uniti e l'Australia. Infine sarà sintetizzato il processo di siting effettuato in Italia dalla Task Force Sito dell'ENEA.

La Slovenia intorno agli inizi degli anni '90 ha avviato un programma di selezione di un sito per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività. La procedura utilizzata per l'indagine geografica era costituita da quattro fasi: individuazione delle aree escluse, valutazione delle aree non escluse, identificazione delle aree idonee sulla base di criteri di preferenza e selezione di cinque siti candidati. Questi ultimi potranno poi essere sottoposti ad una dettagliata analisi per poter così effettuare la scelta definitiva. Le aree non idonee includevano: i parchi nazionali, le aree contenenti centri urbani con più di 5.000 abitanti, le aree con risorse di acqua potabile, le aree con attività di faglia e con attività geotermica, le aree ad alta sismicità, quelle inondabili e quelle contenenti risorse naturali quali metalli, minerali, gas e petrolio. Il processo di selezione ha portato all'identificazione di 10 aree, situate tutte nella parte orientale della Slovenia. Successivamente è stato effettuato uno screening di queste aree potenzialmente idonee, al fine di individuare le zone adatte in termini di uso del territorio, gestione delle acque, sismicità e geologia. Sono stati così identificati 36 siti potenziali. Nella successiva fase di selezione i siti potenziali sono stati ridotti a cinque: uno di questi ritenuto idoneo per un deposito superficiale, due per un deposito geologico ed altri due per entrambe le tipologie di deposito. Queste conclusioni hanno sollevato molte proteste. A partire dal 1997 è stato organizzato un programma di partecipazione volto a coinvolgere la popolazione nella scelta del sito. Di recente è stata implementata una metodologia di localizzazione composita, che prevede, a valle dello screening geografico, una procedura volontaristica.

In Canada si era accumulato un quantitativo di circa un milione di metri cubi di residui delle coltivazioni e lavorazioni minerarie uranifere e dello *yellow cake*. Punti essenziali del processo di localizzazione erano la partecipazione delle comunità locali sia alla pianificazione delle attività che alle decisioni. Furono definiti due livelli di criteri di esclusione: quelli del primo livello interessavano le aree contenenti risorse globali, i parchi federali o provinciali, le aree ambientali protette o di interesse scientifico e naturalistico, le aree soggette ad attività sismica significativa. Erano state escluse anche le aree golenali, le aree soggette a sprofondamento del suolo, smottamento ed erosione ad opera degli agenti atmosferici, nonché le zone

contenenti reperti archeologici federali o provinciali e risorse storiche o culturali. I criteri di esclusione del secondo livello comprendevano: falde acquifere regionali, terreni agricoli, popolazioni locali di particolare suscettibilità, importanti risorse naturali, archeologiche, storiche o culturali, infrastrutture di trasporto e qualsiasi altro elemento considerato importante dalla comunità. Dopo le fasi iniziali di esclusione delle aree sono stati adoperati criteri di selezione per la valutazione delle rimanenti aree e di siti specifici. Obiettivi principali sono stati: l'identificazione delle zone contraddistinte da caratteristiche geologiche che avrebbero favorito il contenimento della radioattività, la selezione di aree caratterizzate da idrogeologia favorevole, la selezione di aree caratterizzate da fattori geologici ed idrogeologici semplici, in cui i processi naturali si verificano ad intervalli di tempo logici e prevedibili. Altri criteri utilizzati erano relativi a caratteristiche socioeconomiche. Occorre specificare che ad oggi il processo di selezione del sito non ha avuto un esito favorevole.

Negli Stati Uniti i singoli Stati, in base ad una legge federale, possono associarsi, per costituire un Compact, al fine di realizzare un deposito comune per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa attività. Nel 1986 lo stato di New York emana il Low-Level Radioactive Waste Management Act. Tra i suoi provvedimenti vi fu l'istituzione di una Siting Commission con l'incarico di identificare nello stato un sito idoneo allo smaltimento di rifiuti radioattivi a bassa attività. Tuttavia nel 1990 il processo di selezione raggiunse una impasse a causa della forte opposizione delle popolazioni locali. A quella data erano stati individuati 5 siti potenzialmente idonei. La Siting Commission aveva ritenuto l'idoneità tecnica un elemento indispensabile e prioritario del processo di selezione. Solo dopo aver identificato i siti tecnicamente idonei, erano stati inclusi nel processo di selezione le considerazioni di carattere socioeconomico.

In Australia risalgono al 1985 i primi studi per l'identificazione di regioni idonee ad ospitare siti per lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi. Nel 2001, dopo un intenso lavoro scientifico ed una massiccia consultazione con le comunità locali, il governo australiano ha indicato il sito preferito ed altri due siti alternativi. Il processo di selezione è stato basato su 13 criteri che comprendevano caratteristiche fisiche e naturali, oltre a fattori ecologici e socioeconomici. I criteri sono stati suddivisi in due gruppi: il primo relativo alla protezione radiologica ed il secondo relativo a fattori non radiologici.

