



Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate

RAPPORTI TECNICI

**LINEE GUIDA
PER LO STUDIO DEI FENOMENI DI SUBSIDENZA
NELL'AMBITO DI PROGETTI DI
SVILUPPO SOSTENIBILE DI CAMPI AD OLIO O GAS**

Rapporto Tecnico 1/2007

Giuseppe Gambolati
Pietro Teatini
Massimiliano Ferronato

Padova, Gennaio 2007

UNIVERSITÀ DI PADOVA

Indice

1. INTRODUZIONE.....	1
2. RACCOMANDAZIONI PER UN PROGETTO DI SVILUPPO SOSTENIBILE DELLA RISORSA.....	3
2.1 Analisi preliminare dei dati disponibili.....	3
2.2 Previsione della subsidenza attesa	4
2.1.1 Modelli analitici o semi-analitici	4
2.2.2 Modelli numerici agli elementi finiti	6
2.3 Affidabilità della previsione modellistica.....	7
2.4 Interazione fra giacimenti vicini	9
3. MONITORAGGI.....	10
3.1 Misure di subsidenza.....	11
3.1.1 Livellazione.....	11
3.1.2 Rilievi satellitari GPS in continuo (CGPS).....	12
3.1.3 Rilievi interferometrici SAR.....	14
3.2 Misure in giacimento	17
3.2.1 Compattazione profonda	17
3.2.2 Pressione dei fluidi di strato.....	20
3.3 Misura della compattazione superficiale.....	21
3.4 Rilievi microsismici	22
3.5 Rilievi altimetrico-batimetrici.....	22
4. PREVENZIONE E MITIGAZIONE	24
REFERENZE.....	26



1. INTRODUZIONE

Col termine *subsidenza* si indica un abbassamento esteso della superficie del suolo determinato da cause che possono essere sia naturali che antropiche. Tra le prime rivestono un ruolo importante i movimenti tettonici profondi che si esplicano di norma in tempi geologici e la compattazione dei sedimenti di origine relativamente recente, ad esempio di origine quaternaria. Tra le seconde vanno annoverate l'emungimento di fluidi sotterranei (acqua, olio, gas), l'estrazione di minerali, lo scavo di tunnel e gallerie, le bonifiche di suoli torbosi e la costruzione di infrastrutture e manufatti in superficie che coinvolgono aree di una certa dimensione (altrimenti si parla di cedimenti localizzati). Il presente rapporto intende descrivere, proporre e raccomandare una metodologia allo stato dell'arte da adottare per la previsione, monitoraggio e controllo della subsidenza antropica causata dalla coltivazione di giacimenti ad olio o gas.

Le linee guida che seguiranno possono costituire una traccia per le opportune iniziative da adottare in fase di programmazione della coltivazione di uno o più livelli produttivi e in fase di successiva produzione al fine di assicurare l'implementazione degli opportuni interventi di tutela e salvaguardia del territorio e della sua economia e garantire così il conseguimento di uno sviluppo della risorsa pienamente sostenibile.

È chiaro che il concetto di sostenibilità non può essere definito in termini generici ma va adattato alla realtà territoriale interessata ed alla sua specifica vocazione economico-sociale. Così una subsidenza che desta preoccupazione su un'area costiera bassa e sabbiosa può essere viceversa tollerabile e accettata nell'entroterra, o su coste alte e rocciose. In genere dunque l'osservanza e l'implementazione di linee guida sarà di particolare importanza in tutti quei casi in cui la coltivazione avviene in prossimità di litorali ed aree costiere potenzialmente vulnerabili. È altresì evidente che le linee guida devono conformarsi con le regole ed i vincoli normativi di gestione del territorio che ciascuna realtà regionale, provinciale e comunale si è autonomamente data.

In un programma di previsione e controllo della subsidenza antropica dovuta alla coltivazione di fluidi sotterranei si possono individuare e definire tre azioni base di intervento:

- 1- previsione della subsidenza nell'area interessata dal fenomeno con l'ausilio di modelli matematico-numeriche allo stato dell'arte. Questi devono usare tutta la migliore informazione disponibile alla data ottenuta da uno o più pozzi esplorativi e l'elaborazione dei dati raccolti



- ad hoc e di quelli pregressi che si riferiscono al bacino geologico in cui sono collocate le formazioni oggetto della programmata coltivazione;
- 2- predisposizione di un programma di monitoraggio e misurazione continui del processo in tutti quei casi in cui la vulnerabilità ambientale, economica e sociale del territorio lo richiede. Il monitoraggio deve iniziare anche prima del progetto di coltivazione in modo da definire con ragionevole certezza le conseguenze possibili della coltivazione rispetto allo *stato quo ante* e proseguire sia in superficie che in profondità attraverso l'impiego delle più moderne e sofisticate tecniche di misura (e.g. livellazione tradizionale di precisione o alta precisione, stazioni GPS - Global Positioning System permanenti, analisi interferometriche di dati SAR - Synthetic Aperture Radar) per la misura dell'abbassamento superficiale; assestimetri e marker radioattivi per la misura, rispettivamente, della compattazione degli acquiferi superficiali e delle formazioni profonde;
 - 3- prevenzione della subsidenza antropica attesa o mitigazione di quella sperimentata (se superiore alla soglia di accettabilità di volta in volta concordata con le parti interessate) durante la fase produttiva in punti sensibili dell'area coinvolta. La mitigazione del processo in corso si può conseguire contrastando l'abbattimento della pressione di strato con un progetto di *pressure maintenance* o *pressure build-up* implementato direttamente nella formazione depletata o negli acquiferi laterali e/o di fondo, o fin'anche in acquiferi vergini sovrastanti il giacimento, attraverso la re-iniezione dell'acqua di formazione separata dagli idrocarburi o l'iniezione di acqua di superficie, per es. acqua di mare, opportunamente trattata per ragioni di compatibilità geochimica con le acque della formazione oggetto del progetto di iniezione.

Le attività sopra descritte sono naturalmente interconnesse ed i dati e le informazioni acquisite in una delle azioni sono trasferiti per l'impiego alle altre azioni, e comunque utilizzati in un programma globale di comunicazione avente lo scopo di tenere sotto completo controllo il processo complessivo di subsidenza antropica sia durante la fase di coltivazione e che in quella successiva di post-produzione. Per una *review* aggiornata della problematica connessa con l'estrazione di fluidi dal sottosuolo può essere utile riferirsi alla recente pubblicazione di Gambolati et al (2005a) mentre per una discussione della *road map* da implementare per giungere a decisioni tese a comporre in qualche misura i possibili conflitti politici, economici, legali e sociali che scaturiscono da fenomeni di subsidenza antropica un utile riferimento è costituito dalla pubblicazione di Freeze (2000). Le "linee guida" elaborate nel presente rapporto rappresentano l'implementazione di una serie di



raccomandazioni esposte e presentate al *Seventh International Symposium on Land Subsidence* di Shanghai (Gambolati et al, 2005b).

2. RACCOMANDAZIONI PER UN PROGETTO DI SVILUPPO SOSTENIBILE DELLA RISORSA

Le raccomandazioni che seguono possono servire a predisporre e implementare un progetto di coltivazione di campi a gas od olio compatibile con le esigenze socio-economiche e i vincoli ambientali del territorio.

2.1 Analisi preliminare dei dati disponibili

Una valutazione preliminare della possibile subsidenza sul campo deve fare affidamento su un'informazione necessariamente limitata, basata tipicamente sui dati ottenuti con la perforazione di uno o più pozzi esplorativi perforati fino alla profondità del giacimento di interesse, e sulla conoscenza pregressa delle caratteristiche del bacino in cui il campo è ubicato. Una prima iniziale valutazione dovrebbe raccogliere, elaborare, organizzare e usare le seguenti informazioni:

- 1- ricostruzione della geologia essenziale del campo nell'ambito dell'inquadramento regionale tramite impiego di indagini sismiche e log di pozzo disponibili nell'area di interesse;
- 2- definizione analitica della sequenza dei livelli di olio/gas previsti in produzione accompagnata dall'individuazione degli acquiferi laterali e/o di fondo con le eventuali faglie che possono costituire una barriera idraulica alla propagazione della depressurizzazione e discontinuità alla trasmissione delle tensioni e della deformazione;
- 3- raccolta dei dati geomeccanici essenziali, vale a dire la compressibilità edometrica verticale di primo e secondo ciclo, ottenuti tramite prove ed analisi di laboratorio su campioni di roccia prelevati da carote di fondo in pozzi esplorativi e precedenti indagini in situ ed in laboratorio su rocce appartenenti allo stesso bacino;
- 4- studio e analisi di possibili processi ambientali che gravano sul territorio collegati alla subsidenza. A titolo di esempio, su aree costiere la subsidenza può causare l'arretramento della linea di spiaggia di una entità che dipende dalla pendenza della battigia e/o l'ingressione di acqua di mare, ancorché temporanea e transitoria. Nel caso concorrano altri fattori a



produrre gli effetti dianzi richiamati, ad esempio la consolidazione naturale dei sedimenti o movimenti tettonici del basamento profondo o emungimenti di acqua superficiale, questi devono essere adeguatamente identificati in modo da individuare le conseguenze nette dell'abbassamento antropico dovuto all'estrazione di idrocarburi;

5- in particolare, se esistono conseguenze irreversibili determinate da valori di subsidenza antropica incompatibili con uno sviluppo sostenibile delle risorse, queste dovrebbero essere accertate e debitamente valutate.

