



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile

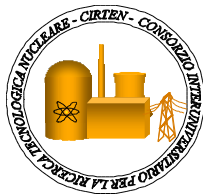


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Considerazioni geologico-territoriali e ambientali nella scelta di
un'area per l'ubicazione di un deposito di rifiuti radioattivi a bassa
attività

F. Zarlenga, R. Levizzari



CONSIDERAZIONI GEOLOGICO-TERRITORIALI E AMBIENTALI NELLA SCELTA DI UN'AREA PER
L'UBICAZIONE DI UN DEPOSITO DI RIFIUTI RADIOATTIVI A BASSA ATTIVITÀ

F. Zarlenga ENEA, R. Levizzari ENEA

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA



Titolo

Considerazioni geologico-territoriali e ambientali nella scelta di un'area per l'ubicazione di un deposito di rifiuti radioattivi a bassa attività

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto tecnico

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione".

Argomenti trattati: Ambiente e territorio, Trattamento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi

Sommario

Sono analizzati, in via preliminare, i principali aspetti geologici, territoriali, ambientali e antropici che possono influire direttamente e indirettamente sulla scelta di un sito per l'ubicazione di un deposito di rifiuti radioattivi a bassa attività. Lo studio è stato articolato in due sezioni, che analizzano rispettivamente l'impatto umano e dell'ambiente sull'opera e l'impatto della realizzazione e dell'esercizio del deposito sull'ambiente circostante.

Note: Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP4 - Task C dell'Accordo di programma ENEA-MSE, II PAR, obiettivo C2.


Autore: F. Zarlenga, R. Levizzari

Hanno inoltre collaborato: G. Fattoruso, F. Pasanisi

Copia n.


In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	15/3/10	NOME	R. LEVIZZARI	A. LUCE	S. MONTI
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	2	47

INDICE

Introduzione	4
1. I Sistemi Informativi Geografici	5
1.1. Analisi ed evoluzione dei GIS	5
2. Le problematiche inerenti la selezione di siti idonei ad ospitare impianti per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa attività.	7
2.1. Analisi propedeutiche e strumenti per la selezione di siti sul territorio nazionale	7
3. I comparti ambientali da considerare in termini di impatto umano e dell'ambiente sull'opera	10
3.1. Sismotettonica e pericolosità correlata	10
3.1.1. I terremoti	11
3.1.2. Presenza di faglie attive	11
3.1.3. Microzonazione sismica e amplificazione della sismicità	12
3.1.4. Vulcanismo	13
3.2. Aspetti geologici e geotecnici che possono influire sulla pericolosità di un'area	13
3.2.1. Caratterizzazione geotecnica e rischio per le strutture fondazionali	13
3.2.2. Fenomeni gravitativi	14
3.2.3. Fenomeni di subsidenza	16
3.2.4. Uplift	17
3.2.5. Liquefazione dei terreni	17
3.3. Problemi specifici per i siti in aree costiere	17
3.3.1. Tsunami	18
3.3.2. Mareggiate	19
3.3.3. Erosione costiera	20
3.3.4. Opere di difesa costiera	22
3.4. Attività umane	23
3.4.1. Rotte di aerei	23
3.4.2. Trasporti su strada e su ferrovia	23
3.4.3. Attività industriali a rischio	23
3.4.4. Presenza di dighe nei bacini di ritenuta a monte degli impianti	23
3.4.5. Cambiamenti nell'uso attuale del suolo	24
4. I comparti ambientali da considerare per l'impatto dell'opera	25
4.1. Conoscenza del fondo naturale di radioattività.	25
4.2. Contesto idrogeologico e idrologico e la dispersione dei radionuclidi in acqua	26
4.2.1. Caratterizzazione delle acque superficiali e degli aspetti connessi alla loro pericolosità	26
4.2.2. Caratterizzazione idrogeologica degli acquiferi	27
4.2.3. Caratterizzazione delle acque marine e di transizione	27
4.3. Il comparto atmosferico e la dispersione dei radionuclidi in aria	28
4.3.1. Climatologia	28
4.3.2. Venti ed eventi estremi correlati	28
4.3.3. Precipitazioni	29
4.3.4. Temperature	29
4.4. Suolo e contesto agronomico nella dispersione dei radionuclidi nell'ambiente	30
4.4.1. L'uso del suolo	30
4.4.2. Aspetti pedologici rilevanti per la dinamica dei radionuclidi nel suolo	30
5. La componente antropica	31
5.1. La conoscenza dei PRGC e dei PRS	31
5.2. I trasporti	31
5.3. I comparti antropici di maggiore interesse	32


 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	3	47

5.3.1.	Comparto agricolo	32
5.3.2.	Comparto urbanistico	32
5.3.3.	Comparto industriale	32
5.3.4.	Dinamica e distribuzione delle popolazioni	32
5.3.5.	Uso dell'acqua e dei suoli	32
5.3.6.	I sistemi delle aree protette	32

APPENDICE 1 - I Sistemi Informativi Geografici	34
--	----

APPENDICE 2 – Elementi di calcolo nello studio delle dinamica di tsunami e mareggiate	42
---	----

Bibliografia	45
--------------	----

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	4	47

INTRODUZIONE


La selezione e qualificazione di un sito per l'installazione di impianti per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi, di centrali nucleari di potenza, ma anche di reattori di ricerca, impianti di fabbricazione e ritrattamento del combustibile, avviene attraverso un processo multidisciplinare molto complesso e delicato, che coinvolge numerose competenze tecnico-scientifiche e diverse entità istituzionali, politiche e sociali, centrali e locali.

I fattori antropici rappresentano un aspetto saliente da considerare nei Paesi come l'Italia, caratterizzati da alta intensità abitativa e insediativa, con contiguità di interessi potenzialmente contrastanti. Stante quindi la natura politico-economica di tali interessi, i criteri di localizzazione possono essere diversi e non seguire sempre un processo predefinito come nel caso di quelli di natura ambientale (climatologia, geologia, sismologia, ecc.), ove le varie valutazioni si basano su elementi tecnico-scientifici rigorosi, universalmente riconosciuti e prescrivibili.

Pertanto, sebbene per taluni aspetti la localizzazione dei siti idonei a ospitare impianti nucleari potrebbe avvenire in maniera completamente prescrittiva, generalmente la scelta del sito rappresenta un compromesso tra diversi fattori competitivi, inclusi gli interessi economici, le relazioni con il pubblico, l'accettabilità e le condizioni al contorno.

I criteri per la selezione dei siti possono essere, inoltre, differenti a seconda della tipologia dell'installazione nucleare, delle sue caratteristiche tecniche e delle mutue interazioni con il territorio, ma in tutti i casi detti criteri derivano dall'applicazione estensiva dei principi generali di sicurezza e radioprotezione, normati, principalmente, dalla Legge 31 dicembre 1962, n. 1860 e dal Decreto Legislativo 17 marzo 1995, n. 230.

In ultima analisi, va rilevato, quindi, che la selezione dei siti per l'installazione di impianti nucleari non può essere considerato disgiuntamente dall'intero processo di *commissioning* e che dovrebbe far parte del piano generale, stabilito a priori, integrato con le scelte tecnologiche e di *policy*.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	5	47

1. I SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI¹

Le problematiche inerenti il territorio e l'ambiente con cui le attività antropiche interagiscono, delineano un intreccio di situazioni in cui è necessario fornire efficaci strumenti e servizi per un corretto sviluppo di azioni di programmazione e gestione. I Sistemi Informativi Territoriali (SIT), più comunemente noti come Geographical Information Systems (GIS), hanno queste prerogative e i Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS - Decision Support System) consentono, trattando i dati in modo complesso e sofisticato, di sintetizzare scenari fruibili per chi deve assumere decisioni sostenibili per il territorio e la popolazione.

1.1. ANALISI ED EVOLUZIONE DEI GIS

I GIS sono uno degli strumenti più utili per fornire indicazioni concrete nelle azioni di pianificazione e programmazione delle attività antropiche sul territorio e sull'ambiente. Utilizzando degli insiemi di dati georiferiti, opportunamente memorizzati in database strutturati, i GIS possono fornire ai decisori gli elementi per esprimere una valutazione sulle problematiche derivanti dall'interazione tra attività antropiche e ambiente. Risulta quindi ovvio che la sua applicazione nelle fasi preliminari dell'analisi territoriale per l'ubicazione di un deposito di rifiuti radioattivi, è quanto meno auspicabile, se non addirittura necessaria, proprio per fare propria quella cultura della previsione che deve permeare tutto il processo di valutazione e selezione di un sito per una simile opera antropica.

Solo la combinazione di specifiche componenti hardware e software permette la fruizione dei dati geografici, che comunque costituiscono l'elemento fondamentale di un GIS; infatti è ormai noto che la loro raccolta rappresenta il costo maggiore nella realizzazione di un simile sistema informatico. Questo perché i dati stessi devono rispondere a precise caratteristiche di accuratezza, omogeneità, continuo aggiornamento, ecc. A questo aspetto si affianca poi la necessità di realizzare uno specifico modello dei dati, cioè una loro rappresentazione astratta che permetta la creazione di una struttura ordinata in cui i dati possano essere inseriti e collocati, ciascuno in funzione delle loro caratteristiche.

I GIS possono essere anche utilizzati come Sistema di Supporto alle Decisioni, cioè lo strumento che offre al decisore gli elementi oggettivi per supportare tecnicamente una propria decisione su un particolare tema tecnico, rispondendo prima di tutto alla domanda *cosa succede se....?* Questo è possibile grazie a specifici algoritmi di modellazione del fenomeno che si vuole rappresentare, in modo da proiettare nel futuro la dinamica del fenomeno stesso in particolari condizioni al contorno. Le applicazioni in questo campo sono notevoli, se si pensa anche solo alla gestione delle emergenze, alla pianificazione dei rischi naturali, ecc.


I sistemi GIS sono in continua evoluzione, visto che trovano sempre un maggiore spazio applicativo e rispondono alle necessità di numerose figure professionali che operano nel campo tecnico scientifico. Questo comporta che questi strumenti evolvano continuamente si diversifichino, anche in funzione delle innovazioni tecnologiche correnti, con particolare riferimento agli strumenti informatici. Infatti va sempre più affermandosi anche l'impiego di strumenti GIS orientati agli oggetti (*object-oriented*) che permettono di astrarre degli elementi della nostra realtà raggruppandoli in oggetti caratterizzati da attributi e funzioni di interazione con il mondo esterno. L'oggetto costituisce proprio uno degli elementi del mondo reale, quale può essere un fiume, un unità di suolo o di un versante, ecc.

Ulteriori sviluppi riguardano l'architettura stessa dei GIS e in particolare gli aspetti legati alla distribuzione su network degli elementi fisici di questo strumento e dei suoi servizi, che si rifanno essenzialmente ai concetti della programmazione e dei servizi distribuiti, sempre più diffusi in Internet. Sono nati quindi i GIS orientati alla rete, che, sebbene più complessi dei precedenti, trovano sempre maggiore diffusione e applicazione nel contesto scientifico.

¹ In collaborazione con G. Fattoruso, UTPP-MDB, CR ENEA Portici

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP4 - 006	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 6 47
--	---	------------------	----------------------	------------------------

Nell'appendice 1 è riportata una specifica descrizione delle caratteristiche, tipologia e applicabilità dei sistemi GIS, che può fornire una visione più dettagliata delle proprietà e delle funzionalità di questo strumento nel contesto ambientale.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	7	47

2. LE PROBLEMATICHE INERENTI LA SELEZIONE DI SITI IDONEI AD OSPITARE IMPIANTI PER LO SMALTIMENTO DEI RIFIUTI RADIOATTIVI A BASSA ATTIVITÀ.

Le linee guida inerenti la selezione di siti idonei ad ospitare impianti per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa attività derivano essenzialmente da quanto definito nei Safety Standards IAEA: “Near surface disposal of radioactive waste: Safety Requirements” (1999), “Siting of near surface disposal facilities” (1994) e “Safety assessment for near surface disposal of radioactive waste” (1999).

Nella totalità dei "casi di studio", utilizzati nella definizione degli standard menzionati, risulta evidente che le tematiche da tenere in considerazione, nel caso della selezione di un sito per la realizzazione di un deposito superficiale per lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi, sono principalmente:

- Geologia;
- Idrogeologia;
- Geochimica;
- Tettonica e sismicità;
- Processi morfologici superficiali;
- Meteorologia;
- Eventi indotti dall'uomo;
- Trasporto dei rifiuti;
- Uso del suolo;
- Distribuzione delle popolazione;
- Protezione ambientale.

La metodologia adottata può essere riassunta in quattro punti:

1. Definizione e applicazione della serie di criteri di esclusione implementabili in un sistema informativo territoriale e coerenti con le informazioni territoriali disponibili su tutto il territorio nazionale (analisi GIS di primo livello).

2. Iterazione della definizione e applicazione di criteri di esclusione su porzioni più ristrette del territorio nazionale ma a livelli di maggiore dettaglio di scala (analisi GIS di secondo livello).


3. Definizione e implementazione nel sistema informativo di una procedura di analisi parametrica sui singoli fattori fisici che determinano l'idoneità e descrivono le condizioni antropiche e infrastrutturali delle aree. Ciò utilizzando dati a scala locale e inserendo giudizi professionali (analisi GIS di terzo livello)

4. Selezione e classificazione delle aree potenzialmente idonee applicando una procedura appositamente sviluppata per il calcolo del grado di idoneità e dell'indice di inserimento territoriale.

Il lavoro delle analisi territoriali viene quindi svolto per gradi ed è strutturato su tre livelli di dettaglio per scendere dall'analisi dell'intero territorio nazionale alle valutazioni a scala locale sulle aree individuate.

2.1. ANALISI PROPEDEUTICHE E STRUMENTI PER LA SELEZIONE DI SITI SUL TERRITORIO NAZIONALE

Nel documento XRADTRI-P9LU-009 Rev. 0 sono stati definiti e illustrati i criteri di esclusione per la scelta delle aree più idonee per l'ubicazione del deposito, nonché gli strumenti GIS oggi disponibili per la selezione più idonei. In particolare erano stati descritti i criteri di esclusione che tecnicamente erano applicabili per la selezione del territorio nazionale, che dovevano rispondere a precise condizioni sismiche e tettoniche, geotecniche e di stabilità dei versanti, esondabilità dovuta alla dinamica dei corsi d'acqua, ecc. A queste condizioni venivano ovviamente affiancati anche gli aspetti legati alle condizioni socio-economiche delle aree, quali la presenza di centri abitati, di siti di particolare interesse naturalistico, archeologico, ecc.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP4 - 006	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 8	di 47
--	---	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Sulla base di quanto esposto in precedenza l'architettura logica di un GIS che oggi giorno abbia come obiettivo la selezione di siti idonei ad ospitare impianti di stoccaggio di rifiuti radioattivi a bassa attività dovrà possedere un'architettura logica del tipo di quella illustrata in Figura 2.1.

Per comodità di interpretazione gli argomenti trattati sono stati organizzati in impatti delle attività umane o dell'ambiente sull'opera ed impatti dell'opera sull'ambiente.

Un altro elemento di importanza fondamentale da tenere in considerazione è che i dati utilizzati per implementare il GIS devono essere prodotti e certificati da Enti pubblici, con mansioni specifiche sugli argomenti trattati, tra cui ISPRA ed INGV sopra tutti ed Enti tecnici regionali. Soltanto laddove il dato non esiste si può considerare l'ipotesi di accedere a dati privati o a dati forniti da altri enti pubblici o a formarli ex novo. La certificazione del dato è infatti di notevole importanza al fine del raggiungimento del consenso.

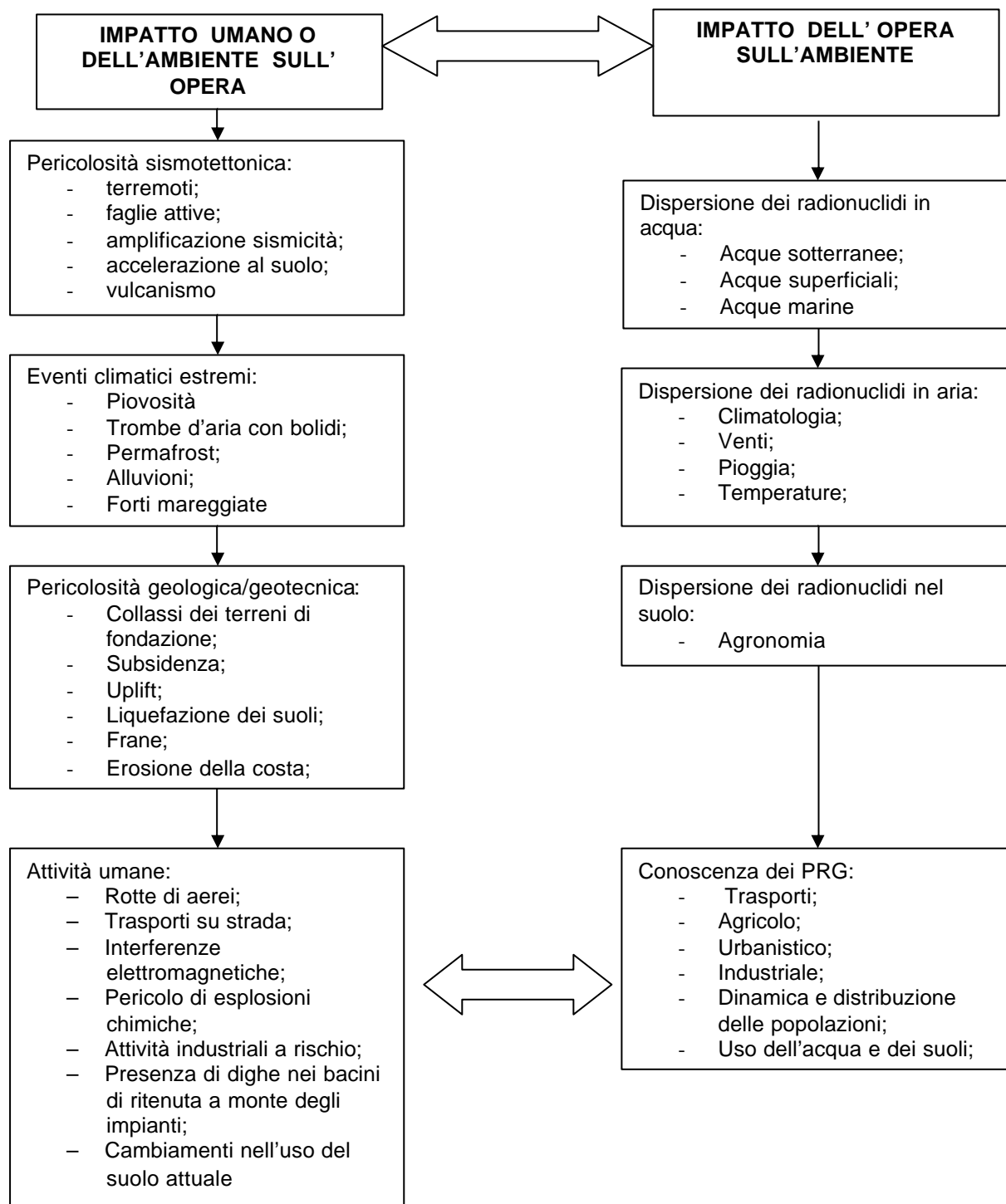



Figura 2.1 – Architettura logica di un GIS ed interazione delle componenti da analizzare per la selezione di larga massima di siti idonei ad ospitare un impianto di stoccaggio dei rifiuti radioattivi a bassa attività.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	10	47

3. I COMPARTI AMBIENTALI DA CONSIDERARE IN TERMINI DI IMPATTO UMANO E DELL'AMBIENTE SULL'OPERA

In questa fase andranno fondamentalmente assommate le caratteristiche ingegneristiche del deposito con le caratteristiche ambientali del sito e/o dei siti prescelti nella prima fase, e valutata la loro compatibilità con l'ambiente. L'insieme di tali dati oltre ad essere necessario ai fini della progettazione esecutiva del deposito, costituisce la base conoscitiva per la realizzazione dei modelli matematici per la definizione degli scenari di rischio e per il monitoraggio dell'impianto.