In Italia l'ENEA ha istituito nel 1996 una Task Force con il compito di sviluppare una metodologia per la ricerca e la qualificazione delle aree idonee alla localizzazione di un deposito nazionale per i rifiuti radioattivi a bassa – media attività di tipo superficiale. Nel triennio 1998-2000 è stata completata una prima fase del lavoro nel corso della quale è stato realizzato un sistema informativo territoriale a scala nazionale. Per poter determinare una rosa ristretta di siti potenzialmente idonei, eliminando dall'intero territorio nazionale tutte le aree valutate come non idonee, sono stati utilizzati i criteri di esclusione [3], riportati in tabella 1, derivati dalla prassi internazionale da tempo consolidata, basati su criteri generali di sicurezza e di protezione dell'uomo e dell'ambiente di valenza universale.

Tabella 1. Criteri di esclusione

Sono da escludere:	Motivazione
1. Isole	Scelta di progetto per agevolare il trasporto dai centri di produzione dei rifiuti al sito
2. Aree entro 50 km dai confini nazionali continentali	Scelta di progetto per evitare possibili contenziosi con i Paesi confinanti
3. Aree entro: - 15 km da centri abitati con più di 100.000 abitanti	Scelta di progetto per evitare la selezione di aree in prossimità di centri abitati al fine di minimizzare la possibilità di vincolare le aree di possibile

- 10 km da centri tra 20.000 e 100.000 abitanti - 5 km da centri tra 20.000 e 10.000 abitanti - 3 km da centri tra 10.000 e 1.000 abitanti - 2 km da centri tra 200 e 1.000 abitanti	espansione dei centri abitati stessi
4. Aree entro: - 2 km da autostrade e superstrade - 1 km da strade statali e ferrovie	Scelta di progetto per evitare di imporre vincoli restrittivi alle vie di comunicazione e per salvaguardare l'eventuale sito dal risentimento degli effetti di possibili gravi incidenti sulle stesse vie
5. Aree protette, parchi e riserve naturali	Destinazione d'uso del suolo già attribuita per finalità di conservazione dello stato dei luoghi
6. Zone prossime ai corsi d'acqua	Vincolo di inedificabilità
7. Aree di affioramento di formazioni rocciose fratturate o solubili o sedimenti alluvionali recenti ed attuali	Le formazioni indicate sono sfavorevoli rispettivamente alla possibilità di individuare con certezza le vie di trasporto nel sottosuolo dei radionuclidi, alla stabilità geologica del sito ed all'esclusione del rischio di inondazione
8. Zone con pendenza > 5°	Scelta di progetto per evitare le aree ad orografia articolata che possono complicare la progettazione e far aumentare i costi e che possono essere oggetto di instabilità dei versanti
9. Zone ad altitudini < 20 m s.l.m. e > 600 m s.l.m.	Scelta di progetto per evitare le aree di possibile insediamento in prossimità della costa e per limitare i problemi di trasporto presenti nelle zone montane
10. Aree a bosco e le zone umide	Tali aree sono considerate di elevato valore naturalistico e oggetto di tutela
11. Aree ad elevata sismicità (valore di accelerazione al suolo > 0,3 g per una probabilità di non occorrenza del 90 % in 300 anni – tempo medio di ritorno di circa 3000 anni)	Si adotta un valore di soglia in assenza di una dettagliata individuazione e caratterizzazione delle strutture sismogenetiche

L'applicazione dei criteri di esclusione ha portato all'individuazione di un numero cospicuo di aree, di cui poco più di 200 con estensione maggiore di 300 ettari, dimensioni queste adeguate ad ospitare un sito per il deposito. Nel 2002 è terminata, su queste aree con superficie maggiore di 300 ettari, la verifica della presenza o meno di insediamenti e di infrastrutture nonché dei requisiti di idoneità geomorfologica. Tale indagine ha portato all'individuazione di circa 30 aree con caratteristiche fisiche e territoriali molto favorevoli. Queste aree si configurano come possibili localizzazioni del deposito che dovranno poi essere valutate dal soggetto istituzionale, che sarà indicato dalla normativa, al fine di pervenire alla scelta di un numero ancora più limitato di siti da sottoporre alla verifica finale dell'idoneità.