2.2 Previsione della subsidenza attesa

La previsione della subsidenza antropica connessa con uno specifico progetto di sviluppo va effettuata mediante l'impiego di modelli matematico-numeriche che hanno visto in tempi recenti notevolmente accresciuta la propria potenzialità grazie ai progressi della tecnologia computazionale. Il livello di complessità del modello deve, tuttavia, essere commisurato alla quantità ed alla qualità delle informazioni disponibili sul giacimento e sul bacino geologico di interesse. Occorre, infatti, tenere presente che la maggior precisione che potrebbe assicurare un modello a più elevata complessità, per tipologia e numero di fenomeni fisici rappresentati, è apparente se la qualità dei dati in possesso non è stata adeguatamente aggiornata.

I modelli per la previsione della subsidenza antropica dovuta alla coltivazione di un giacimento di gas od olio si possono suddividere, a grandi linee, in due categorie:

- modelli analitici o semi-analitici;
- modelli numerici, tipicamente agli elementi finiti.

2.1.1 Modelli analitici o semi-analitici

Un calcolo preventivo della subsidenza antropica causata dalla compattazione di strati profondi depletati può essere eseguito per via analitica facendo ricorso alla soluzione sviluppata da Geertsma (1973). Sulla base della similitudine fra la teoria della termo-elasticità (Mindlin e Cheng, 1950) e quella della poro-elasticità, Geertsma ha introdotto il concetto di nucleo di deformazione (“nucleus of strain”) e soluzione fondamentale, la cui integrazione sul volume depressurizzato fornisce



l'abbassamento indotto alla superficie di uno spazio semi-infinito, elastico lineare, omogeneo ed isotropo, da una distribuzione arbitraria di abbattimenti di pressione di strato.

L'integrazione della soluzione fondamentale su un giacimento di forma cilindrica a sezione orizzontale circolare consente di ottenere una relazione analitica sotto forma di integrali di Hankel, nota come *formula di Geertsma*, dipendente dalle caratteristiche geometriche del giacimento (profondità, spessore e raggio), dalle proprietà elastiche del mezzo (compressibilità verticale e modulo di Poisson) e dalla variazione (uniforme) di pressione. La formula di Geertsma può essere utilizzata prima che siano rese disponibili le pressioni ottenute con un modello fluido-dinamico 3D di giacimento relative alla coltivazione programmata, al fine di ottenere una stima preliminare dell'ordine di grandezza della subsidenza attesa dalla coltivazione del campo. In questo caso, il giacimento va approssimato con una formazione cilindrica di egual volume. Il risultato ottenuto con la formula di Geertsma va integrato con studi più accurati che tengano conto della presenza dell'acquifero, se idraulicamente collegato al giacimento, e quindi della propagazione dell'abbattimento di pressione nell'acquifero medesimo.

Appena si dispone del risultato del modello fluido-dinamico 3D del giacimento e dell'acquifero, è possibile migliorare la stima fornita dalla formula di Geertsma usando un modello semi-analitico che integra numericamente la soluzione fondamentale calcolata su ogni cella del giacimento ed eventualmente dell'acquifero in cui si manifesta una variazione di pressione. Rispetto alla formula di Geertsma, il modello semi-analitico tiene in conto la reale geometria e volumetria del giacimento, nonché la distribuzione dell'abbattimento della pressione di strato prevista nel campo e nell'acquifero. È inoltre possibile, basandosi sul principio della sovrapposizione degli effetti, stimare in prima approssimazione la subsidenza attesa dalla coltivazione di giacimenti a più livelli come somma della subsidenza prodotta da ciascun livello.

I principali limiti di un modello semi-analitico sono connessi alla natura della soluzione di Geertsma ed alle approssimazioni in essa introdotte nella descrizione del fenomeno fisico di interesse. In particolare, l'ipotesi più restrittiva è quella di omogeneità, isotropia ed elasticità lineare del sottosuolo. La soluzione ottenuta va intesa come risultato preliminare da utilizzare in assenza di una conoscenza più precisa del reale comportamento meccanico della roccia serbatoio e degli strati sovrastanti. Per ottenere una stima cautelativa della subsidenza antropica si suggerisce l'uso del valore della compressibilità verticale corrispondente al top del giacimento, posto il fatto che vi sia coerenza fra i parametri di compressibilità adottati nel modello fluido-dinamico di giacimento e



quelli utilizzati nel modello geomeccanico del sottosuolo. L'intervallo di incertezza sul rapporto di Poisson, invece, è tipicamente più limitato e influenza in maniera marginale la previsione.

2.2.2 Modelli numerici agli elementi finiti

I modelli 3D ad elementi finiti (FEM) costituiscono ad oggi lo strumento più avanzato ed affidabile, compatibilmente con la qualità e la quantità dei dati disponibili, per la previsione della subsidenza antropica dovuta allo sfruttamento di un giacimento di gas od olio.

In generale, i modelli FEM usati per lo studio dell'evoluzione della subsidenza nel tempo possono essere *accoppiati* o *disaccoppiati*: i primi risolvono contestualmente le equazioni accoppiate di flusso multi-fase e di consolidazione sulla base della teoria sviluppata da Biot (1941), mentre i secondi impiegano come dati di input i risultati di un modello fluido-dinamico 3D di giacimento che fornisce la variazione nel tempo della pressione di strato. Agli scopi pratici l'uso di modelli disaccoppiati garantisce l'accuratezza desiderata nella simulazione della subsidenza antropica dovuta all'estrazione di fluidi dal sottosuolo con un assai minor costo computazionale ed una minore difficoltà di implementazione; questi due fattori si traducono nella possibilità di discretizzare il volume di calcolo con griglie assai raffinate che garantiscono una ricostruzione accurata della geometria del giacimento e degli acquiferi in contatto idraulico. L'uso di modelli accoppiati può risultare necessario solo in rare eccezioni e, comunque, va giustificato mediante opportune analisi ad hoc che evidenzino come, nei tempi di interesse pratico, i due approcci forniscano risultati discordanti in modo significativo. Va sottolineato, infatti, che i modelli disaccoppiati, a parità di dati utilizzati, forniscono di norma previsioni leggermente sovrastimate di subsidenza, cioè più conservative, rispetto a quelli accoppiati (Gambolati et al., 2000).

Il modello fluido-dinamico di giacimento deve descrivere in maniera realistica la propagazione della depressurizzazione nell'acquifero collegato ai livelli mineralizzati in coltivazione. L'analisi va estesa nel tempo anche dopo l'abbandono del campo per un periodo sufficientemente lungo (dai 20 ai 30 anni, in funzione della vita produttiva del giacimento e della permeabilità dell'acquifero) per consentire un calcolo della subsidenza residua connessa alla compattazione dell'acquifero, che può proseguire anche dopo la chiusura dei pozzi di produzione. Il risultato fornito dal modello fluido-dinamico di giacimento e acquifero costituisce la forzante per il modello geomeccanico di subsidenza che, pertanto, dovrà usare una rappresentazione geometrica del mezzo poroso di interesse il più possibile coerente con quella del modello fluido-dinamico.