La componente geologica del sistema può essere essa stessa ulteriore elemento di sicurezza, in termini di "barriera naturale", ma anche fonte di instabilità. In particolare per la migliore progettazione delle opere ingegneristiche, i siti dovranno essere caratterizzati in modo tale che le diverse fonti di pericolosità che vi possono incidere, siano tutte adeguatamente sotto controllo. Con il termine di pericolosità in una certa area, nel contesto dei fenomeni naturali, si intende la probabilità di accadimento di un evento naturale pericoloso con una certa intensità o magnitudo, in un determinato periodo temporale.

La caratterizzazione e la modellazione geologica pura dovrà definire l'assetto geologico stratigrafico delle litologie presenti in loco, determinando i rapporti stratigrafici tra le formazioni e la distribuzione spaziale dei litotipi. Sarà anche opportuno ricostruire i probabili fenomeni che hanno condizionato l'attuale assetto geologico-strutturale e neotettonico delle formazioni affioranti.

Con lo studio geologico-strutturale o tettonico dell'area, a complemento al precedente, si vuole giungere ad un modello tettonico di massima dei siti prescelti, basato sulla raccolta dei dati e degli studi già oggi presenti. Questo lavoro, opportunamente implementato con le informazioni sismologiche, potrà anche fornire un'adeguata visione sismo-tettonica dei settori indagati, correlando le informazioni che derivano dall'assetto strutturale delle formazioni geologiche presenti, con i dati delle principali espressioni sismogenetiche rilevate.


L'inquadramento geomorfologico di un'area fornisce sicuramente una visione generale sull'assetto dei bacini idrografici, sulla distribuzione degli elementi rilevanti per la dinamica dei versanti, ecc., ma fornisce anche utili informazioni sulla dinamica strutturale. Le forme superficiali sono infatti espressione della tettonica che ha interessato in tempi passati e recenti il territorio.

La scala di indagine deve variare da quella regionale fino a quella locale, per identificare progressivamente gli elementi di maggiore rilievo. Quindi le indagini dovranno progressivamente addentrarsi nel dettaglio nel quadro conoscitivo, partendo da un'analisi di massima a livello della regione territoriale, con un'estensione dell'ordine di grandezza di alcune decine di chilometri; conseguentemente si dovrà esplicitare un maggiore dettaglio nelle zone adiacenti il sito, concentrandosi su elementi locali.

3.1. SISMOTETTONICA E PERICOLOSITÀ CORRELATA

L'analisi strutturale di dettaglio nelle aree prescelte per l'ubicazione del sito dovrebbe evidenziare, oltre alle principali strutture tettoniche, la presenza di eventuali sistemi di fratture, di elementi derivanti dalla deformazione duttile dei corpi rocciosi o altre discontinuità strutturali, per valutare la loro importanza nel contesto della migrazione dei radionuclidi all'esterno del sito e nel contesto delle sollecitazioni indotte dalle/sulle infrastrutture del deposito.

Gli elementi strutturali che dimostrano uno stato di attività corrente (ad esempio le faglie attive) dovrebbero essere approfonditamente indagate per verificare il rischio diretto o indiretto nell'area. Un buono studio geologico-strutturale evidenzierà quindi tipologia, estensione e dimensione delle discontinuità presenti, evidenziando anche l'entità della permeabilità secondaria che rappresenta il parametro principale da tenere in considerazione per la migrazione dei fluidi nel sottosuolo roccioso. Nel caso di terreni, le indagini vanno anch'esse orientate alla definizione dei parametri geotecnici che regolano la loro resistenza alle sollecitazioni (angolo di attrito, coesione, ecc.).

	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	11	47

Nell'analisi di dettaglio, gli elementi neotettonici locali rappresentano un indizio fondamentale per prevedere la futura evoluzione geodinamica e devono essere attentamente valutati per avere un quadro esaustivo dell'assetto tettonico. Infatti tutti i processi che interessano la superficie crostale, quali i deflussi idrici all'interno dei bacini, il dissesto dei versanti, ecc. possono essere pesantemente regolati dalla geodinamica attuale e futura. Ad esempio i fenomeni quali la subsidenza possono comportare ripercussioni pesanti sull'assetto dei bacini idrografici, variandone la morfologia e il regime dei corsi d'acqua.

3.1.1. I terremoti

La raccolta dei dati sismologici passati e di tutte le informazioni rilevanti in questo contesto, costituisce il fondamento per dirimere ulteriormente la comprensione sulla pericolosità sismo-tettonica dell'area prescelta o di più aree ritenute idonee. In particolare lo studio sismo tettonico dovrà portare all'individuazione delle strutture sismogenetiche principali, valutando quale possa essere la ripercussione della loro dinamica futura sull'area prescelta.

Il dettaglio delle informazioni raccolte, soprattutto in riferimento all'ubicazione dei sismi storici (ipocentro ed epicentro), alla loro magnitudo, all'intensità stimata presso l'area, ecc., rappresenta un elemento importante per effettuare previsioni serie ed affidabili sul rischio sismico. Da sottolineare che tali previsioni assumono ancora maggiore importanza visto che sono utilizzate per la progettazione delle opere, definendo il sisma di riferimento o di progetto sulla base di analisi e modellazioni specialistiche.

Nei confronti di ogni effetto sismico, dovranno essere rispettate le seguenti condizioni:

- il sito dovrà essere caratterizzato da una bassa probabilità che si verifichi nell'arco di vita dell'opera in oggetto un sisma tale da produrre uno scuotimento sufficiente a danneggiare strutturalmente gli impianti;
- dovranno essere considerati con attenzione quei contesti geologico-geomorfologici atti a produrre effetti di amplificazione del moto sismico (macro- e micro-zonazione sismica, di cui ai successivi paragrafi).


Si può, in modo indicativo, scegliere come indice di scuotibilità l'accelerazione di picco del terreno (PGA) prodotta dalla propagazione delle onde sismiche. Questo è un parametro largamente utilizzato per il dimensionamento antisismico delle opere ingegneristiche. Non è il più sofisticato (a differenza di spettri ed accelerogrammi di progetto), ma la sua determinazione con metodologie probabilistiche è relativamente agevole e fornisce risultati sufficientemente attendibili.

Per il rischio sismico è opportuno partire dalla Carta della Macrozonazione Sismica del territorio italiano da cui è già possibile avere una prima visione dei problemi di un'aprticolare area. Per identificare e valutare la presenza di elementi sismo-genetici attivi, in grado di costituire un rischio oggettivo per le infrastrutture del deposito, può essere effettuata un'analisi sulla base delle informazioni derivanti dal progetto ITHACA (Italy HAZard from CApable faults).

3.1.2. Presenza di faglie attive

L'esistenza di faglie attive, o altri elementi strutturali capaci di interessare con la loro dinamica l'area di deposito, deve essere uno degli elementi discriminanti per la scelta di un'area, visti i potenziali effetti negativi che i suoi movimenti possono indurre. In particolare è obbligatorio rilevare l'esistenza di recenti fenomeni che dimostrino l'attivazione della faglia stessa, cui si affiancano ovviamente tutte le valutazioni sismiche associate.

In caso di faglie attive si dovrebbe approfondire l'analisi geologica, mediante individuazione degli elementi di dettaglio, quali ad esempio le caratteristiche geometriche e l'eventuale cinematica della struttura; tali informazioni dovranno essere incrociate con eventuali dati paleosismologici. A queste considerazioni vanno aggiunte anche le valutazioni su faglie non più attive, tenendo conto della possibilità che possano in qualche modo essere riattivate.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	12	47

3.1.3. Microzonazione sismica e amplificazione della sismicità

Per verificare l'esistenza di condizioni geologico - stratigrafiche tali da amplificare la sismicità locale, sono necessarie analisi, rilievi stratigrafici localizzati e determinazioni relative ai parametri meccanici dei materiali presenti, nonché studi geomorfologici e territoriali, che portino alla luce tutti quegli elementi che in qualche modo possono amplificare la risposta sismica di un'area. In generale la microzonazione sismica delle aree ritenute idonee è necessaria per approfondire gli aspetti di dettaglio sul rischio sismico.

A questi studi si deve affiancare ovviamente l'impiego di strumenti di modellazione (codici di calcolo, preferibilmente con un approccio di tipo bidimensionale) per le previsioni del rischio, basandosi su dati di terreno rilevati con estrema precisione, al fine di poter valutare la risposta del terreno o delle rocce alle sollecitazioni sismiche.

La microzonazione sismica ha lo scopo di riconoscere ad una scala sufficientemente di dettaglio le condizioni di sito che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico atteso (moto sismico di riferimento) o possono produrre effetti cosismici rilevanti (fratture, frane, liquefazioni, ecc.) per le costruzioni e le infrastrutture. Lo studio di microzonazione restituisce una mappa del territorio nella quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico viene amplificato (e su quali frequenze questa amplificazione avviene) a causa delle caratteristiche morfologiche, strutturali, stratigrafiche e geotecniche dei terreni;
- le zone in cui sono presenti, o suscettibili di attivazione, dissesti o deformazioni del suolo dovuti al sisma o incrementati da esso.

L'assetto geologico locale esercita un'importante influenza sulla distribuzione areale del danneggiamento prodotto da un terremoto. I rilievi macrosismici nei momenti immediatamente successivi a forti eventi sismici italiani hanno evidenziato la dipendenza del grado di danno dalle caratteristiche meccaniche dei depositi superficiali e dall'assetto geomorfologico locale.


Non esistono vere e proprie linee guida per la microzonazione sismica. Ciò dipende dalla difficoltà di fornire una metodologia universalmente applicabile che risponda efficacemente a pochi fondamentali requisiti. Il più importante riguarda la congruità tra la metodologia d'indagine adottata e il livello di sismicità dell'area presa in considerazione.

Il livello di sismicità è fondamentale per stabilire quali siano gli effetti del sito che richiedono indagini dettagliate. Ad esempio, la valutazione di un comportamento deformativo non lineare di un terreno è poco importante in zone dove il potenziale sismico non produce terremoti con magnitudo elevata, mentre assume forte rilevanza in zone con un significativo potenziale sismico.

La definizione del moto sismico di input, da cui ricavare il segnale di ingresso per la valutazione delle eventuali amplificazioni locali è uno dei punti di partenza di una microzonazione. In sostanza occorre definire un livello di "terremoto di riferimento" per il quale determinare l'entità dei fenomeni di amplificazione locale, dovuti alle particolari condizioni geologiche, geotecniche e geomorfologiche del sito. Il risultato potrà essere raggiunto o attraverso l'utilizzo di dati di pericolosità sismica di base già disponibili a scala nazionale, o attraverso l'individuazione di eventi specifici aventi un definito livello di probabilità di superamento.

Il moto di riferimento serve alla determinazione degli accelerogrammi da utilizzarsi per le analisi nel dominio del tempo. In tal caso dalla valutazione di pericolosità in termini di spettri di risposta elastici a probabilità uniforme di superamento (10% in 50 anni) si determineranno o accelerogrammi sintetici non stazionari o accelerogrammi reali compatibili con il livello di terremoto di riferimento.

All'analisi di pericolosità condotta in termini probabilistici si accompagnerà un inquadramento generale della sismicità dell'area interessata dal terremoto effettuata su base storica. Inoltre si potranno effettuare analisi su base deterministica volte a quantificare gli effetti anche per eventi con contenuti energetici medi e grandi. I risultati di queste analisi potranno essere utilizzati per valutare la sensibilità dei risultati di microzonazione all'input sismico e per confrontarli con quelli ottenuti utilizzando l'input sismico probabilistico.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	13	47

3.1.4. *Vulcanismo*

Il rischio derivante dall'attività vulcanica sul territorio italiano è meno rilevante, dal punto di vista della sua distribuzione areale, rispetto al rischio sismico, ma va comunque tenuto in debita considerazione. A priori comunque la riduzione sostanziale della possibilità che l'attività vulcanica possa interessare il deposito si ottiene semplicemente con l'esclusione delle aree potenziali o sostanziali interessate dall'attività vulcanica, oggi o in età storica.

L'Italia meridionale presenta aree in cui si concentrano vulcani attivi che storicamente hanno dimostrato un potenziale distruttivo notevole. Le cronache storiche ricordano ovviamente solo una minima parte di quest'attività, che però ha lasciato segni tangibili sui territori circostanti, come rilevabili in prossimità delle aree vesuviane, dei Campi Flegrei, nelle aree adiacenti l'Etna. L'attività dei vulcani insulari italiani (primi tra tutti Stromboli, Vulcano, Lipari) possono comportare un rischio indiretto all'interno della penisola, che comunque viene ritenuto poco probabile e a basso impatto.

3.2. *ASPETTI GEOLOGICI E GEOTECNICI CHE POSSONO INFLUIRE SULLA PERICOLOSITÀ DI UN'AREA*

Le caratteristiche geomeccaniche dell'eventuale roccia in posto e le caratteristiche geotecniche dei terreni costituiscono un altro elemento che deve guidare la scelta circa l'idoneità di un'area per l'ubicazione di un deposito di rifiuti radioattivi. Queste considerazioni devono ovviamente abbracciare ad ampio raggio tutte le considerazioni geologico-tecniche che intervengono nell'area, come ad esempio quelle che determinano la dinamica dei versanti, i fenomeni di subsidenza.

Le caratteristiche tecniche delle litologie presenti devono essere valutate per definire il comportamento alle sollecitazioni indotte dalla realizzazione e dall'esercizio dell'infrastruttura, ma anche per prevedere il loro comportamento come mezzo che permette di veicolare eventuali radionuclidi verso la biosfera; queste ultime considerazioni devono essere fatte non solo per la migrazioni delle componenti liquide, ma bensì anche per le componenti gassose che eventualmente potrebbero generarsi e liberarsi dal deposito stesso.

Gli studi che stanno alla base della definizione del rischio geologico e geotecnico nel contesto della realizzazione del deposito si potranno quindi basare su:

- definizione dell'assetto stratigrafico e strutturale dell'area, con particolare riguardo alla ricostruzione degli spessori e delle geometrie delle unità del substrato e delle coperture detritiche e alluvionali (come già evidenziato nei precedenti paragrafi), discriminando i depositi naturali dai materiali di origine antropica;
- ricostruzione della stratigrafia e qualificazione geotecnica dei differenti litotipi, finalizzate alla caratterizzazione del comportamento alle sollecitazioni;
- definizione dell'assetto geomorfologico e dei processi morfoevolutivi e identificazione dei versanti potenzialmente instabili, con caratterizzazione della franosità.

In base ai dati geologici e geomorfologici si potrebbe quindi effettuare una zonazione in funzione del potenziale rischio o della potenziale pericolosità, tenendo conto delle zone stabili, delle zone potenzialmente instabili (ad esempio per la presenza di frane quiescenti sui versanti), delle zone con terreni di fondazione particolarmente scadenti (per la presenza di litotipi con parametri geotecnici scadenti), ecc.

3.2.1. *Caratterizzazione geotecnica e rischio per le strutture fondazionali*

3.2.1.1. Caratteristiche geomeccaniche e parametri geotecnici

I parametri geotecnici definiscono il comportamento dei terreni o delle rocce alle sollecitazioni indotte dall'esterno. In particolare questi aspetti hanno due valenze:

	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	14	47

- a breve termine per definire il comportamento dei terreni di fondazione alle sollecitazioni indotte dalla realizzazione dell'opera;
- a medio-lungo termine per definire il comportamento della barriera geologica alle condizioni correnti e agli scenari che potrebbero eventualmente crearsi nel futuro.

I fenomeni che interessano le proprietà geomeccaniche delle rocce e geotecniche dei terreni, possono risultare importanti anche per la dinamica dei fluidi nei relativi sistemi. Infatti fenomeni di creeping, aumento del numero di fratture e della loro estensione, ecc. possono aumentare notevolmente la permeabilità secondaria delle eventuali rocce ospiti, modificando la dinamica di trasporto dei fluidi e quindi degli inquinanti.

Le proprietà termiche delle rocce e dei sedimenti e la conseguente modifica delle loro caratteristiche devono essere tenute in debito conto, per gli aspetti di generazione del calore derivante dalla presenza di particolari tipologie di rifiuti radioattivi all'interno del deposito.

L'influenza delle acque sotterranee sui parametri geotecnici da cui dipende la stabilità delle fondazioni è ormai nota; i calcoli sul dimensionamento delle fondazioni devono tenere conto di questo aspetto, che però può anche influire dal punto di vista chimico, soprattutto in relazione alla tenuta dei cementi. La presenza di acqua su un terreno di fondazione influisce sulle pressioni interstiziali in risposta alle tensioni esterne, variando la resistenza al taglio del terreno. In questo caso le considerazioni geotecniche vanno fatte sia in condizioni drenate che non drenate (per esautività di studio) verificando il comportamento nel breve e nel lungo termine.

3.2.1.2. Prove in situ e di laboratorio per definire i parametri geomeccanici e geotecnici

Per la determinazione dei parametri geotecnici delle rocce e dei terreni che verranno interessati dalla realizzazione del deposito, saranno opportune prove geognostiche indirette (geosismica e geoelettrica in particolare) e dirette (prove penetrometriche, prove scissometriche, prove di resistenza al taglio e di compressibilità, ecc.). Le prime forniranno informazioni che andranno integrate e convalidate con i dati derivanti dalle prove geognostiche dirette.