3. METODOLOGIA PER IL CALCOLO DELL'INDICE DI IDONEITÀ

L'elaborazione di una nuova metodologia comporta il notevole vantaggio di poter integrare i criteri valutativi esaminati nei precedenti studi in materia, con ulteriori parametri inerenti ad esempio la problematica della *security*, la cui valutazione è diventata essenziale in seguito agli avvenimenti ed alle dinamiche internazionali sorte negli ultimi anni. E' fondamentale poter attribuire a ciascuna area selezionata un indice di idoneità in grado di quantificare in maniera semplice ed immediata l'idoneità dell'area ad ospitare il deposito di rifiuti radioattivi. In questo lavoro si propone una metodologia che consente di calcolare l'indice di idoneità dell'area in esame mediante la somma pesata di una serie di indici quali:

- l'indice di sicurezza;
- l'indice di idoneità idrogeomorfologica;
- l'indice di rischio legato al trasporto di merci pericolose;
- l'indice di impatto ambientale;
- l'indice di impatto economico;
- l'indice di impatto sociale.

3.1 Indice di sicurezza

La valutazione delle prestazioni di sicurezza a lungo termine del deposito, denominata tradizionalmente come "performance assessment" è sicuramente un elemento di primaria importanza, da tenere nella giusta considerazione quando si effettuano valutazioni comparative tra più siti idonei. Essa consiste nella modellazione matematica di tutti i processi di evoluzione del sito nelle possibili situazioni e condizioni che possono determinare una migrazione dei radionuclidi dal deposito e la possibile esposizione di un individuo della popolazione anche nel lontano futuro. Tale metodo è pertanto basato sulla capacità di contrastare i processi di migrazione e di trasporto dei radionuclidi nell'ambiente circostante il deposito e, conseguentemente, sulla capacità o meno del sistema deposito-sito (barriere artificiali e barriere naturali) di garantire il rispetto dei limiti di dose al gruppo critico della popolazione. In sostanza, un sito è ritenuto idoneo se, in qualsiasi condizione di evoluzione del sistema deposito-ambiente, anche di tipo incidentale, la dose conseguente alla migrazione dei radionuclidi non supera i limiti fissati dalla normativa.

E' essenziale e prioritario garantire la sicurezza, intesa come *safety*, sia dei lavoratori, che operano all'interno del deposito di rifiuti radioattivi, che della popolazione che vive all'esterno. Deve essere garantita la sicurezza dei lavoratori e della popolazione sia per quanto attiene alle radiazioni ionizzanti che per quanto concerne altre tipologie di rischio. Occorre garantire la protezione dei membri della popolazione dall'esposizione a radiazioni ionizzanti per i primi 300 anni, così come deve essere assicurata la protezione dei lavoratori, coinvolti nelle varie fasi del ciclo di vita del deposito. Deve essere garantita la sicurezza radiologica della popolazione anche e soprattutto nel caso in cui si verifichi un incidente che comporta la messa in atto di un piano di emergenza. Anche in tale situazione il sito deve garantire la sicurezza dei lavoratori e della popolazione che vive in prossimità del deposito. Per quanto attiene alla sicurezza non radiologica, occorre minimizzare il numero di morti e di incidenti gravi a membri della popolazione attribuibili alla costruzione ed alla gestione del deposito così come occorre minimizzare il numero di morti,

delle malattie professionali e degli incidenti gravi connessi alla costruzione ed alla gestione del deposito. Tale fattore è grosso modo uguale per tutti i siti e pertanto può essere tranquillamente trascurato.

Infine è stata inserita in tale indice, come si evince dalla tabella 2, la problematica della *security*, quanto mai attuale dopo l'11 settembre 2001, al fine di valutare la vulnerabilità del deposito ad attacchi terroristici. Tale vulnerabilità deve essere valutata sia prima del trasferimento nel sito dei rifiuti che successivamente a tale evento. Inoltre deve essere considerata anche la vulnerabilità del trasporto di rifiuti radioattivi verso il sito.

Tabella 2. Indice di sicurezza

Sicurezza della popolazione	Radiologica
	Non radiologica
Sicurezza dei lavoratori	Radiologica
	Non radiologica
Security	

3.2 Indice di idoneità idrogeomorfologica

L'indice di idoneità idrogeomorfologica necessita di una trattazione particolare, in quanto i parametri da considerare sono molteplici e interconnessi tra di loro. Per effettuare una valutazione comparativa tra le aree preventivamente giudicate idonee, in base alla loro posizione logistica e al contesto geografico è opportuno sottoporre le stesse a valutazioni di tipo litologico e strutturale, morfologico e idrogeologico (tabella 3). Pertanto uno o più siti saranno ritenuti idonei se saranno soddisfatti pienamente i "criteri geologici" necessari al confinamento dei rifiuti radioattivi.