Dopo l'analisi preliminare effettuata prima della messa in produzione del campo, realizzata con il set di dati in quel momento a disposizione e che rappresenta la migliore stima possibile della subsidenza prima dell'inizio della coltivazione, i modelli fluido-dinamici e geomeccanici vanno periodicamente aggiornati sulla base delle misure e delle nuove informazioni ricavate durante la vita produttiva del giacimento. I dati di pressione registrati nei pozzi e le misure di deformazione, sia del giacimento che in superficie, consentono di perfezionare entrambi i modelli e quindi di affinare la previsione della subsidenza antropica residua. L'aggiornamento degli strumenti modellistici consente altresì di intraprendere in tempo utile, qualora se ne verificasse l'esigenza, tutte le eventuali misure di controllo e mitigazione del fenomeno (ad esempio, la modifica del progetto di coltivazione o l'entrata in funzione di sistemi di pressure maintenance e/o pressure build-up) che si rendessero necessarie.

L'uso di modelli geomeccanici FEM per la previsione della subsidenza antropica connessa con la coltivazione del campo, in ultima analisi, va sempre privilegiato rispetto all'adozione di modelli semi-analitici non appena siano disponibili i dati che ne rendono possibile l'impiego. Quest'ultimi possono essere utilizzati nella sola fase di valutazione preliminare che precede la messa in produzione del campo qualora siano verificate le seguenti condizioni:

- 1- giacimenti sottili (spessore trascurabile rispetto all'estensione orizzontale) privi di particolari complessità geologiche (ad esempio, forti eterogeneità nella roccia serbatoio) e strutturali (ad esempio, presenza di faglie regionali);
- 2- assenza di indicazioni dettagliate sul comportamento meccanico reale della roccia serbatoio ed adozione di un valore medio rappresentativo della compressibilità in situ;
- 3- assenza di progetti di pressure maintenance e/o pressure build-up.

In ogni caso, dopo l'inizio della coltivazione, i dati via via raccolti devono essere implementati nel modello FEM per affinare periodicamente la previsione iniziale.

2.3 Affidabilità della previsione modellistica

I modelli FEM consentono, in linea teorica, di prevedere la subsidenza antropica prodotta dalla coltivazione di un giacimento in presenza di una qualsivoglia legge costitutiva relativa al comportamento meccanico del mezzo e di qualunque eterogeneità nella distribuzione spaziale dei



parametri idrogeologici. L'attendibilità della previsione è, tuttavia, strettamente connessa alla qualità e quantità dei dati geologici, idrologici e geomeccanici a disposizione. L'adozione di modelli costitutivi complessi, ma privi di un effettivo riscontro nelle informazioni disponibili, porta ovviamente ad un miglioramento apparente della qualità dei risultati ottenuti. Poiché la conoscenza dei parametri idrogeologici e geomeccanici del mezzo poroso è soggetta a diverse incertezze, dovute sia alla difficoltà ed al costo per il reperimento dei dati che agli errori intrinsecamente connessi alle tecniche di misura adottate, l'affidabilità del modello va integrata con un'analisi di sensibilità del risultato relativamente agli intervalli di incertezza dei dati a disposizione. I parametri costitutivi che maggiormente influiscono sulla subsidenza antropica sono la compressibilità verticale c_M e la conduttività idraulica dell'acquifero k .

Nella fase iniziale dello sviluppo di un giacimento, la conoscenza di c_M è di norma assai approssimativa. Se il campo appartiene ad un bacino geologico nel quale analoghi studi sono già stati effettuati in precedenza è possibile usare le conoscenze pregresse. In caso contrario, i dati a disposizione, possibilmente integrati mediante risultati di letteratura, vanno utilizzati per sviluppare una legge costitutiva di c_M , in genere decrescente con la tensione intergranulare efficace. Per valutare la subsidenza residua dopo l'abbandono del campo è essenziale tener conto del comportamento isteretico della roccia in fase di scarico. Se non sono disponibili dati specifici sul comportamento del mezzo poroso in secondo ciclo, la legge di c_M in primo ciclo può essere divisa per un opportuno coefficiente maggiore di 1, tipicamente compreso tra 2 e 10 (Taylor, 1967, p. 62-63; Dusseault e Van Domselaar, 1982, p. 342), ricavato da risultati di letteratura o da studi analoghi riferiti al bacino geologico di interesse. Successivamente, man mano che nuovi dati vengono acquisiti durante lo sviluppo del campo (ad esempio, tramite misure di compattazione in situ con marker radioattivi), i valori di c_M possono essere elaborati con una procedura statistica che consenta di ottenere, perlomeno alla profondità del giacimento, un valor medio ed un intervallo di confidenza (Baù et al, 2002). Nella fase precedente l'inizio della coltivazione, si suggerisce di adottare, per ragioni di sicurezza, l'intervallo di confidenza al 95%. Utilizzando il valor medio di c_M e i limiti dell'intervallo di confidenza al 95% si individuano tre scenari che definiscono un intervallo di affidabilità per la subsidenza antropica attesa i cui estremi sono altamente improbabili. Si osservi che l'uso del valore massimo di c_M produce il massimo abbassamento direttamente sopra il giacimento e riduce contestualmente l'estensione dell'area subsidente a causa della riduzione del cono di depressurizzazione nell'acquifero. La stima più conservativa della subsidenza nella zona di reale interesse va, quindi, determinata mediante l'analisi comparata degli scenari a disposizione. Va



da sé che per ottenere risultati attendibili è necessario assicurare la massima coerenza fra i valori di c_M utilizzati nel modello fluido-dinamico di giacimento e quello geomeccanico di subsidenza. In fase avanzata della coltivazione del campo (dopo alcuni anni), l'aggiornamento periodico dei modelli con nuovi e più recenti dati può consentire la riduzione dell'intervallo di possibile variazione della compressibilità.

La conoscenza della conduttività idraulica dell'acquifero connesso al giacimento è tipicamente limitata, in special modo prima della messa in produzione del campo. Successivamente, stime indirette del valor medio di k possono essere dedotte dal match delle pressioni misurate con quelle simulate nel modello di giacimento in funzione dei volumi d'acqua di strato ingressati nei livelli depletati. In fase preliminare, pertanto, è necessario prevedere alcuni scenari che coprano un range sufficientemente ampio di valori di k dedotti da prove di pompaggio o da studi pregressi. Il range di variabilità di k andrà progressivamente riducendosi con la maturazione del campo.

2.4 Interazione fra giacimenti vicini

Nel caso di giacimenti vicini è possibile che si verifichino interazioni di tipo idraulico e/o geomeccanico. Le prime si verificano quando la depressurizzazione provocata dalla coltivazione di un giacimento influenza la coltivazione di un altro giacimento attraverso la condivisione di un acquifero comune o comunque parzialmente comunicante. Le seconde si hanno quando la deformazione in superficie è il risultato della depressurizzazione contemporanea di più giacimenti. Si osservi che mentre l'interazione idraulica è sempre accompagnata dall'interazione meccanica, viceversa non sempre l'interazione meccanica implica un'interazione idraulica.

Se la legge costitutiva per il comportamento meccanico della roccia è lineare e non vi sono interazioni idrauliche dovute ad acquiferi comunicanti, vale il principio di sovrapposizione degli effetti e la subsidenza totale può essere calcolata come somma della subsidenza determinata dalla coltivazione di ciascun giacimento simulato separatamente. In caso contrario, la simulazione sia fluido-dinamica che geomeccanica di tutti i campi fra loro interagenti va condotta mediante un unico modello complessivo. Va osservato che perché si renda utile un modello integrato di tutti i giacimenti in assenza di interazione idraulica, è necessario che la coltivazione da un campo induca deformazioni non lineari nei campi vicini.

In generale, un'analisi preliminare delle caratteristiche geologiche e geomeccaniche e dei progetti di coltivazione di giacimenti vicini può consentire di stabilire a priori l'opportunità di realizzare un



unico modello di simulazione. Qualora le dimensioni di quest'ultimo risultassero eccessive per consentirne un'agevole gestione, specie in presenza di più giacimenti rilevati a livello regionale, la procedura di calcolo basata sulla sovrapposizione degli effetti può risultare in ogni caso accettabile.

3. MONITORAGGI

In questo settore si è registrato nell'ultimo decennio un notevole progresso tecnologico che consente di pianificare, contestualmente al programma di coltivazione del giacimento, un efficace programma di monitoraggio degli effetti ambientali connessi alle estrazioni. In particolare, in relazione alla problematica della subsidenza, si dovrebbe prevedere la misurazione di:

- pressioni di strato nelle formazioni geologiche da cui avviene la coltivazione, sia in giacimento che nell'acquifero;
- compattazione degli strati del giacimento;
- spostamenti verticali della superficie del terreno (subsidenza/rebound).