Ovviamente queste ultime andranno indirizzate in particolare dai risultati ottenuti dai sondaggi stratigrafici che permettono di definire la stratigrafia di dettaglio delle aree, spinti fino ad una profondità in cui si ritiene ragionevole l'influenza delle opere in progetto. Sulla base della loro esecuzione e dei loro risultati sarà quindi possibile indirizzare ulteriori prove di approfondimento, per definire eventuali aspetti geotecnici o geomeccanici di interesse. Le sollecitazioni indotte da eventi esterni, primi tra tutti gli eventi sismici, devono essere tenute in debito conto per il dimensionamento delle fondazioni e per le valutazioni strutturali su cui basare la realizzazione delle infrastrutture del deposito. Per questo motivo è fondamentale definire un sisma di progetto sul quale dimensionare le strutture.

Una raccolta degli studi geologico-tecnici condotti nell'area di studio per finalità differenti (ad esempio per la realizzazione di infrastrutture, per l'attuazione dei piani d'area o di tutela del territorio, ecc), può costituire un valido ausilio come primo inquadramento di questi aspetti.

3.2.2. Fenomeni gravitativi

Il territorio italiano si è sempre dimostrato, per le sue caratteristiche intrinseche, molto vulnerabile ai fenomeni di dissesto idrogeologico, con particolare riferimento all'instabilità dei versanti. Si pensi ad esempio che nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, realizzato dall'ISPRA e dalle Regioni e Province Autonome, sono stati censiti circa 485.000 fenomeni franosi, per un'area approssimativa di quasi 21.000 km², cioè poco meno del 7% dell'intero territorio nazionale.

Un apparente aumento degli eventi di dissesto trova risposta in un contesto territoriale che è profondamente mutato nello scorso secolo: l'occupazione e l'utilizzo di aree che prima erano marginali si è fatto sempre più pressante, interessando anche zone che hanno da sempre dimostrato chiari segni di un dissesto idrogeologico in atto; a questo fatto si sono affiancati i mutamenti climatici ormai riconosciuti, che presentano, tra le altre cose, piovosità molto intense, concentrate in periodo di tempo molto ristretti; cioè uno dei fattori scatenanti delle problematiche citate.

Consci degli errori commessi in passato in questo ambito e delle caratteristiche geologico-territoriali del paese, si dovrà prestare particolare attenzione a questi aspetti negli studi inerenti l'ubicazione del deposito. Nelle fasi di screening delle aree ritenute idonee sarebbe quindi opportuno ridurre al minimo il rischio, selezionando aree non interessate da questi fenomeni di instabilità.

Il primo screening per verificare l'eventuale instabilità dei versanti consiste nella consultazione dell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, sopra citato. Il progetto ha portato alla realizzazione di una cartografia tecnica specifica sui fenomeni di instabilità, in parte consultabile anche via Internet. I principali parametri sui fenomeni franosi di interesse possono essere reperiti nel Rapporto sulle frane in Italia, sempre edito da ISPRA, nel 2007.

Ovviamente queste informazioni rappresentano solo una prima indicazione dei fattori che possono escludere simili fenomeni. Le aree giudicate positivamente dovranno essere comunque oggetto di un dettagliato studio sui versanti che possono in qualche modo interessare le infrastrutture in progetto. Solo in questo modo si potrà dimostrare, con estrema sicurezza, l'assenza di fenomeni di dissesto più o meno localizzati.

L'analisi di foto aeree e satellitari, nonché l'interpretazione della cartografia tecnica di settore, fornirà ulteriori utili elementi a completamento di quanto desunto dal precedente studio. A queste informazioni si dovranno affiancare i dati provenienti da specifici rilievi di terreno, effettuati nelle aree giudicate instabili, per definire i meccanismi cinematici in grado di provocare fenomeni franosi e per identificare i fattori predisponenti (giaciture, stratigrafie, pendenze, ecc.) e determinanti (probabilità di determinati scuotimenti sismici, di precipitazioni estreme, ecc.).

3.2.2.1. Stabilità dei versanti costituiti da materiali sciolti

I principali fattori che possono influenzare localmente la stabilità di un versante sono legati alla natura geologico-strutturale e geotecnica del versante stesso, ma anche a caratteri geomorfologici e naturalistici, primi tra tutti la presenza di vegetazione. In particolare l'analisi di stabilità per i versanti dovrà tenere conto di:

- giacitura di eventuali stratificazioni delle rocce e dei terreni in posto;
- presenza e giacitura di faglie, fratture o altri elementi strutturali lineari o planari;
- acclività dei versanti;
- permeabilità dei terreni e deflusso sotterraneo;
- caratteristiche geotecniche dei terreni mediante prove in situ e di laboratorio (compattazione, densità, angolo di resistenza al taglio, coesione, ecc.).

Come già accennato, a questi ovviamente si affiancano altri elementi:

- presenza di vegetazione;
- assetto idrologico della superficie del versante;
- regime delle precipitazioni.

Fattori determinanti che possono scatenare un fenomeno franoso possono riferirsi ad eventi improvvisi quali forti precipitazioni ed eventi sismici, ma anche a processi di progressivo scalzamento al piede del versante, dovuto all'azione erosiva dei corsi d'acqua, del mare, dei venti, o addirittura alle attività antropiche, oppure aumento del carico sul versante stesso.

In caso di instabilità pregresse del versante è fondamentale capire la quiescenza e la possibilità di riattivazione di determinati fenomeni di instabilità. In particolare se eventuali frane si dimostrano attive e danno chiari segni morfologici di movimenti in atto, anche lenti ma comunque progressivi (assenza di vegetazione, presenza di fratture sul suolo, terreno rimobilizzato, pendenze non consone con la geometria del versante, ecc.). Allo stesso modo è opportuno definire la presenza di frane quiescenti, che in particolari condizioni potrebbero essere riattivate. Su entrambe l'attività di rilievo comporterà la necessità di identificare con precisione l'area di interesse, nonché la profondità del corpo di frana coinvolto e tutti i parametri necessari alla qualificazione del fenomeno.

I corpi di frana eventualmente stabilizzati vanno anch'essi identificati, soprattutto per qualificare le caratteristiche geotecniche dei terreni coinvolti. Dovrà essere posta attenzione all'individuazione dei

fenomeni di creeping, cioè i movimenti che interessano la sezione più superficiale di un versante, con una velocità molto ridotta ma quasi continua.

E' opportuno definire con certezza quale tipologia di movimento ha interessato una certa area, cioè la tipologia di frana verificata (frana per scivolamento rotazionale o traslativo, per colamento, frane complesse, movimenti gravitativi profondi, ecc.). Questo per identificare i possibili fattori predisponenti e i meccanismi determinanti, che potrebbero ripetersi e che vanno adeguatamente prevenuti con interventi mirati: regimazione delle acque superficiali, consolidamento di aree instabili, bonifiche strutturali, ecc.

3.2.2.2. Stabilità dei versanti in roccia

Per i versanti rocciosi è fondamentale indagare le capacità che la roccia in posto dimostra per opporsi alle instabilità locali, quindi si dovranno definire alcuni parametri mediante prove di laboratorio su provini opportunamente campionati, quali la resistenza del materiale alla compressione, agli sforzi di taglio, ecc., mediante compressione semplice e triassiale, carico puntuale, trazione indiretta, ecc.; l'obiettivo è quello di determinare il criterio di rottura, cioè le funzioni che legano la resistenza del materiale stesso e gli stress applicati.

Ovviamente gli studi di caratterizzazione devono anche essere riferiti ad eventuali ammassi rocciosi nel loro complesso, ricorrendo a metodi di caratterizzazione indiretti che genericamente si basano sullo studio delle discontinuità e dei giunti (giaciture, spaziature, riempimenti, recenti attivazioni, ecc.), sui modelli matematici sulle back analysis, ecc. In questo caso esistono sistemi di classificazione molto utili per qualificare un ammasso e quindi indirettamente un versante, quali la classificazione geomeccanica di Bieniawski, la classificazione Slope Mass Rating, ecc. Queste però vanno poi integrate con opportune indagini dirette per avere una visione più dettagliata e pragmatica e poter considerare nel dettaglio la situazione di stabilità.

3.2.3. Fenomeni di subsidenza

Il progressivo e lento abbassamento del livello del suolo in alcune regioni del nord Italia ha toccato livelli veramente preoccupanti, soprattutto nel dopoguerra, quando il fenomeno è stato ulteriormente pronunciato dall'estrazione di fluidi dal sottosuolo e da altre attività antropiche.


Le cause originarie sono comunque da ricercarsi in fenomeni naturali:

- aumento del carico litostatico (nelle regioni deltizie a causa del continuo apporto di sedimenti) favorito ovviamente anche dalle condizioni geologiche strutturali del sottosuolo, nonché dalla circolazione dei fluidi;
- variazioni eustatiche;
- diagenesi dei sedimenti;
- movimenti tettonici che comportano dinamiche flessionali;
- raffreddamento dei magmi in aree vulcaniche, che può comportare la contrazione delle strutture e il conseguente abbassamento del suolo;
- ecc.

A questi si affianca l'intervento antropico, che può accelerare il fenomeno, soprattutto in seguito al prelievo di fluidi e gas dal sottosuolo, che hanno solitamente un impatto areale ad ampia scala. In alcuni casi però l'opera dell'uomo si rivela anche a piccola scala, ad esempio per effetto del sovraccarico indotto dalla realizzazione di particolari opere.

L'analisi geologica e strutturale a scala di bacino, opportunamente affiancata dai risultati di indagini geosismiche e dati stratigrafici ha portato all'individuazione delle aree italiane maggiormente soggette a subsidenza. In particolare le aree della pianura padano-veneta e dell'Emilia Romagna hanno in passato visto il verificarsi di tale fenomeno, fino a livelli che hanno consigliato ad esempio la limitazione dei prelievi di fluidi e gas dal sottosuolo; dagli anni '60 agli anni '80 del novecento si sono addirittura registrate abbassamenti di oltre 2,5 m nel bolognese e nel ravennate, per una concomitanza di effetti naturali e antropici.

Queste due regioni ovviamente sono state coinvolte per notevoli estensioni. Ma il fenomeno è stato rilevato anche in altre aree del paese, anche se in forma più limitata dal punto di vista areale, sebbene con

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	17	47

entità simili in termini di abbassamento del livello del suolo. Tra queste le aree dei grandi agglomerati urbani del nord Italia come Milano, in seguito agli enormi prelievi idrici per finalità d'uso industriale e potabile degli anni del boom economico; poi ancora quelli rilevati e studiati più recentemente nella Pianura Pontina e nell'area calabrese della Piana di Sibari.

In generale questi fenomeni sono abbastanza conosciuti e studiati, quindi si può prevedere, mediante opportuni studi e modellazioni, l'eventuale tasso annuale di subsidenza, onde giudicare o meno se un'area è adatta o meno ad ospitare il deposito. E' ovvio che un processo di subsidenza generato unicamente da processi naturali, non può essere arrestato ed quindi opportuno individuare aree che non ne risentano per ubicarvi una simile infrastruttura.

3.2.4. Uplift

Per uplift s'intende il sollevamento di una determinata area come conseguenza di fenomeni tettonici s.s., vulcanici (Bradismo) o isostatici. Dovranno essere pertanto escluse quelle aree riportate in forte sollevamento nel corso degli ultimi 500.000 anni come indicato sulla Carta Neotettonica d'Italia edita dal CNR. A tali aree andranno associate le aree vulcaniche, peraltro già escluse per motivi di sicurezza legati ai fenomeni eruttivi ed effusivi, soggette anche a forti bradisismi (vedi Pozzuoli). Il rischio legato ad uplift è sostanzialmente legato a sollevamenti differenziali per blocchi, ovvero il fenomeno inverso della subsidenza, che potrebbero recare danni alle infrastrutture ingegneristiche.

3.2.5. Liquefazione dei terreni

Il fenomeno di liquefazione dei terreni si presenta in particolari casi in cui depositi sabbiosi saturi, o più raramente limosi, non presentano più una efficace resistenza al taglio, ma si comportano in maniera fluida, senza opporsi alle pressioni indotte dall'esterno. Solitamente il fenomeno si verifica in seguito ad eventi sismici, che quindi rappresentano l'elemento determinante, che agisce in un contesto che presenta però precisi elementi predisponenti (saturazione, granulometria, tessitura, eventuale cementazione dei granuli, costipazione, ecc.).

I fattori predisponenti possono essere desunti da precise indicazioni stratigrafiche e anche dal livello di falda che eventualmente interessa i terreni; per quest'ultimo elemento si deve ovviamente tenere conto di eventi eccezionali di risalita della stessa, determinati da fattori esterni quali un improvviso aumento del livello idrico di corsi d'acqua adiacenti o precipitazioni particolarmente intense. Allo stesso modo è opportuno prevedere l'eventuale risalita della falda in caso di un suo sotto-sfruttamento o in caso di mutamenti climatici.

3.3. PROBLEMI SPECIFICI PER I SITI IN AREE COSTIERE²

Le aree costiere, presentandosi come zone di interfaccia tra la terra ed il mare, sono sede di intensi fenomeni idrodinamici e sedimentari, che comportano potenziali fattori di rischio per il territorio. Di tali fattori si dovrà tenere conto adeguatamente nel caso si valuti la possibilità di localizzare l'infrastruttura in prossimità della costa.

In questa sede, si considerano i seguenti fattori:

- Tsunami
- Mareggiate
- Erosione costiera

Per ciascuno dei fattori elencati si espongono sinteticamente le metodologie utilizzate per la valutazione dei fattori di rischio.

² In collaborazione con F. Pasanisi, UTTP-CHIA, CR ENEA Portici.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	18	47

3.3.1. Tsunami

Un maremoto, o tsunami, può essere riguardato come un'onda, o una serie di onde, di eccezionale intensità, generate da un evento di natura impulsiva che determina nel mare un improvviso spostamento di un grande volume d'acqua. Tra le cause potenziali si citano le frane, le eruzioni sottomarine, i terremoti che avvengono in mare aperto, l'impatto di corpi celesti.

La differenza principale tra le onde di maremoto e le onde di vento è principalmente nei valori elevati del periodo d'onda, che influenza in maniera fondamentale il meccanismo di propagazione.

Per avere un'idea degli ordini di grandezza, una tipica onda di vento di periodo 10 s presenta una lunghezza d'onda di circa 150 m e un celerità di circa 15 m/s. Al contrario, un'onda di maremoto presenta tipicamente periodi dell'ordine di un'ora e lunghezze dell'ordine dei 100 km. Come risultato della elevata lunghezza, la celerità di propagazione raggiunge valori molto elevati, dell'ordine delle centinaia di metri al secondo.



Figura 3.1 – Distribuzione degli eventi di tsunami riportati nel Catalogo dei Maremoti Italiani (Tinti et al., 2004).

Durante la propagazione verso la costa, la celerità dell'onda si riduce per effetto della riduzione di profondità; per effetto della conservazione, a meno dei termini dissipativi, del flusso di energia ondosa, la riduzione di celerità è accompagnata da un incremento di altezza (*shoaling*). Il processo è del tutto analogo a quello che interessa le onde di vento. Per l'onda di tsunami, tuttavia, a causa dell'alto contenuto energetico dovuto principalmente al valore elevato della celerità, l'effetto è molto più evidente, e uno tsunami di altezza quasi impercettibile in mare aperto può crescere fino a generare fronti d'onda alti decine di metri in corrispondenza della costa.

A questo si aggiunge il fatto che la dissipazione di energia associata alla propagazione moto ondoso decresce con la lunghezza d'onda, il che comporta che un'onda di tsunami può percorrere distanze enormi con una ridotta dissipazione di energia. Nell'appendice 2 si forniscono alcuni elementi di calcolo dei principali parametri per la valutazione della massima risalita (run-up) dell'onda di maremoto sulla spiaggia emersa.

Le regioni del mondo maggiormente colpite dagli tsunami sono le coste dell'Oceano Pacifico (Giappone, Alaska, Isole Hawaii, America Meridionale) e dell'Oceano Indiano (in particolare il Sud-Est Asiatico). Tuttavia, non mancano episodi nel Mare Mediterraneo e, in particolare, lungo le nostre coste (Fig. 3.1). Per quanto riguarda l'Italia, si fa riferimento al Catalogo dei Maremoti Italiani, che copre un intervallo temporale di circa 2000 anni, a partire dal maremoto associato all'eruzione Pliniana del Vesuvio del 79 d.C., fino ad oggi, per un totale di 72 eventi (Tinti et al., 2004).

3.3.2. Mareggiate

Anche le ordinarie onde di mare, dovute all'azione del vento, danno luogo a fenomeni di run-up, che assumono particolare rilevanza in occasioni di mareggiate. Il meccanismo di generazione del run-up è analogo a quello delle onde di tsunami, anche l'effetto è normalmente molto meno catastrofico, a causa principalmente della dissipazione di energia dovuta al frangimento delle onde.

Come è noto, il moto ondoso presenta, su profondità elevate, caratteristiche essenzialmente oscillatorie, caratterizzate da spostamenti nulli mediati nel periodo. Nella propagazione del moto ondoso da largo verso riva, tuttavia, le caratteristiche delle onde si modificano per effetto dei fenomeni di rifrazione, *shoaling*, e, eventualmente, riflessione e diffrazione in presenza di ostacoli o discontinuità batimetriche. Al diminuire della profondità, in particolare, si verifica un incremento della ripidità dell'onda. Quando la ripidità raggiunge un valore limite, si assiste al frangimento, cioè alla rottura dell'onda, che comporta, oltre ad una notevole dissipazione di energia, lo sviluppo di correnti e un incremento del livello marino.

Tale incremento si presenta con due fenomeni caratteristici, che prendono il nome, rispettivamente, di set-up e run-up. Si definisce set-up il sovrizzo del livello medio mare che si verifica nella surf zone per effetto dell'energia trasportata dal moto ondoso, che tende ad accumularsi in un volume idrico delimitato dalla terraferma. Il set-up bilancia la componente cross-shore dell'energia ondosa, ed è accompagnato, nella regione immediatamente più a largo, da un abbassamento del livello medio, che prende il nome di set-down.

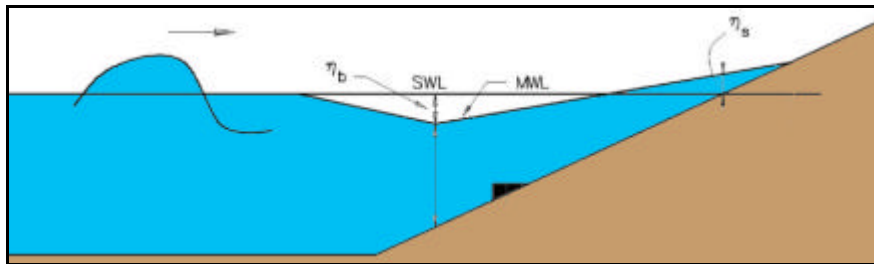


Figura 3.2 – Wave set-up e set-down (Coastal Engineering Manual).