Sono ormai note le caratteristiche geolitologiche che devono possedere le rocce, affinché si possano confinare i rifiuti radioattivi, senza incorrere in problemi di diversa natura, quali contaminazione di falde sotterranee, inquinamento del suolo e sottosuolo. L'isolamento dei rifiuti è maggiore se le rocce di confinamento sono caratterizzate da bassi valori di permeabilità, sia orizzontale che verticale; infatti, il valore del coefficiente di permeabilità determina la velocità di propagazione del fluido o l'entità dell'azione di attenuazione degli effetti di eventuali sostanze inquinanti presenti nel sottosuolo. La permeabilità di un terreno sciolto è determinata dalle caratteristiche granulometriche e dal grado di compattazione; quella di una formazione rocciosa dipende sia dalle caratteristiche primarie, quali granulometria e grado di cementazione, che da quelle secondarie, quali la presenza di intensa fratturazione di origine tettonica o di faglie che possono costituire una via di infiltrazione preferenziale per i fluidi in caso di incidente. Terreni sostanzialmente impermeabili e ad alta capacità di ritenzione chimica possono bloccare l'eventuale diffusione di sostanze pericolose. Sono preferibili terreni di tipo argilloso, argilloso-limosi o evaporitici, per l'elevata plasticità e la bassa permeabilità e, nel caso dei terreni a forte componente argillosa, per l'elevata capacità di scambio ionico. I parametri litostratigrafici devono essere finalizzati a stabilire, la presenza o meno, sul fondo e sulle pareti del sito, di materiale a basso grado di permeabilità, con spessore tale da garantire, già di per sé, una tutela delle eventuali acque presenti nel sottosuolo; e l'assenza di materiali potenzialmente soggetti a fenomeni carsici (dissoluzione) che possano sviluppare al loro interno cavità o sprofondamenti.

Il grado di idoneità del contesto territoriale viene definito in relazione alla vulnerabilità dell'inquinamento delle acque superficiali, del suolo e delle risorse idriche sotterranee, alle caratteristiche geotecniche dei terreni, al grado di protezione del territorio nei confronti di processi geomorfologici attivi (rischio di inondazione, di instabilità dei siti per fenomeni gravitativi ecc.). Questi criteri assumono notevole importanza perché dalle caratteristiche geomorfologiche delle aree dipendono la reale possibilità di isolamento naturale del sito dalle interferenze con le acque superficiali e, in parte, con quelle sotterranee, e la predisposizione naturale delle aree all'accoglimento del sito nonché la facilità della sua conduzione e controllo. E' possibile preliminarmente affermare che gli ambiti territoriali più favorevoli al confinamento,

se si escludono le vere e proprie aree di montagna, le quali presentano problemi logistici, legati al trasporto dei rifiuti e alla gestione e al controllo del sito, sono le zone collinari (comprese anche le aree pedemontane) e quelle di pianura. Le zone di pianura alluvionale sono poco adatte, in quanto generalmente i principali litotipi affioranti sono caratterizzati da una permeabilità molto alta (sabbia e ghiaia), fattore di rischio che aumenta la probabilità di contaminazione delle falde superficiali e sotterranee in caso di incidente.

Le zone collinari evolute sono, in genere, relativamente poco accidentate dal punto di vista morfologico, pertanto i fenomeni franosi ed erosivi sono di bassa entità. All'interno delle zone collinari è comunque quasi sempre possibile individuare, soprattutto nella fascia di transizione verso la vera e propria pianura, settori a morfologia dolce e ondulata. Nell'ambito di queste zone, sono numerose le vallette secondarie, con fondo a ridotta pendenza, versanti poco inclinati e con sviluppo regolare. In alcuni casi, le ridotte dimensioni di queste valli permetterebbero un possibile isolamento delle stesse dal bacino imbrifero. Nelle vallette di questo tipo sono presenti, non raramente, anche quelle modellate in prevalenti e potenti depositi argillosi, poco o per nulla permeabili, e/o quelle caratterizzate dall'assenza, nel sottosuolo di loro pertinenza, di falde idriche significative.

Le zone di pianura, invece, sono caratterizzate da una morfologia piatta o lievemente ondulata. In realtà, se consideriamo l'origine geologica del territorio possiamo distinguere due tipi diversi di pianura: la pianura di erosione e la pianura di accumulo. La pianura di erosione è un territorio che si è formato in seguito al disfacimento totale di rilievi geologicamente antichi da parte delle acque meteoriche dei fiumi, dei ghiacciai e del vento. La pianura di accumulo o di sedimentazione si è formata in seguito all'accumulo, nel corso di milioni di anni, di grandi quantità di detriti da parte dei fiumi, del mare o del vento. Pertanto i due tipi di pianura, laddove si verificassero i criteri di applicabilità geologica potrebbero costituire delle zone adatte al confinamento.

Il grado di idoneità delle aree deve essere valutato sotto l'aspetto idrografico in funzione delle naturali o intrinseche difese rispetto alle possibili interferenze del sito con le acque superficiali. Si deve quindi tenere conto della vicinanza dei fiumi o dei canali, in grado di interferire direttamente o indirettamente con l'area di interesse e delle condizioni di drenaggio naturale delle acque di scorrimento superficiale.