Per poter distinguere tra subsidenza antropica indotta dalla coltivazione di idrocarburi e subsidenza naturale e/o antropica per estrazione d'acqua dolce dalle falde superficiali è necessario che il monitoraggio degli spostamenti verticali della superficie del suolo interessi un'estensione areale sufficientemente ampia rispetto alla dimensione del giacimento e che siano eseguite misure di compattazione degli strati superficiali dai quali ha luogo l'estrazione d'acqua. È altresì importante che il controllo della subsidenza venga avviato prima dell'inizio della coltivazione, si prolunghi per tutta la vita produttiva del giacimento e si estenda oltre per alcuni anni (orientativamente 5-10 anni) al fine di registrare l'eventuale subsidenza residua e/o il parziale *rebound* generati dal naturale riequilibrarsi delle pressioni di strato.

Altre tipologie di monitoraggio che possono risultare utili nell'ambito di uno studio di sostenibilità ambientale connesso allo sfruttamento della risorsa naturale sotterranea sono i rilievi altimetrici e batimetrici (per campi a mare o sottocosta) nonché le reti di monitoraggio microsismico in aree caratterizzate da intensa attività tettonica.



3.1 Misure di subsidenza

Sono disponibili attualmente diverse tecniche di monitoraggio della subsidenza. Data la difficoltà nella previsione accurata del processo e nella sua attribuzione alle possibili concause che lo generano, se ne raccomanda l'utilizzo integrato, soprattutto nello studio di aree on-shore di vaste dimensioni.

3.1.1 Livellazione

La livellazione geometrica, usata da oltre 100 anni, è il metodo tradizionale per il controllo delle variazioni altimetriche del territorio. È a tutt'oggi la tecnica caratterizzata dalla maggiore precisione.

Preliminarmente all'esecuzione della livellazione occorre materializzare la rete di monitoraggio attraverso l'infissione nel terreno o in manufatti (case, ponti, tralicci, ...) stabili di capisaldi, ossia di chiodi, pomelli o mensole che devono essere spaziate tra loro al massimo di 1 km. La rete di livellazione, possibilmente connessa a capisaldi di misura già esistenti e inseriti in reti gestite da istituzioni pubbliche (ad esempio, IGM, ARPA regionali, CNR), deve possedere una geometria progettata sulla base della:

- massima estensione areale della subsidenza attesa dall'estrazione di idrocarburi;
- possibilità di essere collegata a capisaldi di riferimento stabili esterni a tale porzione di territorio, ovvero soggetti a spostamenti trascurabili rispetto a quelli previsti nella zona di interesse.

Per ciascun rilievo, la differenza di elevazione tra due capisaldi è misurata due volte cumulando la differenza di quota tra una serie di punti temporanei di appoggio collocati tra i due capisaldi. Si consiglia di utilizzare la procedura di livellazione "dal mezzo" (Figura 1), con distanza massima di battuta pari a 60 m e linea di mira con altezza dal suolo non inferiore e superiore a 1 m. La differenza tra i due dislivelli misurati in "andata" e in "ritorno" (cioè procedendo dal caposaldo A al B e poi da B ad A, vedi Figura 1) deve essere inferiore ad una tolleranza t (espressa in mm) pari a $3\sqrt{D}$ (dove D è la distanza tra due capisaldi espressa in chilometri) per un rilievo in alta precisione. Ciascuna serie di misure al livello digitale dovrebbe essere formata da almeno 6 letture;



contemporaneamente dalla stazione oggetto del monitoraggio e da almeno 4 stazioni di riferimento, siano elaborati e certificati dall'ente sovra-nazionale che gestisce la rete o comunque da un ente esterno alla società petrolifera. Le stazioni installate dovrebbero essere il più possibile conformi alle specifiche (relative a ricevitore, antenna, calotte protettive, caratteristiche di acquisizione, posizione, documentazione) necessarie per poter essere incluse nel network di riferimento stesso.

L'istituzione di una stazione CGPS dovrebbe di norma essere previsto sui capisaldi di riferimento delle reti di livellazione e sulle piattaforme di produzione dei giacimenti off-shore, almeno una per campo, ubicata possibilmente in posizione baricentrica rispetto allo sviluppo areale dei livelli mineralizzati. Altri punti di particolare interesse dove è consigliabile l'installazione di un GPS permanente sono gli assestimetri ed i mareografi, questi ultimi se installati nelle aree di potenziale subsidenza per estrazione di idrocarburi.

Data la rumorosità intrinseca del segnale GPS acquisito, soprattutto sulla componente verticale dello spostamento (Figura 3), la stima di un trend di subsidenza/rebound statisticamente significativo deve essere eseguito su un periodo di rilevamento pari ad almeno 12 mesi.

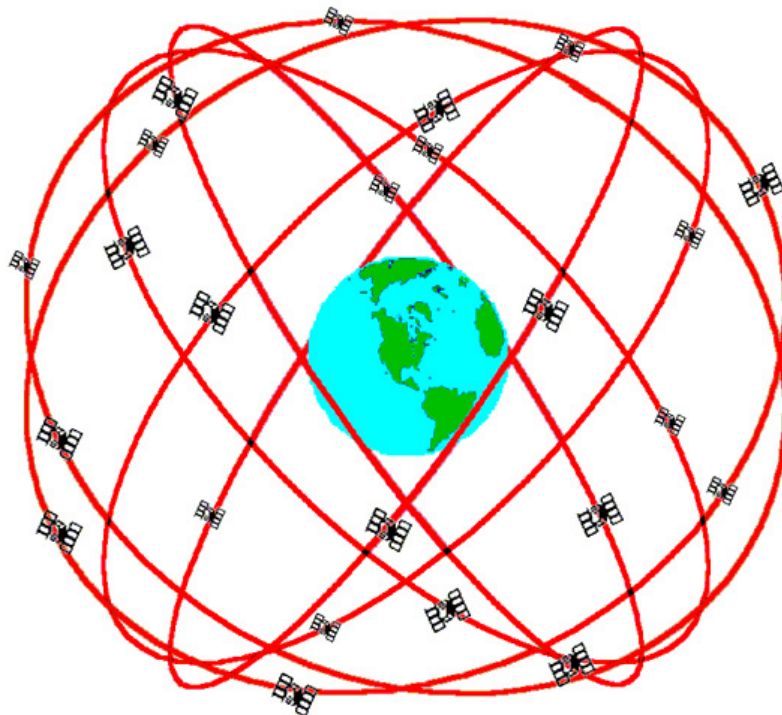


Figura 2. Rappresentazione schematica della costellazione NAVSTAR.

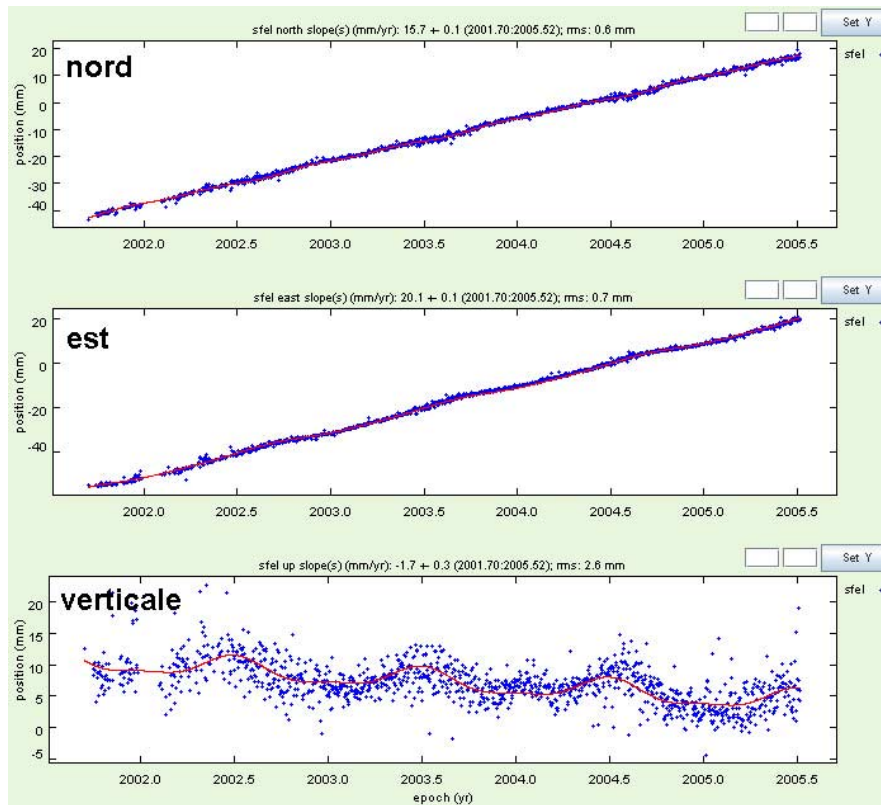


Figura 3. Esempio di acquisizione alla stazione CGPS di San Felice (Venezia). La linea rossa rappresenta il modello di interpolazione delle registrazioni.