Si definisce run-up il massimo livello di risalita del moto ondoso sulla spiaggia emersa dopo il frangimento. E' evidente la differenza con il set-up, che rappresenta un incremento medio del livello marino; il run-up, al contrario, è un valore di picco istantaneo dell'oscillazione della superficie libera.

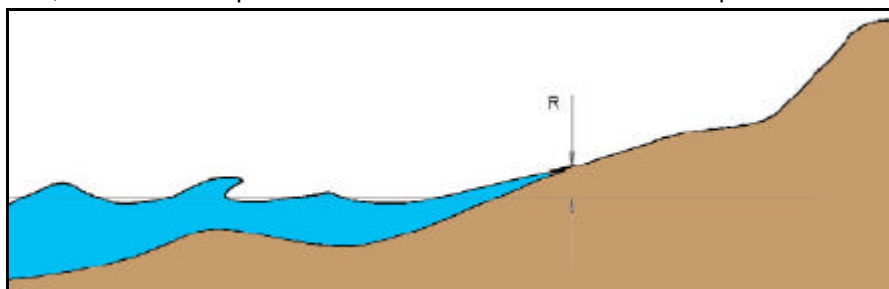


Figura 3.3 – Wave run-up (Coastal Engineering Manual)

Allo stato attuale, non esistono formulazioni teoriche per il calcolo del run-up che si prestino ad un agevole utilizzo pratico in ingegneria costiera. Una corretta impostazione del problema dovrebbe includere le trasformazioni del moto ondoso, la riflessione, la turbolenza, gli effetti tridimensionali, la scabrezza e la permeabilità del fondale, e rappresenta oggetto di ricerca nel campo dell'idraulica marittima.

Le valutazioni fanno quindi riferimento a formule empiriche, che si rifanno a caratteristiche del moto ondoso e del fondale, così come riportato nell'appendice 2. In questo modo sarà possibile, in fase di caratterizzazione del sito, rappresentare sulla cartografia le linee che rappresentano la massima risalita del livello marino corrispondente al periodo di ritorno considerato. La metodologia può essere integrata considerando la contemporanea presenza di alta marea, di eventuali innalzamenti del livello marino a lungo termine e, eventualmente, di subsidenza della fascia costiera. A titolo di esempio, in figura 3.4 si riporta la

perimetrazione di un'area di potenziale inondazione associata ad una mareggiata, ottenuta riportando la quota di massima risalita su una cartografia dell'area.

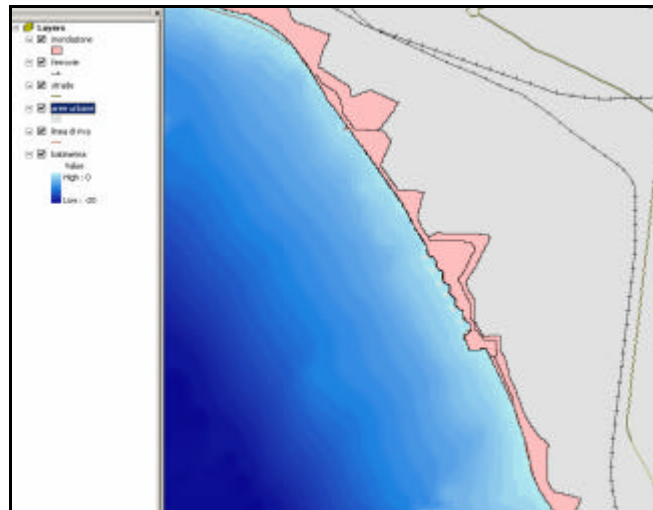


Fig. 3.4 – Esempio di perimetrazione di aree di inondazione

3.3.3. Erosione costiera

A differenza dei fenomeni esaminati in precedenza, l'erosione costiera non si presenta generalmente come un fenomeno legato ad un evento singolo, ma, piuttosto, come il risultato di un insieme di cause che, nel corso del tempo, danno luogo ad una graduale evoluzione del profilo di spiaggia e della configurazione planimetrica della linea di riva. Fanno eccezione i casi di modellamento trasversale del profilo di spiaggia associati a fenomeni di particolare intensità, i quali, generalmente, presentano carattere di reversibilità, come mostrano i tipici profili "estivo" ed "invernale" che si osservano su molte spiagge.

E' necessario, nella caratterizzazione dei siti, tenere nella massima considerazione i fenomeni evolutivi del litorale in atto, sia perché l'erosione potrebbe minacciare direttamente il sito di interesse, sia perché, riducendo la distanza tra questo ed il mare, lo potrebbe rendere più vulnerabile all'azione del moto ondoso e degli eventi di maremoto.

Le cause di erosione costiera possono essere molteplici e possono essere suddivise in cause naturali o antropiche, a seconda che siano o no direttamente imputabili all'intervento umano.

Tra le principali cause naturali si possono individuare, da un lato, la riduzione nell'apporto di materiale alla fascia litoranea, dall'altro le forze che tendono a trasportare il materiale lontano dalle aree costiere.

Il mancato o insufficiente apporto di materiale può essere provocato da mutamenti climatici: una scarsa piovosità nei bacini dei corsi d'acqua ha come risultato una minore portata idrica, ed una minore quantità di materiale trasportato verso le zone costiere, creando una situazione di deficit di sedimenti, che dà luogo al fenomeno erosivo.

Le forze che agiscono sui sedimenti costieri sono principalmente dovute al moto ondoso, che dà luogo, nella fascia compresa tra la zona di frangimento e la linea di riva (surf zone) a correnti in grado di provocare il trasporto del materiale. Accanto a questa azione di modellamento che produce una evoluzione lenta e costante nel tempo, nel caso di eventi meteomarinari di particolare intensità, le onde più ripide tendono ad escavare la spiaggia sommersa, trasportando il materiale verso il largo, con la formazione di una barra a poca distanza dalla riva; nel lungo periodo, le onde di calma tendono a riportare il materiale a riva, ma una parte di esso si perde verso le profonde acque di largo.

Le cause antropiche sono riconducibili ad una alterazione da parte dell'uomo del naturale equilibrio della fascia litorale, mediante una riduzione della quantità di materiale apportato od una alterazione nel trasporto dei sedimenti.

La regimazione dei corsi d'acqua, con la costruzione di argini a protezione delle campagne, la realizzazione di invasi artificiali nei bacini fluviali, l'estrazione dai fiumi di materiale da costruzione,

l'urbanizzazione e la conseguente cementificazione delle aree costiere riducono l'apporto di materiale alla fascia litorale e possono innescare il processo erosivo.

In molti casi l'erosione è provocata dalla costruzione di opere marittime, che intercettano il flusso di sedimenti e provocano uno squilibrio, che risulta in una erosione in alcuni tratti e un accumulo di materiale in altri. Emblematico è il caso di molti porti costruiti alle foci di fiumi, con entrata protetta da sporgenti perpendicolari alla riva, in cui si è osservato un progressivo avanzamento della linea di riva nella spiaggia a sopraflutto, a cui corrisponde una erosione sottoflutto.

Altre volte, la costruzione di opere può dare luogo a fenomeni di riflessione o concentrazione del moto ondoso, con un conseguente aumento in alcuni punti della forza erosiva esercitata normalmente dal mare.

Infine, vanno citate tra le cause antropiche anche la subsidenza per effetto dell'estrazione dal sottosuolo di acqua o altre risorse, il dragaggio dei fondali e la rimozione di materiale dalle spiagge.

Per la descrizione delle tendenze evolutive di un litorale si può effettuare una analisi diacronica della linea di costa, sovrapponendo cartografie storiche e le immagini telerilevate. In tal modo è possibile non solo individuare le aree soggette ad erosione o accumulo, ma anche stimare i tassi di erosione, da utilizzare, in prima approssimazione, per la descrizione delle tendenze evolutive future, nell'ipotesi che non intervengano significative modifiche della dinamica litoranea (Fig. 3.5).

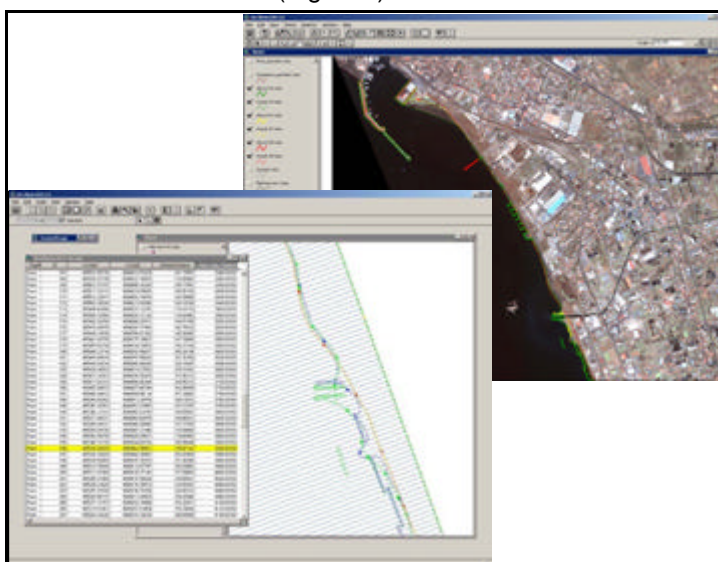


Figura 3.5 – Analisi diacronica della linea di riva per la determinazione delle tendenze evolutive del litorale

Per una analisi di maggiore dettaglio, e, in particolare, per tenere conto della presenza di opere portuali o opere di difesa del litorale di nuova costruzione, si farà ricorso ad idonei modelli matematici in grado di simulare i processi idrodinamici e la dinamica sedimentaria (ENEA, 2001). In casi di particolare complessità può rendersi necessario il ricorso alla modellistica fisica, mediante simulazione in canale o vasca attrezzati (Fig. 3.6) con strumenti per la generazione di moto ondoso (Benassai et al., 2008).



Fig. 3.6 – Modello in vasca 3D per la valutazione dell'evoluzione del litorale

3.3.4. Opere di difesa costiera

La progettazione di un intervento di protezione costiera richiede uno studio accurato delle caratteristiche morfologiche ed ambientali del sito, del regime dei venti, del moto ondoso e delle correnti e, infine, della dinamica dei sedimenti. E' importante osservare che la scelta del tipo di intervento deve essere considerata tenendo conto dell'equilibrio dell'intera unità fisiografica in cui il tratto da proteggere è inserito; non sono rari i casi in cui interventi a protezione di tratti limitati di litorale hanno prodotto danni, anche vistosi, su tratti di costa adiacenti. Vanno, infine, considerati, gli aspetti paesaggistici, che, considerando anche il particolare assetto normativo italiano, assumono importanza sempre maggiore.

Da un punto di vista generale, si possono individuare due grandi tipologie di opere (APAT, 2007):


- Difese rigide
- Difese morbide

Le difese rigide sono costituite da strutture (a scogliera o in altri materiali) aventi il compito principale di sottrarre all'azione diretta del mare il tratto di costa da proteggere. Le difese morbide, al contrario, hanno lo scopo di avanzare/stabilizzare la linea di costa mediante il versamento di materiale sabbioso o ghiaioso, compensando l'azione erosiva del mare (ripascimenti artificiali). Molto frequenti sono i casi in cui l'intervento comprende entrambi i tipi di opere, come nel caso tipico di ripascimenti protetti da scogliere emerse o, più spesso, sommerse.

Le difese rigide possono, a loro volta, essere suddivise, a seconda della loro posizione rispetto alla riva in opere aderenti, disposte, cioè, sulla linea di costa (rivestimenti o muri paraonde) e opere distaccate, posizionate al largo.

Una ulteriore classificazione riguarda la configurazione planimetrica. Si distinguono, pertanto, difese parallele, con asse longitudinale disposto parallelamente alla linea di riva, ed opere trasversali, con asse pressoché perpendicolare alla costa. Le opere parallele e distaccate sono tipicamente realizzate mediante scogliere, e producono, a tergo di essa, una zona di ombra in cui il moto ondoso si attenua e favorisce la sedimentazione di materiale, con la comparsa di salienti e tomboli. Le opere trasversali (pennelli), oltre a proteggere la costa sottoflutto, intercettano la portata solida trasversale e danno luogo ad una tipica configurazione del litorale, che deve essere opportunamente studiata.

Infine, è possibile suddividere le opere di difesa in base alla loro quota sul livello marino. Si definiscono strutture a cresta alta le opere con quota di coronamento ben al di sopra del livello del mare, tale da impedire o limitare il più possibile la tracimazione ondosa; tali opere sono state molto utilizzate in passato. Al contrario, le strutture a cresta bassa presentano una quota di coronamento poco al di sopra del livello del mare, o al di sotto di esso (strutture sommerse); tali opere sono apprezzate per motivi paesaggistici ed ambientali, anche se richiedono un accurato studio sulla loro efficacia (progetto funzionale).

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	23	47

Da questa breve disamina, è evidente che ogni intervento presenta specifici vantaggi e svantaggi, che vanno accuratamente valutati. Per gli aspetti tecnici e progettuali si rimanda alla vasta letteratura tecnica e scientifica di settore.

3.4. ATTIVITÀ UMANE

Vengono analizzate in questo paragrafo tutte le attività umane che potrebbero avere, soprattutto in caso di incidente, un impatto sull'opera danneggiandola e creare quindi la condizione per la dispersione di radionuclidi nell'ambiente.

3.4.1. Rotte di aerei

L' impianto di smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa attività deve essere localizzato lontano dagli aeroporti, visto che possono rappresentare un elemento di notevole pericolosità. Infatti un'accurata ricerca sugli incidenti aerei avvenuti nel mondo tra il 1988 e il 1994 ha evidenziato che le fasi di discesa e di avvicinamento all'atterraggio costituiscono il 70% dei casi.

3.4.2. Trasporti su strada e su ferrovia

L'impianto per lo smaltimento di rifiuti radioattivi dovrà essere ubicato a sufficiente distanza da strade e ferrovie, compatibilmente però con le esigenze di trasporto dei rifiuti stessi; i pericoli maggiori in questo caso sono relativi al rischio di uscita fuori strada di veicoli, di deragliamento treni, di esplosioni o di fuoriuscita di sostanze pericolose trasportate sui mezzi. Esempi recenti sono il disastroso incidente alla stazione di Viareggio, anche se non mancano esempi in un passato meno recente.

3.4.3. Attività industriali a rischio

Emissioni industriali particolarmente dannose o esplosioni di qualsiasi natura suggeriscono di evitare l'ubicazione del sito di stoccaggio dei rifiuti radioattivi in prossimità di:

- impianti petrolchimici;
- depositi di carburante e di bombole di gas;
- in prossimità di gasdotti ed oleodotti;
- impianti di produzione elettrica;
- fabbriche di fuochi artificiali;
- depositi militari di munizioni;
- poligoni di tiro sia militari che privati.

Va anche evidenziato che il pericolo di esplosioni dovute a polveri combustibili è spesso sottovalutato rispetto a quello dovuto ai liquidi e gas infiammabili, sebbene i danni causati possano essere anche maggiori. In particolare le polveri combustibili che possono dare origine ad esplosioni sono presenti in una gran parte delle industrie italiane come quella alimentare, chimica, metallurgica, della lavorazione del legno, ecc. Ad esempio sono polveri combustibili le polveri di grano, cereali, legumi, foraggi, del latte in polvere e dello zucchero. Viene indicato che le polveri combustibili possono dar luogo a

- dispersione in atmosfera con eventuali esplosioni;
- deposito su componenti che producono calore con successivo incendio.

3.4.4. Presenza di dighe nei bacini di ritenuta a monte degli impianti

L'ubicazione del sito di stoccaggio dei rifiuti radioattivi non dovrà avvenire all'interno di bacini idrografici all'interno dei quali siano presenti dighe di ritenuta. Il rischio di crollo e quindi di alluvionamento delle vallate, pur se molto basso nel breve periodo, non può essere invece sottovalutato nel medio-lungo

termine. I grandi disastri di Pian del Gleno (Bergamo) nel 1923, del Vajont nel 1963 o della Val di Stava nel 1985, pur se episodi isolati, indicano un rischio concreto.

Le casistiche di rottura/incidente sulle dighe presentano per loro natura dei limiti sia per omogeneità dei dati rilevati, sia per completezza; in figura 3.7 viene riportata un'analisi del numero di casi per tipologia di manufatto. I dati di rottura di dighe, in ambito internazionale, mostrano con evidenza che al diminuire dell'importanza delle opere non diminuiscono le condizioni di potenziale pericolo. Queste, per condizioni di vulnerabilità diffusa del tipo di quelle esistenti in Italia, lasciano desumere condizioni di rischio potenziale, associato alle piccole dighe, che non possono essere considerate di rango inferiore rispetto a quelle delle grandi dighe. La sicurezza delle opere minori è caratterizzata da un altro elemento di criticità. In genere al diminuire delle dimensioni delle dighe esistenti si impoveriscono le conoscenze sullo stato di consistenza e sul comportamento in esercizio, mediante attività di monitoraggio, molto spesso del tutto assenti.

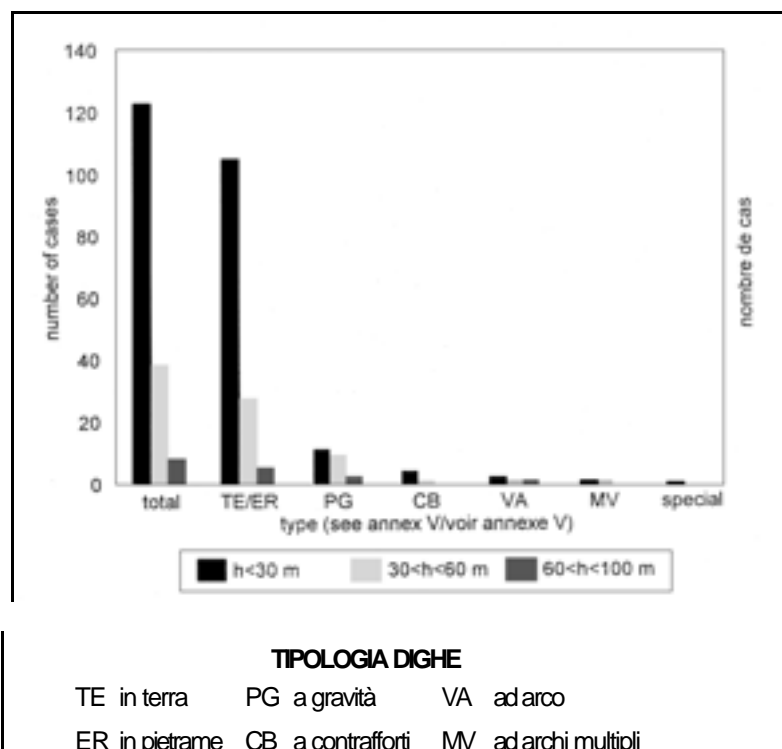



Figura 3.7 – Casi di rottura e tipologia delle opere di sbarramento (da ICOLD 1995)

3.4.5. Cambiamenti nell'uso attuale del suolo

Andrà prevista un' apposita legislazione regionale che impedisca modifiche sostanziali nell'uso del suolo nell'area di pertinenza del sito di stoccaggio dei rifiuti radioattivi in merito a:

- disboscamento;
- sostanziali modificazioni del sistema agricolo;
- modificazioni nel regime dei corsi d'acqua;
- modificazioni urbanistiche (strade, ferrovie, espansione urbana, sviluppo industriale, ecc.).