Sotto l'aspetto idrogeologico, il grado di idoneità delle aree deve essere rapportato alle naturali e intrinseche condizioni di difesa delle falde sotterranee rispetto alle interferenze con le acque sotterranee e superficiali [4]. In particolare, per la valutazione della vulnerabilità delle acque sotterranee rispetto ad un possibile inquinamento, si deve tenere conto delle caratteristiche idro-litologiche (tipo e grado di permeabilità verticale e orizzontale) delle rocce entro cui il sito viene realizzato, dell'entità del franco di protezione esistente tra il futuro fondo del deposito e la superficie della eventuale falda idrica a esso direttamente sottostante, anche in relazione alle possibili escursioni stagionali e/o eccezionali di quest'ultima, ed infine del potenziale grado di protezione degli altri acquiferi profondi. Devono essere escluse le aree nell'ambito delle quali avviene, o si presume avvenga, l'alimentazione sotterranea delle falde idriche profonde destinate all'uso potabile, e tutte le aree connesse con la ricarica o il miscelamento di acque termali.

Tabella 3. Indice di idoneità idrogeomorfologico

Parametri geologici e litostratigrafici	rocce argillose
	rocce evaporitiche
	rocce a bassa permeabilità e poco fratturate
Contesto geomorfologico	zone collinari e pedemonte
	zone di pianura
Parametri idrologici	
Parametri idrogeologici	

3.3 Indice di rischio legato all'interazione col trasporto di merci pericolose

Per poter scegliere il sito più adatto per la costruzione del deposito è necessario valutare la presenza o meno, in prossimità dello stesso, di impianti industriali soggetti alla Direttiva Seveso. Essi, in quanto a rischio di incidente rilevante, possono interagire, in tale eventualità, con il deposito. Inoltre essi costituiscono l'origine e/o la destinazione di merci pericolose, trasportate in Italia prevalentemente su strade. Per completezza vanno considerate oltre alle rotte stradali, anche quelle ferroviarie ed aeree che passano in prossimità del deposito. Non è da trascurare poi il trasporto di merci pericolose in condotte. È opportuno che il deposito sia ubicato il più lontano possibile sia dagli impianti che dalle rotte interessate dal trasporto di merci pericolose, in quanto alcuni eventi iniziatori (es. terremoti, inondazioni) possono causare un effetto domino. L'indice di rischio, definito in tabella 4, in questo caso è funzione della distanza, del tipo e della quantità di merce pericolosa trasportata.

Tabella 4. Indice di rischio legato all'interazione col trasporto di merci pericolose

Presenza di impianti industriali Seveso	
Presenza di rotte interessate dal trasporto di merci pericolose	Stradali
	Ferrovie
	Aeree
	Condotte

3.4 Indice di impatto ambientale

Una corretta valutazione del livello di idoneità di un sito per la costruzione di un deposito superficiale per lo stoccaggio di rifiuti radioattivi deve necessariamente prevedere uno studio preliminare volto all'analisi del contesto ambientale relativo all'intorno in cui il deposito si inserirebbe. Nonostante i criteri di esclusione adottati prevedano che i territori ricadenti in ambito protetto, cioè situati o all'interno di aree protette nazionali e regionali o all'interno di riserve naturali, siano considerati inidonei a priori, gli impatti ambientali connessi alla costruzione del deposito ed i potenziali danni sull'ambiente legati ad eventuali incidenti dovuti alla costruzione o alla presenza dello stesso, possono assumere proporzioni molto discostanti, fino a raggiungere livelli di impatto o di rischio tali da sconsigliare la costruzione del deposito in quel determinato luogo. Occorre inoltre considerare che la penisola italiana è caratterizzata da un territorio che, per la particolare posizione geografica ed il particolare percorso storico attraversato, gode della presenza di un patrimonio naturalistico, storico – culturale e paesaggistico di inestimabile valore a livello mondiale; conseguentemente, ogni scelta d'intervento sul territorio nazionale, deve prevedere tra gli obiettivi prioritari, la salvaguardia e la conservazione di tali beni comuni.

La metodologia per la valutazione di idoneità di un sito alla messa in opera di un deposito di rifiuti radioattivi, prevede quindi il calcolo di un indice di impatto ambientale (tabella 5) composto dalla somma delle diverse tipologie d'impatto che la costruzione del deposito può generare nelle zone limitrofe. Le prime due tipologie d'impatto riportate nella seguente tabella rappresentano la componente paesaggistico – culturale dell'indice di impatto ambientale, mentre le ultime tre formano la componente naturalistico – ecosistemica.