3.1.3 Rilievi interferometrici SAR

Un'altra tecnica, sviluppata nel corso degli ultimi 5-10 anni, che può essere utilmente impiegata nel monitoraggio della subsidenza riguarda l'analisi interferometrica di dati radar da satellite. Il metodo consente oggi la mappatura dello spostamento della superficie terrestre su aree estese con elevata precisione (confrontabile con quella della livellazione di alta precisione).

Il *radar ad apertura sintetica* (Synthetic Aperture Radar - SAR) è un sensore attivo, montato a bordo di satelliti, che emette radiazioni elettromagnetiche e registra la potenza del segnale riflesso dalla superficie calcolando anche il tempo intercorso fra l'emissione ed il ritorno del segnale stesso. L'onda trasmessa infatti, dopo essersi propagata attraverso l'atmosfera, raggiunge la superficie terrestre, e parte dell'energia viene riflessa e acquisita dall'antenna (Figura 4). Un'immagine SAR è quindi definita dall'ampiezza e dalla fase del segnale retro-diffuso che proviene dalla superficie investigata. In particolare, l'ampiezza individua la quota di campo magnetico incidente che ogni singolo bersaglio illuminato riflette verso il sensore (nelle immagini radar di ampiezza appaiono



particolarmente luminose le strutture metalliche) e la fase racchiude l'informazione relativa alla distanza tra sensore e bersaglio. L'analisi interferometrica consiste nello studio dell'evoluzione della fase tra due distinte acquisizioni; i più importanti aspetti responsabili di variazioni di fase sono la topografia, la variazione delle condizioni atmosferiche e appunto gli eventuali fenomeni di movimento della superficie terrestre.

L'analisi interferometrica viene usualmente condotta utilizzando i dati rilevati dai satelliti dell'European Space Agency (ESA) ERS-1, ERS-2 e EVISAT; qualora necessario, per aumentare la quantità di informazioni a disposizione, potrà essere presa in considerazione la possibilità di utilizzare anche le immagini fornite dai satelliti canadesi Radarsat e giapponesi JERS, nonché da nuovi vettori già attualmente in fase di sperimentazione avanzata (ad esempio TerraSAR-X del German Aerospace Center). Anche nel caso dello sviluppo di un nuovo giacimento, sarà utile eseguire l'analisi a partire dal 1992 (data di inizio del funzionamento di ERS-1) per poter ricostruire l'evoluzione spazio-temporale della subsidenza storica; sarà importante inoltre pianificare con sufficiente anticipo l'acquisizione delle nuove immagini essendo attualmente la politica di registrazione solamente *on demand*.

Diverse sono le strategie di elaborazione dei dati che possono essere utilizzate:

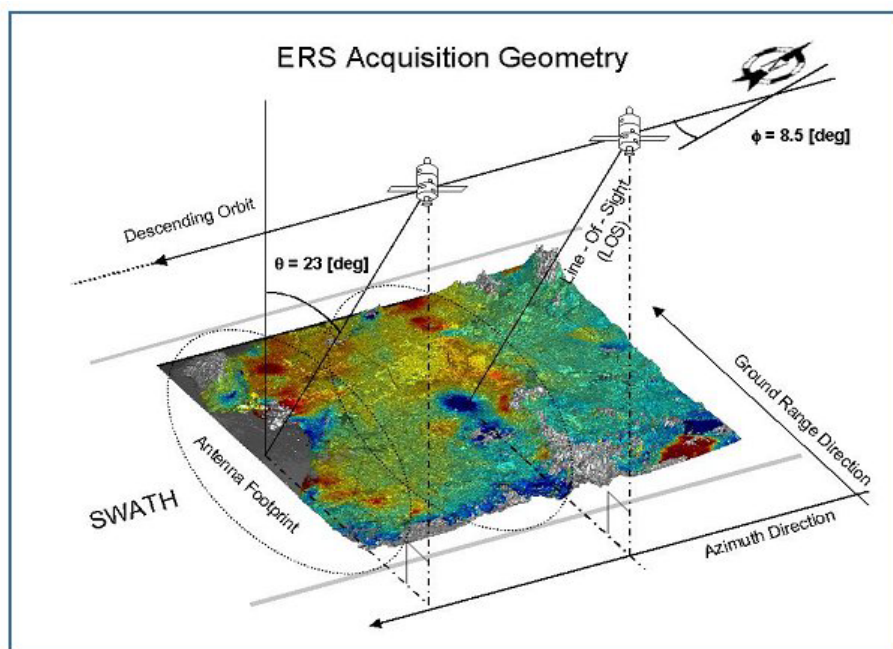


Figura 4. Schematizzazione del rilievo SAR.

- interferometria differenziale SAR convenzionale (DInSAR): qualora l'area di indagine sia caratterizzata dalla presenza di centri abitati di estensione significativa (sui quali il DInSAR è in grado di fornire l'interpretazione della fase interferometrica), questo tipo di analisi è preferibile in quanto, eseguendo una media dello spostamento all'interno di ciascun pixel (della dimensione di circa 20×20 m), viene fornita una risposta rappresentativa dello spostamento a scala regionale eliminando picchi locali relativi, ad esempio, ad instabilità strutturali. Tecniche di *stacking* su serie di interferogrammi possono essere utilizzate per studiare l'evoluzione temporale degli spostamenti;
- analisi standard su diffusori puntuali: la tecnica dei diffusori puntuali è stata inizialmente sviluppata presso il Politecnico di Milano con l'acronimo PS (Permanet Scatterers), ed è ora applicata da altri enti di ricerca e ditte in diverse parti del mondo con acronimi simili, ad esempio IPTA (Interferometric Point Target Analysis) dalla svizzera Gamma Remote Sensing AG. L'esecuzione dell'analisi interferometrica su singoli diffusori particolarmente riflettenti, puntuali (con dimensione inferiore al pixel di acquisizione) e permanenti (sono presenti in tutte le immagini SAR) consente di estendere la metodologia SAR anche ad aree rurali sulle quali vengono rilevati gli spostamenti di singole strutture quali fabbricati, tralicci elettrici, ecc. Si suggerisce l'uso standard di tale metodologia se l'obiettivo è quello di fornire una mappatura dei fenomeni di deformazione superficiale di territori rurali di elevata estensione;
- analisi avanzata su diffusori puntuali: è da utilizzare per aree limitate di particolare interesse per le quali è necessario rendere massimo il contenuto informativo e deve in generale essere eseguita in cascata all'analisi standard. Qualora debbano essere monitorati target particolari si può far uso di riflettori artificiali passivi (Figura 5) installati sui punti di interesse; sono da preferirsi riflettori tipo *Square Trihedral Corner Reflector* o *Triangular Trihedral Corner Reflector* i quali, a parità di sezione utile riflettente, sono caratterizzati dalla massima copertura angolare.

Poiché il metodo fornisce spostamenti relativi, si suggerisce di agganciare le analisi SAR a capisaldi di livellazione e/o stazioni GPS permanenti.





Figura 5. Riflettore artificiale passivo tipo *Triangular Trihedral Corner Reflector*.

3.2 Misure in giacimento

Una previsione attendibile con l'ausilio di modelli matematico-numeriche della subsidenza attesa a seguito dello sviluppo di un giacimento richiede che durante la vita produttiva del campo vengano monitorate con un'opportuna cadenza temporale due grandezze di giacimento: la compattazione degli strati mineralizzati dai quali viene estratto l'idrocarburo e la pressione dei fluidi di strato.

3.2.1 Compattazione profonda

La misura in-situ della compattazione degli strati di giacimento assume grande importanza in quanto consente una stima realistica delle proprietà geomeccaniche delle rocce che si depressurizzano.