L'introduzione di tali modifiche potrebbero infatti indurre modificazioni ambientali tali da introdurre molti dei rischi precedentemente descritti.

	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	25	47

4. I COMPARTI AMBIENTALI DA CONSIDERARE PER L'IMPATTO DELL'OPERA

L'analisi di sicurezza sito-specifica ha lo scopo di valutare le performance a lungo termine della barriera geologica. Ciò che rende questo studio particolare sono i tempi in cui si prevede che l'opera dovrà rimanere in esercizio, che risultano veramente lunghi nel caso del deposito per lo stoccaggio di rifiuti radioattivi a lunga vita; a ciò si aggiunge la particolare tipologia di inquinanti che dovrà contenere.

Numerosi aspetti geologico-territoriali intervengono in queste valutazioni, visto che l'opera inevitabilmente è a stretto contatto con numerose matrici ambientali. In particolare si deve prestare la massima attenzione alla determinazione dei parametri che definiscono il comportamento delle diverse matrici ambientali, visto che rappresentano il sistema che permette di veicolare un eventuale radionuclide disperso nell'ambiente. In particolare modo si devono chiarire le loro relazioni quali-quantitative, per conoscere a priori la dinamica dei fenomeni di trasferimento di massa tra un comparto ambientale e quelli adiacenti.

Devono essere chiariti i possibili scenari evolutivi del sito ospite, per dimensionare la barriera geologica e prevenire i problemi a lungo termine. Gli scenari plausibili devono essere individuati sulla base di un confronto costruttivo tra più esperti, che concordano sulla tipologia degli scenari di cui tenere conto e in funzione della loro gravità, eliminando ovviamente quegli scenari che non risultano determinanti nel rischio di compromettere il deposito e la sua tenuta nei confronti della biosfera.


Di seguito verranno descritti gli elementi principali che caratterizzano le matrici ambientali potenzialmente coinvolte nella realizzazione, ma in particolare modo nell'esercizio di un deposito di rifiuti radioattivi. Il paragrafo 4.1 relativo alle acque superficiali presenta una disamina degli aspetti di pericolosità indotti dal contesto idrologico, anche se tali considerazioni andrebbero incluse nella prima parte del presente trattato, in cui si definiscono gli elementi di pericolosità indotti dall'ambiente esterno sul deposito. Ma vengono qui inclusi per omogeneità di rappresentazione dei diversi comparti ambientali.

4.1. CONOSCENZA DEL FONDO NATURALE DI RADIOATTIVITÀ.

Il fondo di radioattività naturale è il fondo naturale di radiazioni ionizzanti dovuto a cause naturali e che è possibile rilevare ovunque sulla Terra. Il fondo di radioattività naturale è di origine sia terrestre (dovuto a isotopi radioattivi di elementi naturali contenuti nella crosta terrestre), sia extraterrestre (la radiazione cosmica).

La media mondiale della dose equivalente di radioattività assorbita da un essere umano e dovuta al fondo naturale è di 2,4 millisievert (mSv) per anno. Questo valore deve costituire uno dei riferimenti utili per stimare eventuali valutazioni di rischio radioprotezionistico. Tuttavia il livello naturale del fondo naturale di radioattività varia significativamente da luogo a luogo e vi sono aree geografiche dove il fondo naturale è significativamente più alto della media mondiale (Ramsar in Iran, Guarapari in Brasile, Kerala in India, e Yangjiang in Cina, ecc.).

Particolare attenzione dovrà essere pertanto posta alla conoscenza ed alla misurazione del fondo naturale di radioattività dell'area prescelta in modo da definire il punto zero prima della realizzazione dell'impianto. Tale conoscenza ha lo scopo sia di comprendere il livello di eventuali contaminazioni ambientali da parte dell'impianto in caso di incidente, in relazione alle condizioni pre opera, sia di garantire i cittadini, mediante le operazioni di monitoraggio, che nulla sta variando nella situazione ambientale rispetto alle condizioni iniziali.

	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	26	47

4.2. CONTESTO IDROGEOLOGICO E IDROLOGICO E LA DISPERSIONE DEI RADIONUCLIDI IN ACQUA

Un aspetto da tenere in considerazione riguarda le potenziali variazioni nello sfruttamento delle acque esistenti, siano esse superficiali e sotterranee. Queste previsioni sono utili per prevedere future variazioni nei regimi idrologici dei deflussi idrici superficiali e sotterranei, che potrebbero direttamente o indirettamente costituire vie di propagazione dei radionuclidi, ma anche indurre problemi alla tenuta delle barriere ingegneristiche del deposito.

4.2.1. Caratterizzazione delle acque superficiali e degli aspetti connessi alla loro pericolosità

Lo studio dei bacini idrografici in cui si inseriscono le aree ritenute idonee per l'ubicazione del deposito devono fornire gli elementi per comprendere lo stato attuale dei deflussi idrici superficiali e per poter prevedere la loro probabile evoluzione futura, anche nel contesto dei cambiamenti climatici in atto.

I dati storici sulle portate dei corsi d'acqua vanno raccolti, analizzati alla luce delle metodiche di studio più appropriate per il contesto in cui si opera, al fine di giungere a modellizzare la dinamica dei corsi d'acqua che possono eventualmente interagire con le infrastrutture del deposito. In particolare per prevedere eventuali fenomeni di alluvionamento e definire il rischio che questi possano interessare le infrastrutture stesse; in quest'ultimo caso gli studi condotti su gran parte del territorio italiano dalle autorità di bacino e dagli enti preposti alla difesa del territorio costituiscono una sicura fonte di informazioni e di indicazioni sulla pericolosità delle aree. Le stazioni idrometriche presenti nel bacino e gestite dagli enti preposti, forniscono sicuramente serie storiche di livelli idrometrici e di portate che rappresentano il primo e principale elemento di studio per le finalità descritte.

Lo studio della dinamica delle acque superficiali deve essere ovviamente effettuato in parallelo con l'analisi meteo-climatica dell'area, definendo la relazione tra le precipitazioni e gli effetti sui deflussi superficiali; questo ovviamente con l'obiettivo di prevedere il pericolo di alluvionamento. Anche in questo caso i dati rilevati presso le stazioni distribuite sul territorio e gestite da più enti in funzione di varie necessità, costituiscono una fonte di dati non trascurabile.

Lo studio idrologico non può prescindere dalle relazioni tra acque superficiali e sotterranee, vista la necessità di prevedere la diffusione di eventuali radionuclidi nell'ambiente e soprattutto del loro trasferimento tra differenti matrici ambientali.

Il contesto idraulico di un bacino deve essere anche considerato alla luce degli elementi geomorfologici presenti e della loro possibile evoluzione; l'analisi delle foto aeree e satellitari, nonché la consultazione della cartografia tecnica di settore o di precedenti studi condotti nell'area, sono le fonti principali cui fare riferimento per questa precisa finalità.

Questi studi dovranno ovviamente essere accompagnati da dettagliati rilievi di terreno, per rilevare e identificare le sezioni d'alveo di maggiore interesse, eventuali piani quotati su aree giudicate inondabili e per il rilievo di tutte le espressioni morfologiche che in qualche modo possono condizionare i fenomeni legati al deflusso idrico superficiale. La modellazione del deflusso dovrà almeno definire gli idrogrammi di piena, la possibile evoluzione della propagazione dell'onda di piena (con eventuali fenomeni di allagamento) utilizzando codici di calcolo validati o appositi modelli idrologici.

Il quadro complessivo della dinamica idrica superficiale servirà per effettuare modellazioni circa l'eventuale dispersione di radionuclidi nell'ambiente esterno, che ovviamente trovano nelle acque di superficie uno dei primi veicoli per la loro diffusione. Anche in questo caso si dovrà fare riferimento a specifici codici di calcolo, opportunamente validati e accettati nel contesto scientifico internazionale, che permettano di simulare la diffusione dei radionuclidi in diversi scenari ambientali.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	27	47

4.2.2. Caratterizzazione idrogeologica degli acquiferi

L'analisi del contesto idrogeologico deve fornire un quadro completo e dettagliato dei serbatoi idrici presenti nel sottosuolo, identificando tutti i parametri idrogeologici di loro pertinenza, nonché tutte le caratteristiche della acque circolanti. L'analisi dei complessi idrogeologici fornisce indicazioni fondamentali per la progettazione del sito, ma fornisce anche lo strumento principale con cui identificare uno dei principali sistemi di trasporto e diffusione degli inquinanti verso la biosfera.

Lo studio deve essere effettuato a livello locale e regionale, per identificare le aree di ricarica degli acquiferi e quindi avere una visione chiara del sistema degli afflussi-deflussi sotterranei. Oltre a definire le caratteristiche degli acquiferi è fondamentale individuare le caratteristiche dei livelli impermeabili o semi-permeabili, tipicamente argillosi e limosi, soprattutto in riferimento al loro grado di impermeabilità, alla loro estensione e profondità, nonché alla composizione chimica dei minerali argillosi presenti, vista la loro capacità di adsorbimento su particolari radionuclidi.

Il contesto idrogeologico sicuramente presenta un certo grado di complessità in caso di permeabilità secondaria. In questo caso ci si dovrà avvalere delle informazioni derivanti dal contesto geologico-strutturale locale, per avere una visione chiara ed esaustiva delle caratteristiche delle discontinuità presenti (fessurazioni, faglie, fratturazioni e altre tipologie di discontinuità). Un discorso analogo può essere effettuato in presenza di fenomeni di carsismo, che devono essere opportunamente analizzati per comprenderne l'estensione e il loro impatto sulla dinamica delle acque sotterranee.

Il chimismo delle acque rappresenta un altro elemento da tenere in considerazione, soprattutto per le acque che possono venire a diretto contatto con le strutture del deposito, onde evitare problemi dovuti a reazioni chimiche quali la corrosione.


L'analisi del contesto idrogeologico non deve essere solo limitato agli aspetti qualitativi, ma deve avere anche dei precisi riscontri di tipo quantitativo, cioè deve fornire indicazioni sulle portate idriche sotterranee che interessano i differenti serbatoi; possibilmente questo deve essere messo in relazione con le variazioni idrologiche che avvengono nelle acque di superficie e anche con le variazioni meteorologiche che interessano periodicamente le aree di studio. Questo discorso ha una particolare valenza per definire gli aspetti di diluizione dei radionuclidi quando questi raggiungono un certo sistema.

La presenza di acquiferi profondi, che spesso sono sfruttati a fini potabili, deve essere chiarita nel dettaglio, soprattutto in funzione delle loro relazioni con gli acquiferi superficiali, per definire qualitativamente e quantitativamente gli scambi di massa esistenti e quelli che presumibilmente possono configurarsi in seguito ad una mutazione del contesto idrogeologico e idrologico di superficie. E' opportuno definire i rapporti esistenti tra questi sistemi, anche dal punto di vista modellistico, simulando le loro variazioni al variare dei parametri meteorologici (primi tra tutti precipitazioni e temperature) e del regime idrologico in un certo bacino.

4.2.3. Caratterizzazione delle acque marine e di transizione

Questo aspetto assume importanza nel caso delle acque marine o di transizione, cioè in aree dove le acque dolci sotterranee sono a diretto contatto con bacini marini o con aree costiere o deltizie. In questi casi la propagazione degli inquinanti può avvenire direttamente da un sistema ad un altro e nel caso in cui le acque marine rappresentino il bacino recettore, diventa molto più pericoloso intercettare e contenere l'eventuale diffusione della radioattività, nonostante i fenomeni di diluizione.

L'analisi delle correnti presenti nelle aree prossimali l'impianto è indispensabile per conoscere la migrazione degli inquinanti in caso di incidente e quindi poter prevenire l'inquinamento di aree sensibili.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	28	47

4.3. IL COMPARTO ATMOSFERICO E LA DISPERSIONE DEI RADIONUCLIDI IN ARIA

4.3.1. Climatologia

L'inquadramento meteo-climatico delle aree prescelte per l'ubicazione di un deposito ha due valenze:

- determinare la probabilità di accadimento di particolari eventi estremi quali tornado, alluvioni, ecc.
- valutare l'effetto dei fenomeni atmosferici sull'eventuale dispersione di radionuclidi nell'ambiente.

La raccolta dei dati e le indagini meteo-climatiche dovranno essere svolte su un'area la cui estensione dovrà dipendere dal contesto geografico e territoriale su cui insisterà il deposito, tenendo conto degli eventi che ragionevolmente potranno influenzare il sito. Dal punto di vista temporale ovviamente ci si dovrà affidare alle serie storiche che presentano maggiore completezza.

Gli studi potranno costituire un ottimo punto di partenza anche per le considerazioni sull'ubicazione degli strumenti di misura che serviranno per proseguire le indagini anche durante l'esercizio dell'opera stessa. Questi dati risultano fondamentali per le valutazioni circa l'eventuale dispersione di radionuclidi in atmosfera e per le conseguenti ricadute al suolo.

Uno degli aspetti che va tenuto in debita considerazione per l'ubicazione del deposito riguarda anche gli effetti dei cambiamenti climatici nel medio-lungo periodo. Questi effetti si ripercuotono in vario modo sull'ambiente e sul territorio. Gli effetti dei mutamenti climatici ormai riconosciuti dalla quasi totalità del mondo scientifico, non riguardano solo gli eventi più estremi quali il drastico aumento dei processi di desertificazione, l'aumento degli eventi di precipitazione estremi, o il rinnovarsi di eventi di glaciazioni. Gli effetti possono anche essere meno rilevanti, ma pur sempre notevoli per le loro ripercussioni sul territorio e sull'ambiente; ad esempio la variazione delle entità delle precipitazioni si ripercuote sulla dinamica degli eventi alluvionali e dei conseguenti fenomeni erosivi e deposizionali, e sicuramente anche sulla dinamica dei deflussi idrici sotterranei.

Per tale ragione la realizzazione delle infrastrutture deve tenere conto, per quanto possibile, anche delle variazioni future dei parametri meteo-climatici, che in alcuni casi potranno discostarsi considerevolmente dalle medie passate. In generale sarebbe comunque opportuno poter prevedere l'entità delle variazioni in corso, per poter effettuare previsioni di tipo qualitativo e anche quantitativo.


Tutti gli aspetti meteo-climatici devono essere rapportati localmente al contesto orografico e territoriale dell'area prescelta per l'ubicazione del deposito. In particolare per comprendere l'eventuale incidenza di particolari fenomeni meteorologici in un certo contesto territoriale. I tempi di ricorrenza di particolari eventi non dovrebbero essere riferiti solamente ai tempi normalmente accettati per le normali opere ingegneristiche, ma dovrebbero essere riferiti a periodi temporali più prolungati, vista la natura stessa dell'infrastruttura.

4.3.2. Venti ed eventi estremi correlati

L'analisi dei fenomeni atmosferici che possono influenzare l'esercizio del deposito non può prescindere dallo studio dei venti che interessano le aree potenzialmente idonee ad ospitare l'opera stessa. In particolare sia nello studio di dettaglio di un'area o nella fase di screening di più aree ritenute idonee per l'ubicazione delle infrastrutture, è fondamentale l'analisi dei parametri legati alla ventosità, tra cui sicuramente:

- frequenza delle direzioni di provenienza dei venti,
- intensità dei venti e frequenza delle classi di velocità,
- frequenza delle calme di vento,
- classi di stabilità atmosferica da cui dipende la capacità di dispersione degli inquinanti aeriformi.

La loro elaborazione statistica e grafica, soprattutto sui settori di provenienza dei principali venti, permette di approfondire il quadro meteo-climatico. L'effetto dei venti sul deposito assume particolare

	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	29	47

importanza in caso di eventi estremi, cioè in presenza di condizioni particolari in cui la forza delle correnti d'aria e le condizioni climatiche possono portare alla formazione di tornado o trombe d'aria. La potenzialità di occorrenza di questi eventi può essere valutata a priori sulla base del contesto meteo delle zone studiate e sulla base di eventi precedentemente registrati, visto che la loro formazione avviene periodicamente in certe zone del pianeta, che presentano le condizioni ottimali per il loro verificarsi.

Alcune zone dell'Italia sono state spesso soggette a questi fenomeni, di intensità più o meno moderata, ma che in alcuni casi hanno creato danni a cose e persone, come avvenuto in Brianza e nel Montello nella prima metà del novecento, con decine di vittime. Per tale ragione è opportuno valutare la probabilità di accadimento di questi eventi e i parametri che ne caratterizzano l'intensità, con particolare riferimento alla velocità rotazionale del vento a terra, al raggio interessato dalla rotazione del vento, alle pressioni indotte, ecc. Se la probabilità di accadimento è ragionevolmente elevata, se ne dovrà tenere conto in sede progettuale, sia per gli effetti diretti del fenomeno, sia per i suoi effetti indiretti (propagazione di missili, alluvionamento, frane, ecc.).

4.3.3. Precipitazioni

I dati sulle precipitazioni storiche raccolte nelle stazioni pluviometriche ubicate in aree adiacenti a quelle idonee per l'ubicazione del sito costituiscono uno degli elementi fondamentali per l'inquadramento meteo-climatico, ma sono anche fondamentali per determinare la pericolosità di alluvionamento, di instabilità dei versanti o più in generale per determinare la potenzialità del dissesto idrogeologico. Costituiscono altresì un'informazione fondamentale per determinare quantitativamente il fenomeno di ricarica delle acque di falda.

I dati rilevati, primi tra tutti il numero di giorni piovosi, l'entità delle precipitazioni per determinati intervalli orari (1, 3, 6, 12, 24 ore) o giornalieri (1, 2, 3, 4, 5 giorni), il superamento di determinati valori di piovosità, ecc. devono anche in questo caso essere analizzati dal punto di vista statistico, per poter effettuare previsioni utili ai fini progettuali. Proprio a tal riguardo la determinazione del tempo di ritorno di determinati eventi piovosi molto gravosi, rappresenta un elemento progettuale di notevole importanza.

In riferimento alla pericolosità di alluvionamento, i dati di precipitazione devono costituire la base di un modello idrologico che metta in relazione i livelli idrici di eventuali corsi d'acqua presenti nelle zone di studio e l'entità delle precipitazioni, soprattutto a carattere temporalesco, che possono improvvisamente generare portate consistenti. Il tutto dovrebbe portare alla stima del tempo di ritorno di determinate portate nel bacino considerato.