Tabella 5. Indice di impatto ambientale

Tipologia d'impatto ambientale	Descrizione impatto
Impatto paesaggistico	Modifiche strutturali al paesaggio caratterizzante l'area in esame

Impatto sull'uso del territorio	Alterazioni forzate dell'uso del suolo nelle aree limitrofe
Inquinamento ambientale	Alterazioni chimico, fisiche e microbiologiche dell'aria, del suolo e delle acque, di origine non radioattiva
Impatto ecosistemico	Impatto sulle interazioni tra le componenti biotiche ed abiotiche degli ecosistemi limitrofi
Impatto da contaminazione radioattiva ambientale	Effetti della contaminazione radioattiva nelle componenti biotiche ed abiotiche del territorio limitrofo

La valutazione dell'impatto paesaggistico si basa sull'analisi dei possibili vincoli paesaggistici o archeologici eventualmente presenti nell'area esaminata, valutando l'effettiva l'alterazione del paesaggio che il deposito comporterebbe, soprattutto in relazione ai patrimoni paesaggistici tutelati dai suddetti vincoli.

L'impatto sull'uso del territorio è connesso prevalentemente a due principali forme d'alterazione: la prima consiste nella valutazione dei cambiamenti apportati ai territori a destinazione d'uso di tipo antropico, quali le zone destinate all'agricoltura o generalmente all'allevamento di bestiame, mentre la seconda forma d'alterazione deriva dalla stima dei cambiamenti di destinazione d'uso del territorio naturale circostante il deposito, con particolare attenzione alle vocazioni originarie dei suoli.

L'impatto relativo all'inquinamento ambientale deriva dalle alterazioni temporanee o persistenti delle caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche dell'area, del suolo e delle acque, connesse con la costruzione o la presenza del deposito superficiale, analizzando l'intero ciclo di vita del deposito e includendo l'impatto dovuto al trasporto dei rifiuti radioattivi. Non sono considerate le contaminazioni radioattive, in quanto valutate nella tipologia di impatto relativa alle contaminazioni ambientali.

L'impatto ecosistemico viene valutato in relazione allo studio delle alterazioni ecosistemiche che il deposito può comportare nell'ambiente in cui si inserisce. Tale valutazione richiede quindi, previa individuazione delle unità ecosistemiche presenti nel territorio interessato, un'analisi più a larga scala degli ecosistemi presenti nelle aree limitrofe, considerando prioritarie la conservazione delle dinamiche di popolazione e delle interazioni interspecifiche che consentono la naturale persistenza degli ecosistemi. Si attribuisce particolare valore d'impatto laddove la presenza del deposito può minacciare la sopravvivenza di specie protette dalle convenzioni internazionali o rientranti nella lista rossa delle specie minacciate d'estinzione stilata dall'IUCN (*International Union for the Conservation of Nature*). Inoltre la valutazione dell'impatto ecosistemico considera il possibile impatto diretto ed indiretto sulla biodiversità locale, così come definita secondo l'approccio ecosistemico della Convenzione sulla Diversità Biologica, e valuta per ogni sito l'entità del fenomeno di frammentazione degli habitat, particolarmente dannoso per la conservazione della naturale evoluzione delle dinamiche ecosistemiche del luogo.

Infine, l'ultima componente coinvolta nella valutazione dell'indice di impatto ambientale è quella relativa all'impatto dovuto alla contaminazione radioattiva degli ambienti circostanti il deposito, a causa della possibile interazione tra gli isotopi radioattivi e l'ambiente. Il valore d'impatto stimato è connesso con le caratteristiche del territorio e delle procedure di trasporto dei rifiuti radioattivi connesse alla probabilità di contaminazione radioattiva dell'ambiente. Vengono inoltre analizzati gli eventuali danni che tale problematica arrecherebbe in ogni luogo in esame, considerando le contaminazioni del suolo e delle acque oltre che l'immissione degli isotopi radioattivi nelle componenti biotiche. In quest'ultimo caso occorre esaminare le reti trofiche della zona in modo da poter tracciare il percorso di propagazione biotica dei radioisotopi, considerando inoltre le problematiche di bioaccumulo e l'interazione con i prodotti alimentari dell'uomo.

3.5 Indice di impatto economico

Non c'è dubbio che la costruzione di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi in un determinato sito comporti un'alterazione degli equilibri economici locali. Di conseguenza, l'indice di impatto economico è finalizzato a stimare quale sia l'entità ed il dettaglio di tali cambiamenti, correlandoli ad una quantificazione economica. Occorre inoltre considerare, ai fini di una valutazione dell'impatto economico, quale sia il costo del deposito superficiale lungo tutto il suo ciclo di vita.

Da un punto di vista macroeconomico, la realizzazione di un impianto per il deposito di rifiuti radioattivi, comporta la gestione delle cosiddette esternalità ambientali negative o diseconomie esterne che si generano allorquando si determina uno scostamento dall'equilibrio economico tra costi e ricavi marginali e quindi una non efficiente allocazione delle risorse perpetrata ai danni della collettività.