Tale misurazione può oggi essere eseguita con la tecnica dei marker radioattivi; due sono le società che, presenti sul mercato internazionale, forniscono questo servizio: Schlumberger attraverso la metodologia FSMT (Formation Subsidence Monitoring Tool) e Baker Atlas con la sonda CMI (Compaction Monitoring Instrument). La tecnica dei marker misura la distanza fra proiettili (marker) leggermente radioattivi sparati ad intervalli regolari di circa 10.5 m nella parete del pozzo al termine della perforazione e prima della posa del tubo di rivestimento. La compattazione indotta dalla depressurizzazione della roccia serbatoio durante la coltivazione e/o la



seguinte espansione che ha luogo quando, al termine della vita produttiva del giacimento, si ha un naturale recupero della pressione di strato, sono fornite dalla misurazione periodica della variazione della distanza tra le coppie di marker (Figura 6). L'intervallo di profondità complessivo su cui eseguire il monitoraggio dovrebbe comprendere l'intero "gross pay" del giacimento, e possibilmente anche le rocce di copertura. Pertanto per il controllo dell'intero spessore di interesse è in genere necessario posizionare fino ad alcune decine di marker.

La precisione nominale delle sonde FSMT e CMI è pari a 1 mm su 10.5 m, assicurando la misura di compattazioni o espansioni con entità superiore a 1 mm. Per il conseguimento di tale precisione è opportuno adottare la seguente procedura:

- 1- usare pozzi dedicati (non utilizzati per la coltivazione) verticali; la verticalità potrebbe essere limitata all'intervallo in cui sono ubicati i marker qualora i tratti inclinati non provochino disturbo al movimento della sonda di misura la cui velocità di spostamento deve essere il più possibile costante durante la registrazione;
- 2- acquisire una conoscenza di dettaglio della sequenza litostratigrafica degli intervalli monitorati utilizzando, ad esempio, log di pozzo tipo SHDT (Stratigraphic High-resolution Dipmeter Tool);
- 3- ubicare i marker con accuratezza, verificandone la penetrazione di infissione nella parete del pozzo; una profondità troppo elevata potrebbe infatti precludere la corretta registrazione del segnale radioattivo;
- 4- posizionare i marker con un intervallo d il più possibile uguale alla distanza tra i rilevatori di radiazione posti sulla sonda di registrazione ($d=10.5$ m nelle sonde FSMT e CMI); per avere maggiore densità di punti di controllo, il posizionamento può avvenire a distanze verticali minori di 10.5 m pari comunque a frazioni intere di d ;
- 5- ciascuna misurazione deve essere composta da almeno quattro passaggi della sonda al fine di poter ridurre gli errori di registrazione tramite un'elaborazione statistica dei dati;
- 6- deve essere effettuata un'accurata calibrazione del sistema di misura; l'analisi a posteriori delle registrazioni deve essere in grado di eliminare i disturbi dovuti alla deformazione del cavo di trascinamento della sonda ed alla temperatura.



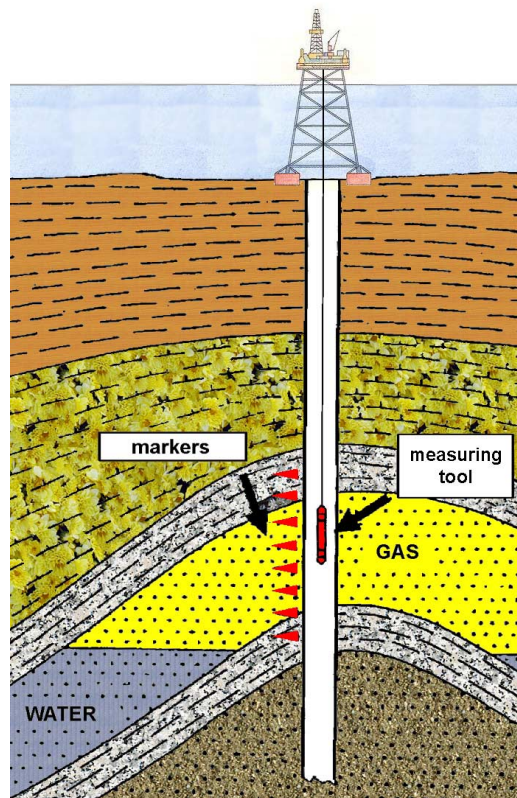


Figura 6. Rappresentazione schematica del monitoraggio in-situ con marker radioattivi.

Indicativamente, l'intervallo temporale tra due successivi monitoraggi può essere fissato in un anno. Si suggerisce tuttavia che tale periodo venga ridotto qualora si verificano in giacimento rapide variazioni di pressione (maggiori di 50 bar/anno); al contrario, se la pressione di strato cambia lentamente (meno di 10 bar/anno), la frequenza del monitoraggio può essere opportunamente diminuita.

Poiché la letteratura specialistica ha evidenziato come in uno stesso bacino sedimentario/petrolifero le proprietà geomeccaniche delle rocce siano pressoché indipendenti dalla posizione geografica (dipendendo principalmente dalla profondità, pressione dei fluidi di strato, ciclo di carico, caratterizzazione lito-mineralogica dei sedimenti) e dato che le misure con sonde FSMT/CMI sono molto costose, si ritiene che la tecnica dei marker radioattivi vada applicata ogniqualvolta si preveda che lo sviluppo di un giacimento possa provocare un impatto ambientale significativo o quando non siano presenti nel medesimo bacino altri pozzi attrezzati a marker con condizioni di profondità, pressione dei fluidi, ecc., simili a quello oggetto di pianificazione.

3.2.2 Pressione dei fluidi di strato

La variazione di pressione indotta nelle formazioni profonde dall'estrazione di idrocarburi è un parametro di fondamentale importanza al fine di valutare la sostenibilità ambientale dello sfruttamento della risorsa naturale: *in primis*, consente la calibrazione del modello matematico-numerico di produzione che fornisce la forzante ai modelli di previsione della subsidenza; inoltre, è indispensabile, assieme alle misure di compattazione in sito, per la caratterizzazione geomeccanica delle formazioni profonde. L'andamento temporale della pressione statica nelle formazioni produttive dovrebbe pertanto essere monitorato in modo sistematico, in particolare quando vengono eseguite le misure di compattazione profonda con le sonde FSMT o CMI.

Tali misure, di prassi comune in ambito petrolifero, possono essere eseguite sia in fori scoperti, utilizzando misurazioni tipo RFT (Repeat Formation Tester) o MDT (Modular Formation Dynamics Tester), sia in fori tubati calando nel pozzo una sonda tipo PTS (Pressure Temperature Sonde), previa sospensione della coltivazione per un adeguato periodo di tempo. I pozzi in cui si effettuano le misure di pressione usualmente non coincidono con quelli ove sono posizionati i marker radioattivi e non sempre è possibile eseguire simultaneamente le due misurazioni (compattazione degli intervalli monitorati a marker e pressione di strato); di conseguenza, è importante che la società responsabile della coltivazione del giacimento effettui una previsione della pressione in corrispondenza ai pozzi a marker nell'istante in cui è effettuata la rilevazione della loro posizione. Ciò può essere ottenuto attraverso una semplice interpolazione spazio-temporale delle registrazioni a disposizione o, in modo più accurato, ricostruendo la pressione col modello matematico-numerico di produzione del campo calibrato sulle misurazioni eseguite.

La pressione dei fluidi di strato dovrebbe essere misurata non solo in giacimento ma anche nell'acquifero; ciò permette una corretta valutazione della propagazione del disturbo di pressione indotto dalla coltivazione e, di conseguenza, dell'estensione della zona che si compatta. In casi eccezionali di particolare vulnerabilità ambientale, dovrebbe essere presa in considerazione l'esecuzione di almeno un pozzo spia nell'acquifero connesso al giacimento. Si suggerisce comunque che, ove per motivazioni tecnico-economiche non fosse possibile terebrare pozzi di monitoraggio *ad hoc*, durante la perforazione di nuovi pozzi sia esplorativi che produttivi vengano eseguite delle misure di pressione statica tipo MDT negli acquiferi laterali o di fondo in connessione idraulica con i livelli produttivi di tutti i giacimenti presenti nell'area.