Come già riportato in precedenza questi dati andrebbero possibilmente correlati anche con le previsioni sulle variazioni di precipitazione indotte dai mutamenti climatici che il pianeta sta subendo in questi ultimi anni.

4.3.4. Temperature

La scelta della stazione ubicata in un'area quanto più simile a quella di studio, è fondamentale per avere informazioni adeguate su quest'ultima e per non trarre conclusioni errate sul contesto climatico locale.

Le serie storiche delle temperature registrate forniscono un quadro utile all'inquadramento meteo-climatico dell'area e vanno analizzate dal punto di vista statistico, con particolare riferimento alla probabilità di superamento di determinati valori. L'analisi delle temperature estreme e la verifica sulla persistenza del loro superamento in certi intervalli temporali fornisce indicazioni di cui tenere conto nelle fasi progettuali delle opere da realizzare.

Lo studio delle variazioni termometriche nel bacino che sottende l'area prescelta è utile per valutare gli effetti dell'eventuale liquefazione primaverile ed estiva delle nevi, qualora ovviamente il bacino stesso interessi anche solo parzialmente un'area montuosa. Le oscillazioni delle portate dei corpi idrici in simili situazioni sono veramente consistenti in taluni casi e vanno quindi valutate attentamente, anche alla luce delle variazioni climatiche.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	30	47

4.4. SUOLO E CONTESTO AGRONOMICO NELLA DISPERSIONE DEI RADIONUCLIDI NELL'AMBIENTE

4.4.1. L'uso del suolo

Uno degli aspetti che riveste notevole importanza per le implicazioni del trasferimento dei radionuclidi verso il sottosuolo, riguarda l'uso del suolo e le sue possibili variazioni future. E' un elemento rilevante nella fase iniziale di screening delle aree potenziali per ubicare il deposito, soprattutto se l'area si presenta come potenziale ambito di espansione di attività industriali, agricole, civili, ecc. cioè attività in cui si configurerebbe una pericolosa interazione tra attività umane e deposito stesso.

4.4.2. Aspetti pedologici rilevanti per la dinamica dei radionuclidi nel suolo

Per la corretta comprensione della dinamica dei radionuclidi nei suoli e nella Zona Non Saturata è fondamentale poter disporre di una certa quantità di informazioni dettagliata sul sistema; in particolare i coefficienti di distribuzione che determinano quali siano le entità dei radionuclidi che si fissano sui minerali costituenti il suolo e quelli che invece vengono lisciviati in seguito all'azione delle acque di percolazione. A questi dati si affiancano tutti i parametri pedologici che possono in qualche modo influire chimicamente sulla dinamica dei radionuclidi, ma anche sulla capacità di percolazione delle acque di ruscellamento superficiale che, come visto, rappresentano uno dei primi sistemi che permettono di veicolare gli inquinanti verso la biosfera. Ad esempio:

- contenuto in sostanza organica,
- mineralogia (con particolare riferimento ai minerali argillosi che hanno un forte potere adsorbente per certe tipologie di elementi),
- granulometria e sua distribuzione nel profilo pedologico,
- conducibilità idraulica,
- porosità,
- ecc.

Un aspetto da non trascurare è anche la determinazione della concentrazione di eventuali radionuclidi di origine naturale o artificiale già presente nel sistema suolo-acque sotterranee prima della realizzazione del deposito, per disporre di una visione di partenza del contesto in cui si inserirà l'esercizio dell'opera.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	31	47

5. LA COMPONENTE ANTROPICA

5.1. LA CONOSCENZA DEI PRGC E DEI PRS

Le competenze di pianificazione del territorio sono a scala regionale e comunale ed i PRS ed i PRGC sono lo strumento di attuazione delle politiche territoriali. Si compongono Il Piano Regolatore Generale Comunale (P.R.G.C.) è definito come uno strumento che regola l'attività edificatoria in un territorio comunale. È uno strumento redatto da un singolo comune o da più comuni limitrofi (Piano Regolatore Generale Intercomunale) e contiene indicazioni sul possibile utilizzo o tutela delle porzioni del territorio cui si riferisce.

I contenuti principali di un PRGC sono:

- rete principale delle infrastrutture
- zonizzazione del territorio comunale
- indicazione degli spazi destinati a spazi d'uso pubblico
- indicazione delle aree destinate a fabbricati d'uso pubblico.

Il Programma Regionale di Sviluppo (PRS) è lo schema di politica economica al quale si impronta tutta l'azione "ordinaria" di governo del territorio regionale e di coordinamento della pianificazione territoriale a livello provinciale e locale. La Legge Urbanistica Regionale (Nel caso dell'Abruzzo ad es., L.R. 18/83 e L.R. 70/95 e successive modifiche e integrazioni), infatti, esplicitamente prevede che lo strumento urbanistico territoriale di riferimento per la pianificazione degli enti locali (Quadro Regionale di Riferimento o QRR) costituisce la "trasposizione territoriale del Programma Regionale di Sviluppo", essendone quindi subordinato almeno quanto a strategie e scelte prioritarie.


Con la recente creazione degli strumenti nazionali della "nuova programmazione", il PRS diventa anche la base per la programmazione regionale e locale. Esso contiene infatti le linee alle quali improntare la realizzazione delle infrastrutture regionali previste dalle Intese Istituzionali di Programma, delle quali definisce, nel quadro della strategia di sviluppo regionale, le scelte prioritarie settoriali, territoriali e programmatiche. Inoltre, il PRS è lo schema di riferimento nel quale si incardina il coordinamento della programmazione a livello locale (Patti Territoriali, Contratti d'Area, Programmi Integrati Territoriali), che devono risultare coerenti, nei loro contenuti e nei loro strumenti, con il disegno complessivo di politica economica regionale.

Infine, non ultimo in termini di importanza, l'analisi, gli obiettivi e le strategie del PRS costituiscono le linee di fondo sulle quali si muovono tutti i documenti comunitari di programmazione regionale dell'Unione Europea: il documento unico di programmazione (DOCUP) nelle regioni obiettivo 2, il Piano per lo sviluppo rurale e la riconversione delle aree industriali in declino, il Programma Operativo Regionale (POR) obiettivo 3, devono necessariamente trovare quel riferimento unitario, quella unica strategia di fondo, con relativi obiettivi e priorità che solo un documento programmatico generale può dare.

Il PRS, documento politico che detta le linee di sviluppo a medio-lungo periodo della società e dell'economia, deve necessariamente essere condiviso dai più ampi strati possibili della società regionale. Anche per questo motivo la L.R. 85/97 ne ha riveduto profondamente le procedure di predisposizione, definendone metodi e tempi di elaborazione.

5.2. I TRASPORTI

La selezione delle aree idonee a ricevere il sito per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa attività deve tenere conto dello sviluppo della rete viaria, sia per l'ottimizzazione dei trasporti da e per l'impianto di smaltimento, sia per i rischi connessi alla viabilità, che sono già stati illustrati nei capitoli precedenti.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	32	47

5.3. *I COMPARTI ANTROPICI DI MAGGIORE INTERESSE*

5.3.1. **Comparto agricolo**

Nell'area di interesse non devono essere incentivate politiche di sviluppo agricolo diverse da quelle esistenti al momento dell'insediamento dell'impianto. L'introduzione di pratiche agricole diverse può innescare fenomeni di dissesto dei versanti in aree collinari, o aumentare la richiesta idrica modificando l'assetto idrogeologico e idraulico dei corsi d'acqua.

5.3.2. **Comparto urbanistico**

E' chiaro che le aree prescelte non devono essere interessate da piani di sviluppo urbanistico per ovvie questioni di sicurezza, pertanto la selezione dell'area dovrà in prima analisi essere indirizzata in aree dove non è previsto sviluppo urbano. Inoltre il territorio dovrà essere vincolato mediante apposita legislazione proprio per impedire insediamenti urbani nell'area prossima al sito di stoccaggio.

5.3.3. **Comparto industriale**

E' chiaro che le aree prescelte non devono essere interessate da piani di sviluppo industriale per ovvie questioni di sicurezza sia per l'impianto di smaltimento (Vedi capitoli precedenti) sia per gli impianti industriali stessi, pertanto la selezione dell'area dovrà in prima analisi essere indirizzata in aree dove non è previsto sviluppo industriale. Inoltre il territorio dovrà essere vincolato mediante apposita legislazione proprio per impedire insediamenti urbani nell'area prossima al sito di stoccaggio.

5.3.4. **Dinamica e distribuzione delle popolazioni**

Il sito per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa attività dovrà essere inserito in un'area a bassa densità demografica in quanto in caso di incidente in numero di individui coinvolti sia il minore possibile.

5.3.5. **Uso dell'acqua e dei suoli**

La conoscenza dell'uso dell'acqua e dei suoli diventa importante ai fini della selezione del sito/i per evitare le zone ove siano presenti impianti di captazione acquedottistica o aree di particolare interesse economico a fini agricoli.

5.3.6. **I sistemi delle aree protette**


Le legislazione italiana in materia di aree protette prevede:

- Parchi Nazionali
- Parchi regionali
- Aree naturali protette
- Aree marine
- Riserve della Biosfera
- Riserve naturali statali
- Riserve naturali regionali
- Siti di interesse comunitario
- Zone umide
- Monumenti Naturali.

Tutte le aree oggetto di tutela sono contenute nell'Elenco Ufficiale delle Aree Protette (EUAP), che è un elenco stilato, e periodicamente aggiornato, dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare - Direzione per la Protezione della Natura, che raccoglie tutte le aree naturali protette, marine e terrestri, ufficialmente riconosciute. L'elenco attualmente in vigore è quello relativo al 5° Aggiornamento

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP4 - 006	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 33	di 47
--	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

approvato con Delibera della Conferenza Stato Regioni del 24 luglio 2003 e pubblicato nel Supplemento ordinario n. 144 alla Gazzetta Ufficiale n. 205 del 4 settembre 2003.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	34	47

APPENDICE 1 - I SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI

Le problematiche inerenti il territorio e l'ambiente con cui le attività antropiche interagiscono, delineano un intreccio di situazioni in cui è necessario fornire efficaci strumenti e servizi per un corretto sviluppo di azioni di programmazione e gestione. I Sistemi Informativi Territoriali (SIT), più comunemente noti come Geographical Information Systems (GISs), hanno queste prerogative e i Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS - Decision Support System) consentono, trattando i dati in modo complesso e sofisticato, di sintetizzare scenari fruibili per chi deve assumere decisioni sostenibili per il territorio e la popolazione.

I GIS sono strumenti della Geomatica (geos: Terra, matica: informatica) insieme ai sistemi di posizionamento globale, ai sistemi di rilevamento del territorio, alla cartografia e alla fotogrammetria digitale, ai sistemi di supporto alle decisioni. La Geomatica è un approccio sistemico, integrato, multidisciplinare finalizzato alla selezione di strumenti e tecniche appropriate per acquisire (in modo metrico e tematico), integrare, trattare, analizzare, archiviare e distribuire dati spaziali georiferiti in formato digitale, necessari per la conoscenza e la gestione del territorio e dell'ambiente.

Volendo dare una definizione più rigorosa dei GIS, riportiamo alcune indicative enunciazioni presenti in letteratura. La definizione che più rispecchia la natura attuale dei GIS è quella data da Burrough (1986) che definisce il GIS *un potente insieme di strumenti atti ad accogliere, memorizzare, richiamare, elaborare, trasformare e rappresentare dati georiferiti*. L'enunciazione di Cowen (1988) apre invece a una evoluzione del GIS, cioè il suo utilizzo per lo sviluppo di sistemi DSS, definendo un GIS come *un sistema per il supporto alle decisioni su problemi di carattere ambientale utilizzando dati spazialmente riferiti*.

Dalla sintesi delle due definizioni si può derivare la definizione seguente che meglio riassume l'evoluzione dei GIS verso sistemi di supporto alle decisioni: *il GIS è un potente insieme di strumenti in grado di accogliere, memorizzare, richiamare, elaborare, trasformare e rappresentare in scenari opportuni dati georiferiti per fornire ai decisori elementi oggettivi di valutazione sui problemi di carattere territoriale e ambientale*. Usando un DSS si deve poter prevenire e prevedere una serie di fenomeni legati al territorio e delle attività antropiche e poter esplorare tutto l'insieme dei possibili scenari ad essi legati ottenendo una visione delle conseguenze.

Con la presentazione della proposta di Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio Europeo che istituisce un' Infrastruttura di Informazione Spaziale nella Comunità Europea (*Infrastructure of Spatial Information in the European Community - INSPIRE*) è introdotto in modo ufficiale il termine *Informazione Spaziale (Spatial Information – SI)* per indicare tutto ciò che concerne con lo spazio in cui viviamo, sempre più misurato, descritto e rappresentato nelle sue tre dimensioni. Conseguentemente, i GIS diventano gli strumenti tecnologici che consentono di generare dall'informazione spaziale *conoscenza geografica* della realtà terrestre.


1.1 LA NATURA DEL DATO GEOGRAFICO

Una carta è forse la più comune delle forme in cui sono presentati i dati geografici come un insieme di punti, linee, e aree che sono posizionate in accordo a un preciso sistema di coordinate; la legenda della carta collega gli attributi non spaziali, come ad esempio il toponimo di un oggetto, ai dati spaziali, cioè all'ubicazione dell'oggetto stesso.

Formalmente, il dato geografico, o elemento territoriale, è specificato dalle seguenti componenti: *posizione geografica, attributi, relazioni spaziali e fattore tempo*.

La *posizione geografica* descrive la collocazione di un oggetto in termini nominali (nome di luoghi topografici, tramite l'unità amministrativa come comune o provincia di appartenenza, indirizzi) oppure in termini metrico-quantitativo, in cui le posizioni sono definite e georiferite in un sistema di coordinate noto.

Gli *attributi* definiscono e caratterizzano i dati geografici. Essi sono detti dati non-spaziali perché non possiedono una connotazione posizionale intrinseca ovvero non variano rispetto a cambi di scala e/o proiezione.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	35	47

Le *relazioni spaziali* descrivono le relazioni logiche esistenti tra gli elementi geografici e possono essere di diverso tipo: topologiche (equivalenza, equivalenza parziale, contenimento, adiacenza, separazione), di direzione (davanti, dietro, sopra, sotto, direzioni cardinali e loro combinazioni, descrizioni metriche di angoli di Azimuth), di prossimità qualitative (vicino, lontano, in prossimità di), quantitative (misura delle distanze). Le relazioni possono essere semplici o molto complesse. È importante, per esempio, localizzare aree a rischio di incendio e bacini per il prelievo dell'acqua con elicotteri, ma sapere anche quanto essi sono distanti e quanto tempo impiega l'elicottero ad arrivare sul posto. Studiando le combinazioni di diversi elementi si possono, per esempio, individuare relazioni fra particolari fenomeni quali l'incidenza di una malattia e la presenza di una o più fonti di inquinamento note, etc.

Il fattore *tempo*, infine, consente di effettuare analisi temporali attraverso la caratterizzazione del dato relativamente alla sua posizione nel tempo in modo da ricavare informazioni sull'evoluzione di un determinato evento o fenomeno e in particolare di modellizzare il fenomeno al fine di prevederlo e intervenire.

1.2 LE COMPONENTI DI UN GIS

Un sistema GIS è costituito di componenti *hardware*, *software*, e *dati*. L'hardware include gli elaboratori, le periferiche per l'inserimento di dati e per la rappresentazione del prodotto cartografico (digitalizzatori, strumenti di scansione, stampanti, etc.) e l'infrastruttura di rete (Intranet/Internet). Le principali componenti software sono: il *gestore della base di dati* (Database Management System - DBMS); le *funzioni di base*, che possono svolgere operazioni di immissione, aggiornamento, recupero, elaborazione, rappresentazione e stampa dei dati; il *pubblicatore delle mappe* perchè siano accessibili e condivisibili via rete.

La disponibilità dei dati geografici, la loro accuratezza e omogeneità rappresentano un elemento critico nel GIS. Infatti, il costo della raccolta dei dati eccede generalmente sia i costi del software che dell'hardware. Per essere utilizzati in maniera efficace è fondamentale che i dati siano sempre accompagnati da informazioni sulla loro qualità, i *metadati*, che definiscono provenienza, affidabilità, precisione, accuratezza, completezza e consistenza degli stessi. Inoltre, è importante che sia previsto l'aggiornamento dei dati e, affinché il maggior numero di utenti possa accedervi, è necessario che i dati siano corrispondenti a uno standard prefissato o a uno standard di trasferimento dei dati.

In generale, un GIS archivia e gestisce l'informazione spaziale in una banca dati strutturata (*spatial database*); interroga, analizza ed elabora l'informazione spaziale attraverso avanzati metodi e modelli (*geo-processing*); crea *mappe intelligenti* che visualizzano le entità geografiche e le relative relazioni archiviate nella banca dati (*geo-visualization*); condivide l'informazione spaziale via rete (*web-gis*).

1.2.1 I dati per l'alimentazione del GIS

I dati sono fondamentali per l'esistenza e l'alimentazione del GIS. Individuare e raccogliere i dati spaziali e non-spaziali necessari per gli scopi prefissati, successivamente integrarli, renderli omogenei e strutturarli in una base dati spaziale sono azioni cruciali quanto onerose nel processo di realizzazione di un sistema GIS.

In particolare, le fasi per l'alimentazione di un GIS sono:

- *acquisire i dati* tramite rilevamenti sul territorio (censimenti, stazioni e strumenti di misura a terra, etc.) che raccolgono dati puntuali continui o discontinui nel tempo, immagini aeree e da satellite, sistemi di posizionamento (Global Position System - GPS), sistemi di scansione laser da terra e/o da aereo, dati socio-economici, statistici, etc.;
- *immettere i dati* in un formato gestibile dal calcolatore differenziando le procedure tra parte geografica e alfa-numerica. L'immissione dei dati avviene in genere tramite digitalizzazione, secondo le regole del modello di dati prescelto e definito, ma anche tramite stereo restitutori, sistemi di scansione, etc., i dati alfa-numeriche vengono introdotti tramite tastiera. Le

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	36	47

conversioni dei dati provenienti da altri sistemi e caratterizzati da altri formati si eseguono in questa fase;

- *elaborare preliminarmente i dati* che coinvolge un vasto numero di operazioni (codifica topologica, classificazione di immagini, conversione da vettoriale a raster e viceversa, interpolazione a griglia, triangolazione, riclassificazione, trasformazione di rappresentazione cartografica, etc.) per strutturare, classificare e trasformare i dati in modo da renderli idonei alle successive operazioni di interrogazione, analisi e processamento;
- *gestire i dati* tramite DBMS che consentono il richiamo e la manipolazione dei dati spaziali e alfanumerici;
- *presentare i dati* tramite tabelle, grafici e in speciale modo mappe tematiche con dettaglio compatibile con la risoluzione dei dati raccolti.