Questo danno esterno determinato dall'inquinamento e dagli svantaggi ad esso connessi, si ripercuote negativamente sulle funzioni di costo delle imprese che lo subiscono e sulle funzioni di utilità individuale dei singoli cittadini. Si crea quindi un gap tra costi privati e costi sociali e tra benefici privati e benefici sociali, che determina il problema di un loro riallineamento verso l'ottimo paretiano, attraverso gli strumenti:

- delle tasse e sussidi ecologici, che tentano di internalizzare il danno ambientale;
- della regolamentazione, attraverso la fissazione di standard qualitativi o quantitativi da rispettare;
- della negoziazione dei diritti sulle esternalità.

La tabella 6 riporta una schematizzazione riassuntiva delle tipologie di impatto economico connesse alla costruzione del deposito, valutando prevalentemente le componenti variabili a seconda della scelta del sito dedicato al deposito stesso.

Tabella 6. Indice di impatto economico

Tipologia d'impatto economico	Descrizione impatto
Costo del deposito	Valutazione delle spese di progettazione, costruzione, gestione, chiusura e post-chiusura in relazione alle caratteristiche del sito
Alterazione della valutazione del patrimonio immobiliare	Analisi delle variazioni dei valori immobiliari in seguito alla messa in opera del deposito
Perdita di immagine del territorio	Stima dell'eventuale perdita di immagine delle zone limitrofe al deposito valutata in termini economici

La componente d'impatto economico connessa al costo del deposito, considera i compensi relativi alla mano d'opera per la costruzione del deposito, i costi di fornitura e posa in opera dei materiali di costruzione, gli oneri legati alla sicurezza dei lavoratori ed al trasporto dei rifiuti radioattivi dai siti d'origine all'area di deposito, nonché le spese di gestione e quelle connesse alla chiusura del deposito ed agli interventi successivi di bonifica.

La valutazione dell'alterazione del patrimonio immobiliare è una stima delle fluttuazioni di valore dei beni immobili limitrofi al deposito, causate dalla sua costruzione; vengono quindi considerati per ogni area i valori degli immobili prima della costruzione e verranno valutate le variazioni in funzione delle dinamiche economiche locali.

La stima della perdita d'immagine del territorio circostante viene valutata per mezzo di simulazioni dei possibili profili socio-culturali ed economici che si delineerebbero dopo la costruzione del deposito stesso,

valutando l'eventuale riduzione di produttività delle economie locali, soprattutto quelle legate all'agricoltura, all'allevamento ed al turismo locale.

3.6 Indice di impatto sociale

Le esperienze degli ultimi anni, hanno dimostrato che l'accettabilità da parte della popolazione all'inserimento di un deposito di rifiuti radioattivi nel proprio territorio è una questione molto delicata. Tutti ricorderanno la protesta da parte dei cittadini lucani, contrari alla costruzione del deposito geologico nel comune di Scanzano Jonico (MT). Le motivazioni che stavano alla base dell'opposizione popolare erano scaturite in seguito ad una cattiva informazione da parte delle istituzioni che avevano affrontato il problema più da punto di vista politico che comunicativo. Inoltre, l'intervento dei movimenti ambientalisti aveva provocato allarmismi infondati, in quanto le conoscenze sul sito, utili a giustificare la sua realizzazione, non erano state ritenute dagli stessi né approfondite, né compatibili con le esigenze presenti e future della popolazione locale.

Sarebbero da promuovere delle campagne di sensibilizzazione al problema da parte delle popolazioni locali e non, facendo ricorso a strumenti che favoriscano il consenso al sito. E' importante anche valutare il contesto sociale nel quale si va ad inserire il deposito di rifiuti radioattivi. Sicuramente va valutato l'incremento di popolazione dovuto al sopraggiungere di personale specializzato per le operazioni di costruzione del deposito, insieme alle loro famiglie. Ciò può comportare cambiamenti socio-culturali e modificare la richiesta di abitazioni e di infrastrutture. Va inoltre valutato l'eventuale variazione del tenore di vita e del background culturale della comunità sociale, a seguito dell'arrivo di persone esterne.

Il ruolo dei detentori di responsabilità decisionale e gestionale dovrà essere quello di fornire dei messaggi chiari e positivi sull'argomento, fornendo delle prospettive concrete di interesse e di occupazione per migliorare le condizioni di vita di una comunità locale. Un beneficio di cui la popolazione può avvalersi è l'incremento dei posti di lavoro che si vengono a creare durante l'intero ciclo di vita del sito, dalla fase di costruzione a quella di post-chiusura [5].