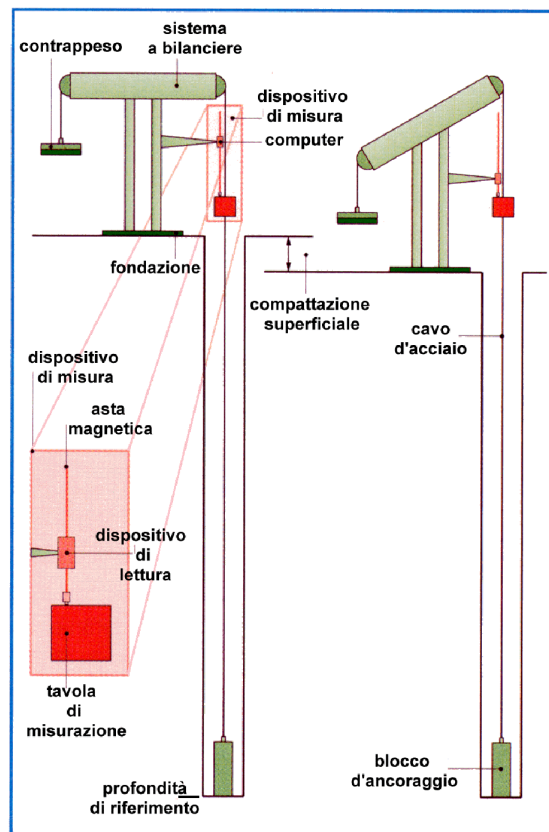


Figura 7. Rappresentazione del principio di funzionamento di un estensimetro verticale per la misura della compattazione superficiale.

3.3 Misura della compattazione superficiale

Per individuare il contributo alla subsidenza complessiva fornita dalla compattazione del sistema multi-acquifero superficiale si raccomanda l'uso di assestimetri. L'assestimetro è costituito da un pozzo dedicato, perforato fino ad una profondità massima di 400-500 m (profondità entro la quale sono generalmente compresi gli acquiferi soggetti a emungimento idrico), nel quale viene inserita una barra in acciaio. L'asta è ancorata a fondo pozzo e in sommità è agganciata ad un bilanciere che la mantiene in tensione e ne registra gli spostamenti rispetto alla superficie del terreno (Figura 7).

Tra gli accorgimenti da adottare per ottenere una precisione di misura della compattazione dell'ordine del millimetro (confrontabile quindi con quella tipica delle misure di subsidenza) vengono elencati i seguenti:

- eseguire il rivestimento del foro in spezzoni con giunti telescopici per evitare che la rigidità assiale del tubo possa modificare il comportamento del terreno circostante;



- posizionare all'interno del rivestimento del foro una serie di manicotti/cuscinetti a scorrimento assiale per evitare punti di contatto, e quindi attriti, tra l'asta di misura ed il rivestimento stesso;
- utilizzare per il tratto più superficiale (20-30 m) una barra in acciaio invar a bassa dilatazione termica e posizionare alcune sonde tipo PT100 per evidenziare eventuali correlazioni tra i movimenti registrati e le oscillazioni di temperatura.

È infine opportuno accoppiare l'assestometro ad uno o più piezometri per monitorare le variazioni della pressione negli acquiferi maggiormente sfruttati e ad una stazione GPS permanente per quantificare gli spostamenti assoluti.

3.4 Rilievi microsismici

È noto in letteratura che la coltivazione di idrocarburi nel sottosuolo può indurre fenomeni microsismici. Qualora il progetto venga condotto in aree caratterizzate da intensa attività tettonica, si ritiene utile l'allestimento di una rete locale di monitoraggio microsismico (magnitudo inferiore a 1.5-2) per la valutazione della possibile sismicità indotta.

3.5 Rilievi altimetrico-batimetrici

Benché la precisione dei rilievi altimetrici e batimetrici non sia tale da poter utilizzare tali dati per la valutazione della subsidenza (se non in caso di spostamenti verticali dell'ordine del metro), il loro utilizzo può risultare comunque di interesse per completare il quadro conoscitivo del territorio al di sotto del quale sono ubicati i giacimenti di idrocarburi di cui si prevede la coltivazione.

I rilievi altimetrici a terra vengono attualmente condotti con il sistema LIDAR (Light Detection And Ranging). Il LIDAR è una tecnica di telerilevamento "attivo" che viene effettuata con un mezzo aereo sul quale è installato un laserscanner composto da un trasmettitore (essenzialmente un laser), un ricevitore (costituito da un telescopio) ed un sistema di acquisizione dati (Figura 8a). La peculiarità del sistema è l'altissima velocità di acquisizione dei dati (più punti per m²) abbinata ad una elevata accuratezza (da 3-30 cm nominali per altitudini di rilievo tra 200 e 3000 m).



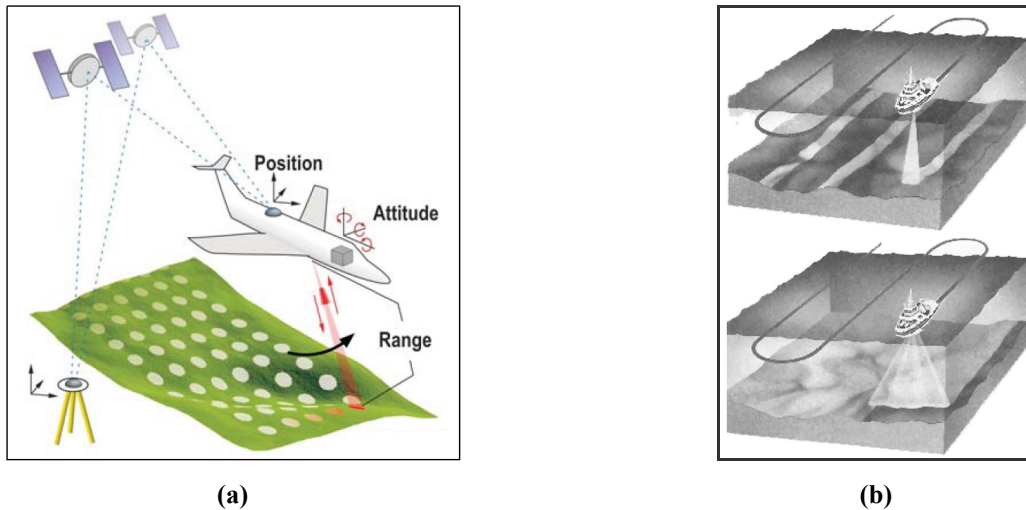


Figura 8. (a) Rappresentazione schematica di un rilievo LIDAR; (b) rilievo batimetrico single-beam (sopra) e multi-beam (sotto).

L'esecuzione di un rilievo LIDAR permette la costruzione di modelli digitali del terreno (DEM - Digital Elevation Model, DTM - Digital Terrain Model, DSM - Digital Surface Model, Figura 9) che possono essere utilizzati per mettere a punto modelli di carico degli edifici allo scopo di quantificare il contributo di eventuali cedimenti delle fondazioni alla subsidenza antropica rilevata con le tecniche prima descritte.

I rilievi batimetrici vengono correntemente condotti con sistemi *single-* o *multi-beam* (Figura 8b). Si tratta di apparecchiature sonar acustiche che rilevano le distanze tra un trasduttore ed il fondale marino o qualsiasi altro target presente sul fondo. Il trasduttore del sistema è composto da tanti ricevitori che rilevano l'eco di ritorno proveniente dal suono emesso dal trasmettitore e riflesso dal fondo. Rispetto alle classiche metodologie di rilievo batimetrico con un normale ecoscandaglio (single-beam), la strumentazione multi-beam esegue la misura di 60, 100 o 240 profondità contemporaneamente a seconda della sua apertura angolare, consentendo così una mappatura bidimensionale del fondale. L'accuratezza nella misura è dell'ordine di 5-20 cm, dipendendo dalla profondità del fondale. Recentemente, sono stati messi a punto anche sistemi LIDAR per la misura del tirante d'acqua e, di conseguenza, per il rilievo batimetrico in ambito costiero.