1.2.2 I modelli spaziali dei dati

Per rappresentare e gestire i dati spaziali in un GIS, è necessario utilizzare una rappresentazione che sia sganciata dalla realtà fisica: questo è ottenuto definendo un *modello dei dati* abbastanza ampio da accogliere al suo interno tutti gli oggetti che esistono nel mondo reale e sufficientemente elastico da permettere di adattarlo a tutte le combinazioni che effettivamente occorrono nella realtà

Rispetto ad una rappresentazione puramente geometrica delle entità geografiche presenti nella realtà, ad un GIS viene richiesto di mantenere e gestire tutte le informazioni che riguardano le mutue relazioni spaziali tra i diversi elementi spaziali e di prevedere l'inserimento dei dati descrittivi dei singoli oggetti reali ovvero gli attributi.

In un GIS, i modelli di dati geografici sono i modelli *vettoriale* e a griglia (*raster*). Nella rappresentazione vettoriale, le entità geografiche del mondo reale sono rappresentate tramite:

- *punti*, che rappresentano oggetti descritti da una coppia di coordinate (ad esempio, un pozzo di approvvigionamento idrico, un traliccio di sostegno dei cavi elettrici, etc.);
- *linee o segmenti*, rappresentati da un insieme di punti connessi (ad esempio, una strada);
- *aree*, rappresentate da poligoni racchiusi da una linea spezzata in cui il primo e l'ultimo punto coincidono (ad esempio, un campo coltivato, un'area urbana, un bacino idrografico, etc.);
- *nod*i, ovvero tipi particolari di punti che specificano una connessione topologica o la posizione di un'entità geometrica.

Le relazioni fra gli oggetti spaziali *nod*i, *archi* e *poligoni* sono chiamate *relazioni topologiche*.

Nel modello raster lo spazio è suddiviso in una griglia, generalmente di dimensioni regolari costituita da righe e colonne, che isola porzioni discrete di territorio denominate *celle*. La localizzazione dell'oggetto è in questo caso definita dai numeri di riga e colonna della matrice e la singola cella ha come attributo l'identificativo dell'elemento del territorio che occupa quella posizione geografica; poiché a ciascuna cella viene associata un singolo valore, differenti attributi sono memorizzati in file diversi. Per esempio, un'area urbanizzata non sarà un'entità unitaria definita, come avviene invece nel modello vettoriale, ma un insieme di celle indipendenti e adiacenti tra loro aventi tutte l'attributo urbano.

Il formato raster si presta bene a gestire dati tematici, in quanto è possibile associare ad ogni cella un numero infinito di attributi a differenti livelli, e a descrivere informazioni relative a grandezze variabili (copertura vegetale, quota, pendenza, etc.). Inoltre, il modello raster consente di trattare immagini digitali e di eseguire in maniera efficiente operazioni di sovrapposizione, o incrocio, e analisi congiunta di vari livelli informativi.

1.2.3 Integrazione di dati vettoriali e raster

Un GIS progettato per l'integrazione con immagini digitali avrà numerose funzioni analitiche di tipo raster, mentre un sistema concepito a scopi di gestione per esempio delle reti tecnologiche prevederà maggiormente funzioni del dominio vettoriale.

La possibilità di sovrapporre (*overlay*) i dati vettoriali a un livello informativo raster si rivela utile per controllare la veridicità geometrica del dato vettoriale rispetto, per esempio, a corrispondenti tracciati

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	37	47

identificabili su immagini sinottiche del territorio, previa opportuna correzione geometrica. La possibilità di rasterizzare i dati vettoriali consente di passare da un dato vettoriale ad uno di tipo griglia; questa tecnica permette di poter applicare, per esempio, gli operatori logici generalmente utilizzati su dati raster.

I moderni GIS sono sistemi integrati che consentono una completa condivisione delle funzioni e delle due strutture dati, e nei quali gli oggetti possono essere trattati e memorizzati nelle due forme.

L'integrazione tra dati vettoriali e dati raster ha il vantaggio di sfruttare le prestazioni degli algoritmi di elaborazione dei due formati. Il formato raster si presta agli algoritmi per l'analisi di intorno o per la ricerca di percorsi di minimo costo, mentre quelli per l'allocazione di risorse, per la ricerca dei percorsi ottimali o di segmentazione dinamica sono tipici della logica vettoriale. Gli algoritmi di incrocio si prestano meglio nel raster, mentre quelle di definizione di aree di rispetto (*buffering*) si prestano bene in entrambi i formati.

Un sistema che comporti una logica integrazione tra dati raster e vettoriali deve presentare facilità nel passaggio dei dati tra i due formati, una struttura di archiviazione che sia omogenea per entrambi i formati, una gestione degli attributi attraverso l'uso di una comune base di dati relazionale, una compatibilità del sistema di georeferenziazione, la possibilità di visualizzare e interrogare contemporaneamente dati raster e vettoriali e che quindi permetta tecniche di elaborazione integrata.

1.2.4 I metodi per l'analisi spaziale nel GIS

Il GIS si distingue per la sua capacità di eseguire analisi spaziali. Le funzioni di analisi spaziali disponibili in un GIS possono essere distinte fondamentalmente in funzioni di: *analisi dei dati spaziali*, *analisi degli attributi* (Ricerca; Generazione; Calcolo), *analisi integrata degli attributi e dei dati spaziali* (Ricerca, classificazione e misura; Sovrapposizione; Vicinanza; Connettività).


Le informazioni presenti in una carta geografica sono generalmente memorizzate nella base dati spaziale di un GIS in modo ordinato, in più livelli informativi, ciascuno contenente un singolo tematismo quale quello delle strade, dell'idrografia, dei centri abitati, della copertura del suolo, etc.

Partendo dalle informazioni esistenti nella base dati spaziale, mediante l'analisi spaziale, possono essere creati nuovi livelli informativi, associando i dati in maniera da identificare relazioni prima non chiaramente visibili. Tipico esempio sono le analisi effettuate con la semplice sovrapposizione (*overlay*) di più livelli informativi come, per esempio, la sovrapposizione tra l'uso del suolo ed i dati catastali, allo scopo di identificare, per ogni proprietà (particella catastale), la tipologia di uso del suolo.

Probabilmente le funzioni di *overlay* sono state le prime ad essere implementate in un GIS e rimangono ancora oggi le funzioni di base in questi sistemi. Concettualmente si tratta di funzionalità molto semplici ma solo una struttura dei dati completamente topologica permette di realizzarle in modo efficace. Infatti, il risultato della sovrapposizione di diversi livelli informativi non deve essere solamente visuale ma deve essere soprattutto a livello degli attributi, che devono essere riportati da un livello informativo all'altro, in corrispondenza degli stessi elementi. Le sovrapposizioni possono essere suddivise in tre categorie principali: punti su poligoni, linee su poligoni e poligoni su poligoni: nelle operazioni di *overlay* almeno uno dei due tematismi considerati deve essere di tipo poligonale. Se ad esempio poniamo, come livello poligonale, una carta dell'uso del suolo, mediante le funzioni di *overlay* possiamo attribuire la tipologia del suolo in cui cade un traliccio elettrico (punto su poligono), un tratto di strada (linea su poligono), un fabbricato (poligono su poligono). Il nuovo livello informativo conterrà oltre che tutti gli attributi rispettivamente del traliccio, della strada o del fabbricato, anche tutte le informazioni che sono associate alla carta poligonale dell'uso del suolo.

Mediante gli operatori di *overlay* sono possibili sofisticate analisi di tipo ambientale e scientifico: si pensi, in campo geologico, alla possibilità di sovrapporre carte diverse riportanti informazioni sulla geologia, la copertura vegetale, l'acclività, la fessurazione della roccia, per determinare le zone potenzialmente predisposte al dissesto.

Un GIS dispone anche di funzioni di *buffering*, in grado cioè di creare un'area di rispetto intorno agli elementi geografici che sono presenti nella base di dati. E' possibile eseguire *buffering* asimmetrici rispetto ai due lati di un elemento lineare oppure un *buffering* parametrizzato a seconda delle caratteristiche dell'elemento. Una volta creata la fascia di rispetto, che sia intorno ad un punto, linea o poligono, il risultato è

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	38	47

sempre un livello informativo di tipo poligonale, che può essere utilizzato per successive analisi. Ad esempio, eseguendo l'*overlay* della carta della vegetazione con le fasce di rispetto create intorno ad una strada in costruzione, può essere valutata la superficie e la tipologia della vegetazione coinvolta nel progetto.

Lo spostamento delle persone, il trasporto e la distribuzione di beni e servizi, la distribuzione dell'energia, le comunicazioni: tutte queste attività prevedono lo spostamento di materia o di informazione mediante dei sistemi di reti, che sempre più costituiscono una delicata e vitale infrastruttura del mondo odierno. Le *funzioni sulle reti* eseguite da un GIS sono fondamentalmente: la ricerca del minimo percorso su una rete o comunque del percorso meno costoso; l'allocazione di porzioni della rete a un fornitore o consumatore di risorse; la verifica della connettività tra due punti della rete.


Per eseguire l'allocazione di risorse bisogna avere un centro che offra risorse e di una domanda di queste sulla rete, o viceversa, di una offerta sulla rete e di una capacità ricettiva su di un centro. A titolo di esemplificazione, mediante l'uso delle *funzioni di allocazione*, può essere affrontato e risolto un problema tipico della gestione pubblica di una città: la raccolta dei rifiuti solidi urbani. Questa analisi viene effettuata rappresentando una eventuale discarica come centro di raccolta e riportando la distribuzione dei cassonetti sul grafo che rappresenta la rete viaria cittadina; in questo modo si può determinare il numero massimo di cassonetti che, svuotati mediante i mezzi di raccolta, determinano la saturazione della discarica ed anche identificare quali parti della rete stradale contribuiscono ad alimentare la discarica fino alla sua saturazione. Operazioni analoghe possono essere eseguite per allocare studenti su scuole oppure determinare piani di evacuazione in caso di calamità allocando la popolazione sulle strutture di ricovero, etc.

Le *funzioni per la verifica della connettività* servono ad identificare se e quali porzioni di una rete sono connesse. Ad esempio, una società per la gestione delle reti elettriche può avere bisogno di sapere quale impianto presente sulla rete elettrica serve un determinato utente e nel caso di interruzione o guasto quale percorso alternativo può essere adottato per mantenere la funzionalità del sistema. Analogamente un idrologo può utilizzare tali funzionalità per identificare tutti i rami ed i corsi d'acqua a monte di un determinato punto di un fiume.

La *segmentazione dinamica* in GIS è la capacità di associare diversi insiemi di attributi a qualsiasi segmento di un elemento geografico lineare senza dover cambiare la struttura fisica di questo: possiamo quindi attribuire informazioni diverse a porzioni distinte di un arco senza dover effettivamente spezzare fisicamente l'arco.

Le *funzioni di vicinanza* presenti in un GIS consentono di valutare le caratteristiche di un'area intorno a una specifica posizione. È per esempio utile sapere quanto dista un centro abitato da un potenziale percorso per la palificazione elettrica, conoscendo anche le condizioni orografiche e le possibili soluzioni di tracciati, per definire delle zone di rispetto. I quattro tipi di operatori di vicinanza sono così definibili: *funzioni topografiche*, *funzioni di illuminazione*, *funzioni di vista prospettica*, *funzioni di interpolazione*. Le funzioni topografiche effettuano calcoli finalizzati all'ottenimento di acclività, esposizione, forma dei versanti a partire dalla topografia; queste operazioni sono tipiche del modello raster. Le funzioni di illuminazione hanno lo scopo di calcolare i parametri legati all'insolazione determinando quindi per quante ore un determinato versante è esposto al Sole. Le funzioni di vista prospettica visualizzano in tre dimensioni la superficie terrestre agevolando la comprensione di taluni fenomeni. Importante è la possibilità di adagiare sul DEM (Digital Elevation Model) una carta tematica o una immagine digitale. Le funzioni di interpolazione sono utili alla determinazione di nuovi valori nelle immediate vicinanze di punti, regolarmente o irregolarmente spazati, e/o linee noti.

La possibilità di visualizzare in un GIS dati raster in diversi formati ha consentito, inizialmente, l'integrazione dei dati telerilevati con i dati di tipo vettoriale. In seguito, con l'introduzione nei GIS di operatori in grado di elaborare anche i dati di tipo raster, le funzionalità che erano prerogativa esclusiva dei sistemi di *image processing* sono divenute parte integrante dei GIS. Tali funzionalità, in grado di operare su dati di tipo matriciale hanno aperto la strada ad una serie di applicazioni, difficilmente realizzabili mediante l'approccio vettoriale: la modellazione idrogeologica, la ricerca di superfici di minimo costo, l'interpolazione di dati puntuali per la generazione di superfici tridimensionali, la derivazione di curve di livello, etc. Mediante specifiche funzioni, ad esempio, è possibile derivare la struttura di un reticolo fluviale partendo da un DEM, e

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	39	47

quindi codificare i vari rami del reticolo così identificati; o calcolare l'esposizione di una superficie rispetto ad una sorgente luminosa, potendo modificare in tempo reale tutti i parametri relativi all'orientamento della sorgente e del modello tridimensionale sotto osservazione.

Alcune di queste funzionalità, che operano su dati raster, trovano una controparte nella funzionalità di modellazione tridimensionale, in cui troviamo operatori utili per effettuare calcoli di lunghezze vere (ad esempio, la lunghezza vera di una strada considerando anche l'andamento altimetrico, e non quella proiettata su di una superficie piana come nella rappresentazione cartografica bidimensionale), per determinare la reciproca visibilità di due punti oppure per effettuare profili morfologici o sezioni. Le funzioni che determinano la visibilità di due punti, ad esempio, possono essere utilizzate per le operazioni di valutazione di impatto ambientale, per determinare se e da quali punti è visibile un manufatto in costruzione, una strada o un insediamento abitativo, identificando le possibili soluzioni ottimali.

La crescente disponibilità di informazioni sul territorio, tra cui quelle relative alla morfologia, rendono maggiormente fruibili le funzioni che operano sui dati tridimensionali, aprendo la strada a delle analisi, assai sofisticate, che erano prima appannaggio di sistemi specializzati di sola modellazione tridimensionale.

1.3 L'EVOLUZIONE DEI GIS

Il concetto di GIS è in continuo sviluppo ed evoluzione, influenzato da diversi fattori tecnologici e culturali.

1.3.1 GIS orientati agli oggetti

I dati geografici sono implementati in un GIS mediante specifici modelli di dati basati su strutture di dati di tipo *relazionale* o *orientato agli oggetti* (*object-oriented*).

Prima dell'avvento del modello orientato agli oggetti (*Object-Oriented - OO*), il modello di base di dati comunemente utilizzato nei GIS è il *relazionale* per la sua semplicità e per la diffusa disponibilità del linguaggio standard SQL (Structured Query Language) idoneo alla manipolazione dei dati. Pertanto, i dati non-spaziali sono rappresentati in strutture relazionali mentre i dati geometrici sono gestiti in strutture topologiche.


Con lo sviluppo del paradigma OO, si tende ad unificare la rappresentazione dei dati geometrici e degli attributi in una struttura unica. Il nuovo approccio, definito modellazione dei dati in funzione degli oggetti (*Object Oriented data modeling*), è adatto alle applicazioni spaziali per descrivere gli elementi del mondo reale e le relative proprietà come oggetti.

L'approccio per campi (*field-based*) del modello relazionale concettualizza la realtà come uno spazio non-vuoto composto da unità costituite da insiemi omogenei di punti, linee e poligoni, e il dato tematico è registrato per ciascuna unità. Le unità sono dotate di comportamenti generici vale a dire il comportamento di una linea che rappresenta una strada è identico al comportamento di una linea che rappresenta un fiume.

Il modello basato sugli oggetti (*object-based*) vede il mondo reale come uno spazio vuoto riempito dai singoli oggetti presenti sul territorio. Si sviluppa perciò un processo di astrazione che coinvolge la manipolazione di oggetti sul terreno (*cosa*), la localizzazione (*dove*), il momento (*quando*) e le relazioni tra loro. La base di dati spaziale rappresenta gli oggetti del mondo reale così come appaiono in una specifica applicazione. L'oggetto descrive un'entità reale in un singolo istante, specificando la sua individualità e il suo comportamento (fiume, campo, unità di suolo, etc.). Gli aspetti semantici di ciascun oggetto sul terreno possono essere analizzati in funzione dell'aspetto geometrico e tematico; il primo comprende topologia, forma, dimensioni e posizione, mentre il secondo indica gli attributi non-spaziali degli oggetti. Ne segue che i GIS che implementano questa modellazione dei dati operano con oggetti più intuitivi ovvero con gli oggetti strada, particella catastale, edificio, etc., e soprattutto più *intelligenti*, con un comportamento proprio.

1.3.2 I Sistemi di Supporto alle Decisioni

Il GIS sta evolvendo sempre più verso i DSS ovvero il GIS non è utilizzato solo per analizzare i dati e simulare le risposte dell'ambiente a specifici interventi umani, ma anche per scegliere, all'interno di un

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	40	47

gruppo di possibili alternative, la soluzione ottimale per un certo problema. L'evoluzione dei GIS in DSS favorisce il ciclo di operazioni che dall'osservazione del mondo reale porta alla progettazione di interventi appropriati sul territorio.

I DSS sono costituiti da sistemi informativi sofisticati e quindi di dimensioni e costi maggiori rispetto a quelli gestionali e sono predisposti per rispondere alla domanda: *che cosa succede se...?*, ovvero creano degli scenari possibili attraverso la modellazione della realtà e offrono soluzioni al decisore. Questi sistemi possono costituire uno strumento di coordinamento tra professionalità e competenze diverse e in generale uno strumento di comunicazione tra il mondo tecnico e quello sociale, permettendo di rendere i processi decisionali trasparenti, flessibili e interattivi.

Ai DSS è richiesta la capacità di elaborare gli algoritmi che modellano il fenomeno in esame e di rappresentare i risultati dei calcoli sugli sfondi scelti con la possibilità di seguirne le evoluzioni o di presentare i risultati conseguenti a diverse ipotesi. Gli sfondi devono poter essere cambiati per evidenziare le varie situazioni. In alcuni casi sono anche richieste sofisticate gestioni tridimensionali, necessarie per enfatizzare aspetti del fenomeno in esame che risulterebbero poco appariscenti nella visione bidimensionale.

Esempi pratici in cui la disponibilità di un GIS/DSS si rivela opportuna sono: la gestione delle emergenze territoriali, quali il rischio idrogeologico, gli incendi, gli inquinamenti ambientali; il controllo del traffico aereo; la scelta dell'area più idonea per il posizionamento di una rete di rilevamento territoriale; etc.

1.3.3 L'architettura di un GIS

Nell'ultimo ventennio, il GIS è evoluto portandosi da ambiti di *nicchia*, dove erano richieste soluzioni tecniche per lo più proprietarie, a un livello tecnologico completamente integrato con quelli che sono gli attuali standard delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (Information and Communication Technology -ICT). Il GIS moderno presenta dunque un'architettura *aperta, distribuita, orientata alla rete, interoperabile*.