Detto ciò, per la determinazione di tale indice si valuteranno principalmente tre parametri, come riportato nella tabella 7:

Tabella 7. Indice di impatto sociale

Accettabilità del sito da parte della popolazione
Valutazione del contesto sociale
Incremento dei posti di lavoro

4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Qualora due o più siti ottengano lo stesso punteggio di indice di idoneità sarà previsto il ricorso ad un indice definito come "indice di presenza di ex installazioni nucleari", che tiene conto della presenza o meno, nei dintorni del sito in esame, di installazioni nucleari ora in fase di decommissioning. Infatti la presenza di impianti nucleari nel territorio del deposito o la contiguità degli stessi può essere reputata degna di una speciale considerazione a causa dei potenziali vantaggi di colocalizzazione, in modo particolare per quanto concerne la riduzione del potenziale fardello dell'accettabilità del sito da parte della popolazione e la minimizzazione dei trasporti di rifiuti radioattivi (provenienti dagli ex impianti). Il sito che avrà una distanza minore da tali installazioni sarà da preferire. Pertanto l'indice sarà parametrizzato in funzione della distanza dalle stesse.

Sono in corso di elaborazione delle matrici, contenenti i parametri precedentemente descritti ed inseriti nei vari indici, che consentiranno di poter effettuare un confronto più dettagliato tra aree che presentano valori di indice molto vicini. Tale approccio implica il vantaggio di poter effettuare una graduatoria univoca tra

diversi siti già ritenuti potenzialmente idonei alla costruzione del deposito e di poter comparare diversi siti candidati, confrontando i livelli di idoneità di ognuno e pesando il confronto in base alle differenze di valore degli indici risultanti.

Inoltre, la scelta metodologica basata sull'extrapolazione di indici di idoneità per mezzo di calcoli matriciali, è stata rafforzata dal fatto che lo stesso protocollo esecutivo era stato già applicato con successo in un progetto realizzato dal Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università Sapienza di Roma e dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare per il calcolo di indici di sensibilità ambientale dei territori marino – costieri agli sversamenti di idrocarburi in mare. I risultati ottenuti dal progetto di ricerca hanno confermato che tale metodologia risulta complessivamente valida e applicabile a casi analoghi, come quello in questione, in cui risulta necessario il calcolo di un indice che esprima il livello di rischio ed il potenziale danno all'uomo ed all'ambiente che un'installazione quale il deposito può eventualmente comportare in una determinata area.

Gli indici di idoneità ambientale alla costruzione del deposito ottenuti dal calcolo matriciale derivano dall'elaborazione di tre fattori derivanti dallo studio dei molteplici parametri che caratterizzano ogni area esaminata: fattore di rischio, valore d'impatto ed indice di danno.

Il calcolo del fattore di rischio di un sito permette di valutare quale sia per ogni area esaminata il rischio che possa verificarsi un incidente se la costruzione del deposito avvenisse nel sito stesso. Di conseguenza, il valore ottenuto deriva dalla valutazione di tutte le componenti, naturali od antropiche, che alterano la probabilità di accadimento di un potenziale incidente connesso a tutte le fasi del ciclo di vita del deposito.

La stessa standardizzazione è effettuata per il calcolo dei valori d'impatto, definiti in funzione delle realtà presenti alterate in conseguenza della costruzione del deposito: attività economiche limitrofe, modifiche nello sfruttamento delle risorse naturali presenti, alterazione del paesaggio, frammentazione degli habitat e cambiamenti ecosistemici, ecc.

Infine, la suddivisione delle categorie di danno è elaborata su scala comparativa, in modo da poter includere e valutare tutti gli aspetti, naturali o artificiali, che verrebbero negativamente coinvolti in un eventuale incidente: danni alla salute, in funzione degli agglomerati urbani limitrofi e della presenza di strutture sensibili, danni chimici e radiologici alle biocenosi presenti, in funzione del valore biologico dell'ambiente circostante, danni economici in funzione delle attività commerciali e industriali dell'intorno, e così via. Il peso assegnato ad ogni caratteristica esaminata sarà quantificato in proporzione al livello di irreversibilità e gravità della perdita di valore.

I valori finali degli indici di idoneità ambientale ottenuti con questo procedimento di pesatura integrata avranno il vantaggio di includere in un unico valore numerico tutte le principali caratteristiche qualitative e quantitative che alterano i valori di impatto, di rischio e di danno di ogni area esaminata, rendendo così possibile la stesura di mappe elaborate in GIS per un rapido confronto tra più aree candidate.

RIFERIMENTI

- [1] Risoluti P., Ventura G., Ciabatti P., Mingrone G. "Rifiuti radioattivi a bassa attività: analisi di sicurezza di siti idonei al loro smaltimento in un deposito superficiale" Rifiuti Solidi Vol. XIV n. 6 novembre – dicembre 2000.
- [2] "Siting of near-surface disposal facilities" Safety Series N. 111-G-3.1, IAEA, 1994.
- [3] Ventura G. "Sistema informativo geografico per il sito del Deposito Nazionale dei Materiali Radioattivi", Rapporto Tecnico ENEA, 2003.
- [4] Chapman N.A., McEwen T.J., Beale H. "Geological environments for deep disposal of intermediate level wastes in the UK" Proc. of IAEA Symposium on Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes, March 1986, IAEA, Vienna, Austria.
- [5] "Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste" TECDOC-1308, IAEA, 2002.