Il fattore culturale che ha influenzato questa evoluzione è la diffusa consapevolezza del pianificatore come dello scienziato che la *condivisione dell'informazione spaziale* è una condizione necessaria per creare e diffondere la *conoscenza geografica*. I principali fattori tecnologici sono invece la diffusione di Internet; l'enfaticizzazione da parte del mondo dell'ICT del concetto di *servizi distribuiti* e di *calcolo/programmazione distribuita*; la diffusione di *standard tecnologici aperti* atti a garantire condivisione e integrazione di dati e di sistemi/servizi su di essi basati.

A livello software, il *GIS orientato alla rete* si compone delle seguenti applicazioni:

- *applicazioni desktop GIS* per la creazione, l'integrazione e l'analisi dei dati spaziali;
- *applicazioni server di Spatial Database Engine (SDE)* per l'archiviazione e la gestione dei dati spaziali in base di dati relazionali standard e per la gestione della multiutenza;
- *applicazioni server di Internet Map Server (IMS)* per la distribuzione e condivisione di dati, mappe e funzionalità di analisi spaziale in ambiente Intranet/Internet.

La tecnologia IMS consente all'utente, attraverso un sistema mobile, un sistema desktop GIS o un browser standard di visualizzare, tematizzare, interrogare, modificare e analizzare, come se fossero in locale, i dati spaziali distribuiti sulla rete ed eventualmente integrarli con dati presenti sul proprio computer o disponibili su altri siti Web.

Più in generale, il modello architetturale di un *GIS orientato alla rete*, che soddisfi i requisiti di affidabilità, sicurezza e alte prestazioni si articola nei seguenti sottosistemi:

- *Storage Area Network (SAN)*: costituita da un insieme di componenti hardware particolarmente sofisticate, tra loro connessi in fibra ottica, e dai relativi software che garantiscono scalabilità e consentono di ottenere prestazioni di trasferimento dati che possono arrivare ai Gigabit per secondo. Le componenti hardware (server, switch, ecc.) e i relativi software che la compongono possono essere raggruppati in due aree: area del Data Repository e l'area dello Storage Server.
- L'area del *Data Repository* individua le apparecchiature di archiviazione (Disk Array, Tapes Libraries, CD Array, etc.) che contengono l'insieme dei dati da utilizzare in formato

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	41	47

- elementare, e che consentono l'accesso unicamente ad apparati definiti fisicamente a livello della SAN, in modo da garantire l'assoluta integrità e coerenza dei dati.
- L'area dello Storage Server individua l'insieme degli apparati fisici e dei relativi software dedicati alla memorizzazione dei dati, questi ultimi collegati tra loro con delle strutture logiche che consentono di ottenere ottime prestazioni in fase di interrogazione.
 - La separazione dei dati elementari da quelli organizzati in modo strutturato permette di ottimizzare le prestazioni, indipendentemente dal volume di dati, in quanto si possono adottare politiche differenziate e specializzate per la memorizzazione; inoltre consente di ottenere sistemi ad alta affidabilità attraverso la duplicazione di componenti fisicamente distinte e collegate logicamente tra loro mediante prodotti software che effettuano operazioni di clustering. Il clustering consente di gestire le anomalie di sistema, i guasti, di ottimizzare quindi il ripristino e ridurre al minimo il tempo di fermo per l'utente finale.
 - Area degli *Application Server*: individua l'insieme degli apparati fisici e dei relativi software che gestiscono il complesso dei servizi applicativi.
 - Area dei *Security Server*: individua l'insieme degli apparati e dei relativi software che garantiscono la protezione del sistema. Lo schema prevede l'adozione di firewall, apparati specifici per il controllo del traffico e il monitoraggio degli accessi, che consentono di separare la rete esterna da quella interna.
 - Area dei *Web Server*: individua l'insieme degli apparati e dei relativi software che consentono al sistema di organizzare le informazioni e di renderle fruibili in rete. Per garantire la scalabilità (la possibilità di adeguare opportunamente i server al crescere delle richieste), la sicurezza e monitorare esattamente il carico e le prestazioni è necessario che il Web Server sia separato dall'Application Server ovvero si limiti unicamente alle funzionalità di gestione delle richieste e delle conseguenti risposte elaborate dagli Application Server.
 - Area di *Network Communications*: comprende l'insieme degli apparati e dei relativi software che realizzano l'infrastruttura di comunicazione integrata in grado di trasportare i dati tra le diverse localizzazioni.
 - Area *client*: include gli apparati e i relativi software che costituiscono gli originatori delle richieste e gli utilizzatori delle informazioni. Tali apparati possono variare dal PC al telefono cellulare.

Questo modello architetturale presenta caratteristiche di elevata complessità ma anche di estrema generalità, per cui può essere notevolmente semplificato in funzione della specifica applicazione.

Le prospettive future per il GIS sono le Infrastruttura di Dati Territoriali (IDT). Esse sono costituite da insiemi di *GIS orientati alla rete* che pubblicano, ricercano e usano l'informazione spaziale condivisa sul Web, e realizzano un'unica *base di dati virtuale* integrando il vasto patrimonio di dati spaziali esistenti, resi fruibili attraverso servizi orientati alla rete.

Le principali componenti logiche delle IDT sono: *portali di cataloghi di metadati*, attraverso i quali l'utente può ricercare e trovare l'informazione spaziale rilevante per i propri scopi; *nodi GIS*, dove avviene la creazione e la pubblicazione dell'informazione spaziale; gli *utenti GIS* che ricercano, trovano e si connettono per utilizzare i dati e i servizi spaziali pubblicati.

APPENDICE 2 – ELEMENTI DI CALCOLO NELLO STUDIO DELLE DINAMICA DI TSUNAMI E MAREGGIATE

2.1 TSUNAMI

In letteratura sono presenti numerosi lavori relativi al meccanismo di generazione degli tsunami, alla loro propagazione e alla valutazione degli effetti sulla fascia costiera. In questa sede, si vuole citare un metodo semplificato (Federici et al., 2006) per la valutazione della massima risalita (run-up) dell'onda di maremoto sulla spiaggia emersa.

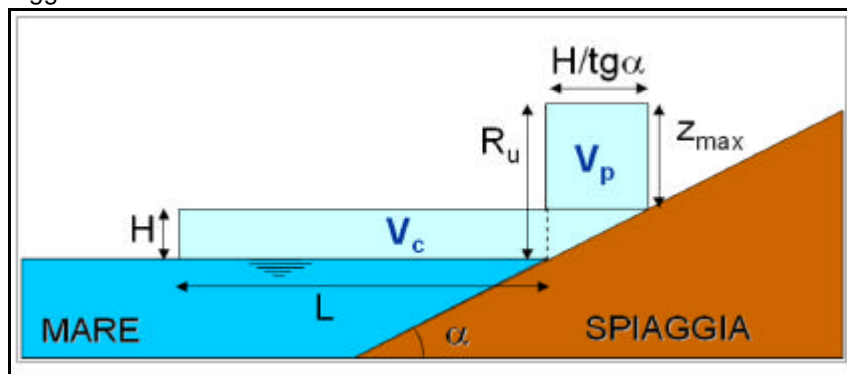


Figura B.1 – Schema per la valutazione del run-up da tsunami (Federici et al., 2006).

Il run-up viene stimato nell'ipotesi che tutta l'energia cinetica dell'onda incidente si trasformi in energia potenziale nell'impatto con la terraferma (Fig. 3.2). La condizione si traduce nell'equazione seguente:

$$\rho V_c H_c = \rho V_p H_p$$

essendo ρ e g , rispettivamente, la densità dell'acqua e l'accelerazione di gravità.

I termini V_c e V_p rappresentano i volumi idrici associati al carico cinetico ed al carico potenziale, e valgono, rispettivamente:

$$V_c = H L \frac{H^2}{2 \tan \alpha} \quad V_p = z_{\max} \frac{H}{\tan \alpha}$$

in cui H è l'altezza dell'onda di tsunami sotto costa, L la lunghezza d'onda e z_{\max} il massimo sovrizzo rispetto all'altezza d'onda.

Il carico cinetico H_c ed il carico potenziale H_p si esprimono mediante le formule:

$$H_c = \frac{U^2}{2g} \quad H_p = z_{\max}$$

essendo U la velocità dell'onda a riva.

Si ottiene, pertanto, dopo alcuni sviluppi:

$$z_{\max} = \sqrt{\frac{U^2 \tan \alpha}{2g} L \frac{H}{2 \tan \alpha}}$$

Le grandezze caratteristiche del moto ondoso H , L , U possono essere valutate, nota l'altezza di largo, applicando una opportuna formulazione matematica per la descrizione del moto ondoso. Nel caso particolare, viene normalmente adottata la teoria dell'onda solitaria.

Infine, il run-up R_u è espresso dalla relazione:

$$R_u = H z_{\max}$$

Per determinare l'area di inondazione, si ipotizza che l'onda, raggiunta la terraferma, mantenga la condizione di pelo libero orizzontale (Fig. 3.3).

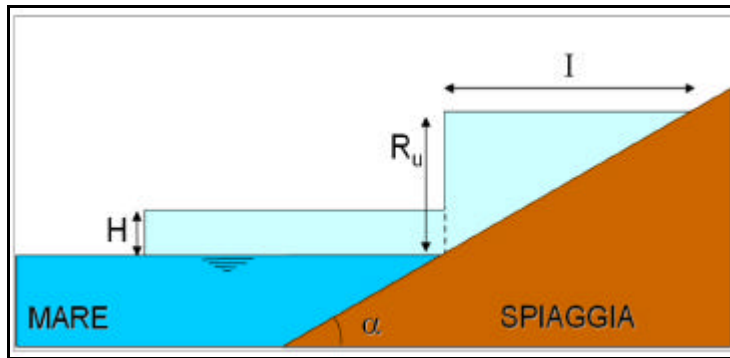


Figura 3.3 – Schema per la valutazione dell'area inondata (Federici et al., 2006).

Per tenere conto della presenza di ostacoli lungo la costa emersa, si introduce un coefficiente di scabrezza minore dell'unità. L'estensione dell'area di inondazione I pertanto, si esprime attraverso la formula:

$$I \propto \frac{R_u}{\tan \alpha}$$

2.2 MAREGGIATE

La valutazione del run-up di una mareggiata su spiagge si basa su formulazioni empiriche, nelle quali le caratteristiche del moto ondoso e del fondale sono condensate in un unico parametro adimensionale [?] che prende il nome di *surf similarity parameter*, definito, nell'ipotesi di onda regolare e fondale di pendenza uniforme, dalla formula seguente (Coastal Engineering Manual, 2002):

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

nella formula i simboli hanno il seguente significato:

α è l'angolo che il fondale forma con l'orizzontale. Il numeratore rappresenta, quindi, la pendenza del profilo di spiaggia

H_0 è l'altezza d'onda di largo

L_0 è la lunghezza d'onda al largo, legata al periodo dell'onda T dalla relazione:

$$L_0 = \frac{g T^2}{2\pi}$$

Nell'ipotesi di onda regolare, il run-up $[R]$ può essere espresso in funzione dell'altezza d'onda di largo e del *surf similarity parameter* adottando la formula di Hunt:

$$\frac{R}{H_0} = \xi_0 \quad \text{per } 0.1 < \xi_0 < 2.3$$

Nel caso di una sequenza di onde irregolari, il run-up è ancora esprimibile in funzione di un *surf similarity parameter*, in cui, in luogo dell'altezza d'onda, viene utilizzata l'altezza d'onda significativa di largo. Inoltre, in tale caso, è più opportuno definire, anziché un singolo valore di run-up, un insieme di valori, corrispondenti a diverse probabilità di superamento nel corso della mareggiata. Per il calcolo di tali valori possono essere utilizzate le formule empiriche proposte da Mase, che si riportano nel seguito per i parametri più frequentemente utilizzati:

$$\frac{R_{\max}}{H_0} = 2.32 \xi_0^{0.77} \quad [\text{valore massimo}]$$


 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	44	47

$$\frac{R_{2\%}}{H_0} \approx 1.86 \tan^2 \alpha \quad [\text{valore superato dal 2\% delle onde nella mareggiata}]$$

Le formule sono da ritenersi valide per pendenze della spiaggia comprese nel *range* utilizzato per le prove sperimentali: $1/30 \leq \tan \alpha \leq 1/5$.

Una volta ottenuto il valore del run-up, l'estensione dell'area costiera soggetta ad inondazione può essere valutata ricorrendo alla stessa formula utilizzata nel caso di tsunami.

Dal momento che l'area di inondazione è legata alle caratteristiche della mareggiata è necessario, preliminarmente, definire le condizioni ondose estreme associate a determinati valori del periodo di ritorno. Tali condizioni possono essere definite statisticamente adattando la serie storica dei valori massimi annuali di altezza d'onda ad una opportuna distribuzione probabilistica, ed estrapolando i valori corrispondenti a differenti periodi di ritorno. Le distribuzioni maggiormente utilizzate sono quella di Gumbel, Fisher-Tippet e Weibull.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	45	47

BIBLIOGRAFIA

ANPA, 2001 – Lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività – parte III: La modellizzazione (M. Dionisi, A. Tutino, 2001).

APAT, AA.VV., 2007. Atlante delle opere di sistemazione costiera. Manuali e Linee guida 44/2007.

BARATOZZI L., BASILI M., BATTISTA A., CAGNOLI P., COLONNA N., DEL CIELLO R., N. FILIPPI, L., FORNI A, GHERARDI, V. MONTALETTI, OLIVETTI I., POLI G. & REGINA P. M. SCARELLI & F. ZARLENGA. Progetto Atlante - Quadro di riferimento, analisi degli strumenti esistenti, implementazione metodologica e applicazione prototipale. Volume edito a cura dell' ENEA, (2001).

BENASSAI, E., CALABRESE, M., BUCCINO, M., DI PACE, P., PASANISI, F., TEBANO, C., ZARLENGA, F., 2008. "Laboratory Tests on Performance of a Coastal Protection Project in Agropoli". Proc. CoastLab08: 2nd International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Bari, 2-5 July 2008, pp.109-112.

BURROUGH P.A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment, Oxford University Press, New York, 1-193

BURROUGH P.A., MCDONNELL R.A., 2000. Principles of Geographical Information Systems, Spatial Information Systems and Geostatistics, University Press, Oxford, 306 pp.

COWEN D.J., 1988. GIS versus CAD versus DBMS: What are the Difference?, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54:1151-1154.

DE BONIS, P., FATTORUSO, G., ONORI, F., PAGANO, A., PASANISI, F., PELOSO, A., REGINA, P., TEBANO, C., ZARLENGA, F., 2001. La dinamica costiera. Modellistica Fisico-Matematica, Analisi del Territorio, il Supporto G.I.S. e la Strumentazione in Uso. ENEA RT/AMB/2001/24.

DE BONIS, P., FATTORUSO, G., GRAUSO, S., ONORI, F., PAGANO, A., PELOSO, A., PASANISI, F., REGINA, P., TEBANO, C. & ZARLENGA, F., 2003. SiGeAC: A Web-oriented GIS for Coastal Zone Management. MEDCOAST03: the 6th Int. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment. Ravenna, 7-11 October 2003.

DELLA ROCCA, B., FATTORUSO, G., LOCURZIO, S., PASANISI, F., PICA, R., PELOSO, A., POLLINO, M., TEBANO, C., TROCCIOLA, A., DE CHIARA, D., TORTORA, G., 2008. Sisi Project: Developing GIS-Based Tools for Vulnerability Assessment. Visual Information Systems, Proceedings 10th International Conference on Visual Information Systems, Salerno, 11-12 September 2008, pp. 327-330. Ed. Springer, Lecture Notes on Computer Science.

ENEA, 2001. Sistema Informativo Geografico per l'individuazione di aree potenzialmente idonee alla localizzazione del Deposito Nazionale dei Materiali Radioattivi a Bassa Attività. Stato delle attività al Marzo 2001". Rapporto Interno ENEA.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste, TECDOC – 1256 (2001)

GOMARASCA M.A., 2004. Elementi di Geomatica, AIT- Associazione Italiana di Telerilevamento, 618 pp.

FEDERICI, B., BACINO, F., COSSO, T., POGGI, P., REBAUDENGO LANDÒ, L., SGUERSO, D. Analisi del rischio tsunami applicata ad un tratto della costa ligure". Proc. 7th Italian GRASS users meeting.

TINTI, S., MARAMAI, A., GRAZIANI, L., 2004. "The New Catalogue of Italian Tsunamis". Natural Hazards vol. 33, pp. 439-465, Ed. Kluwer Academic Publisher.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP4 - 006	0	L	46	47

EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2006. Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS OFFICE FOR THE CO-ORDINATION OF HUMANITARIAN AFFAIRS, WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2003. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards Series No. GS-R-2, IAEA, Vienna.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANISATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1996. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2006. An International Peer Review of the Programme for Evaluating Sites for Near Surface Disposal of Radioactive Waste in Lithuania. IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1999. Near Surface Disposal of Radioactive Waste: Safety Requirements, Safety Standard Series No. WS-R-1 IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1994. Siting of Near Surface Disposal Facilities, Safety Series No. 111-G-3.1, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1992. The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1999. Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste: Safety Guide, Safety Standard Series No. WSG-1.1, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2000. Legal and Governmental Infrastructure for Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety, IAEA Safety Standards Series No. GS-R-1, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2006. The Management System for Facilities and Activities - Safety Standards Series No. GS-R-3, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2002. The International Project on Application of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities: Scope, Objectives, Content and Work Programme, Ref. ASAM/G/0602, Version 1.0, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2004. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities: Results of a Co-ordinated Research Project, Vol. 1: Review and Enhancement of Safety Assessment Approaches and Tools, IAEA-ISAM-1, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2006. Application of the Management System for Facilities and Activities - Safety Standards Series No. GS-G-3.1, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2008. The Management System for the Disposal of Radioactive Waste - Safety Standards Series No. GS-G-3.4, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2006. The Management System for Facilities and Activities - Safety Standards Series No. GS-R-3, IAEA, Vienna.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP4 - 006	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 47	di 47
--	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Ministero dello Sviluppo Economico, 2008. Individuazione di procedure e metodologia per la scelta di un sito nazionale per la localizzazione del deposito dei materiali radioattivi e di strutture di ricerca tecnologica di alto livello – Rapporto finale del Gruppo di Lavoro ex DM 25 Febbraio 2008 del Ministro dello Sviluppo Economico.

OECD-NEA, 2003. Public Information, Consultation and Involvement in Radioactive Waste Management. An International Overview of Approaches and Experiences, Paris.

USACE, 2002. Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1110. U.S. Army Corps of Engineers.