Infine, rilievi fotogrammetrici e riprese multispettrali satellitari ad alta definizione (QuickBird o Ikonos) possono essere utilizzati per il controllo temporale dell'evoluzione del litorale, dei parametri morfologici, geometrici ed antropici. L'arretramento della linea di riva su spiagge sabbiose a limitata pendenza come, per altro, l'aumento della pendenza del profilo trasversale della spiaggia

sommersa sono degli indici collegabili alla subsidenza della costa. Si deve tuttavia tenere in debita considerazione il fatto che molteplici sono i fattori che concorrono nell'evoluzione dell'ambiente costiero (ad esempio, le correnti litoranee, l'apporto di sedimenti dai corsi d'acqua, i ripascimenti artificiali, le strutture rigide a mare) per cui risulta generalmente impossibile valutare la subsidenza da sole misure batimetriche eseguite sottocosta. Una relazione di causa-effetto più diretta potrebbe invece ritrovarsi al largo, al di fuori della zona di trasporto litoraneo di sedimenti, dove però l'accuratezza dei metodi di rilievo batimetrico è inferiore.

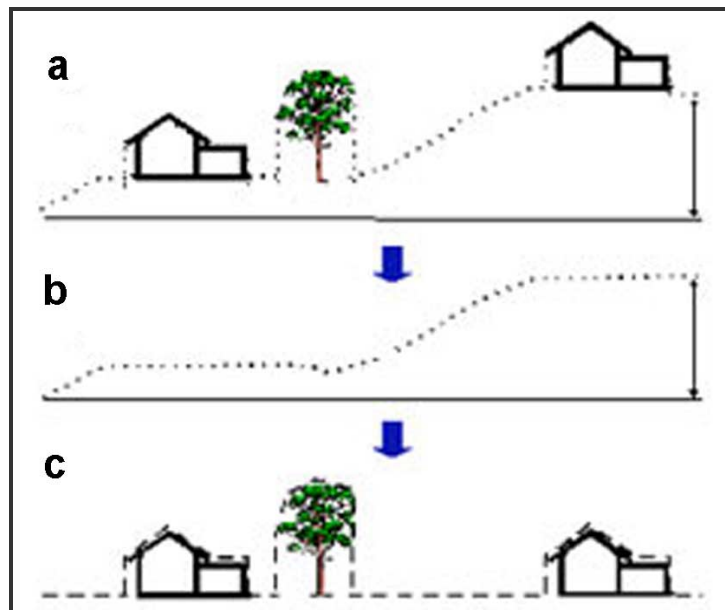


Figura 9. (a) Digital Elevation Model; (b) Digital Terrain Model; (c) Digital Surface Model.

4. PREVENZIONE E MITIGAZIONE

Quando la subsidenza antropica attesa o sperimentata è superiore al limite di accettabilità concordato con le parti interessate devono essere pianificati ed attuati opportuni programmi di prevenzione e mitigazione.

La riduzione del fenomeno subsidenziale e/o il controllo della sua evoluzione nello spazio e nel tempo possono essere conseguiti con una duplice modalità (Figura 10):

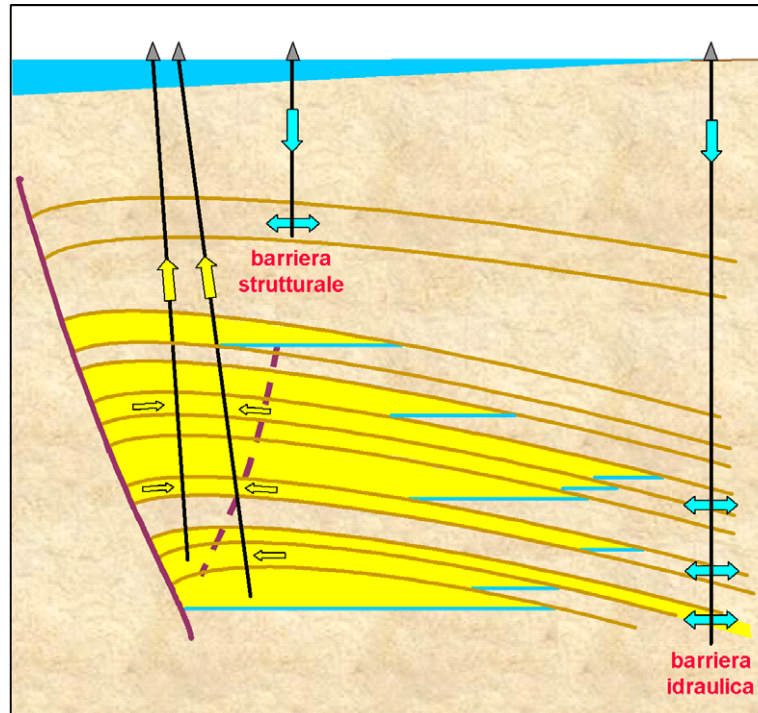


Figura 10. Barriera “idraulica” e barriera “strutturale” per mitigare la subsidenza antropica per estrazione di idrocarburi.

- 1- per mezzo di un progetto di *pressure maintenance* ovvero con la creazione di una barriera "idraulica" ottenuta iniettando acqua nel giacimento o nell'acquifero in contatto idraulico con il campo; ciò al fine di aumentare la pressione in giacimento arrestando l'eventuale ulteriore subsidenza o di limitare il propagarsi della depressurizzazione nell'acquifero e quindi controllare l'estensione dell'area subsidente;
- 2- per mezzo di un progetto di *pressure build-up* che genera una barriera “strutturale” alla propagazione della compattazione in superficie tramite l'iniezione d'acqua in acquiferi vergini sovrastanti il giacimento, i quali, espandendosi, annullano gli effetti in superficie della compattazione più profonda.

È importante che la composizione chimica dell'acqua iniettata sia valutata con prove di laboratorio per verificarne la conformità alla normativa vigente e per assicurarsi che non interagisca con la roccia della formazione ove si inietta, indebolendone la struttura e favorendone così la compattazione; ciò è particolarmente importante in formazioni carbonatiche tipo chalk dove il collasso della matrice porosa comporterebbe un significativo aumento della compressibilità inducendo una subsidenza addizionale nell'area sovrastante il giacimento.



È opportuno che il progetto di iniezione sia pianificato e controllato con il modello di produzione del giacimento ed il modello geomeccanico di subsidenza/rebound. L'applicazione modellistica dovrà identificare il numero, la posizione e la profondità ottimale dei pozzi iniettori in relazione all'obiettivo da raggiungere; dovranno essere quantificati i volumi e le portate da iniettare, nonché l'opportuna pressione massima di iniezione (relativamente alla profondità e caratteristiche geomeccaniche della roccia) che non dovrà essere superata per prevenire fenomeni di fratturazione della roccia in cui il fluido è iniettato. Il modello potrà servire quindi per effettuare un'analisi di sensitività sui parametri in gioco più incerti e di maggiore impatto sul processo di mitigazione.

Definito il progetto di iniezione, dovranno essere condotte apposite prove di iniettività per verificare l'effettiva permeabilità/ricettività della formazione. Il programma originario dovrà essere calibrato ed adattato man mano che nuove informazioni (andamento delle pressioni di strato, valori di compressibilità da misure con marker radioattivi, rilievi di subsidenza) verranno raccolte durante lo sviluppo del campo e l'esecuzione delle iniezioni, elaborate e rese disponibili. Le conseguenze di queste eventuali variazioni sull'obiettivo finale dovranno essere simulate e verificate con la modellazione matematico-numerica.

REFERENZE

- Baù, D., Ferronato, M., Gambolati, G., Teatini, P., 2002. Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique, *Geotechnique*, 52 (8): 605-616.
- Biot, M.A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation. *J. Appl. Phys.*, 12 (2): 155-164.
- Dusseault, M.B., Van Domselaar, H.R., 1982. Unconsolidated sand sampling in Canadian and Venezuelan oil sands. In: Proc. 2nd Int. Conf. on "The future of heavy crude and tar sands", Meyer R.F. et al. (eds.), Caracas (Venezuela), Chapter 39, 336-348.
- Freeze, R.A., 2000. Social decision making and land subsidence. In: *Land Subsidence* (Proc. Sixth Symp. Land Subsidence, Ravenna, Italy, September 2000), Carbognin L. et al. (eds.), La Garangola, Padova (Italy), vol. 1, 353-384.
- Gambolati, G., Teatini, P., Baù, D., Ferronato, M., 2000. Importance of poro-elastic coupling in dynamically active aquifers of the Po river basin, Italy. *Water Resour. Res.*, 36(9): 2443-2459.



- Gambolati, G., Teatini, P., Ferronato, M., 2005a. Anthropogenic land subsidence. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Anderson M. G. (ed.), John Wiley & Sons, Chichester (UK), Vol. 4, Chapter 158, 2443-2459.
- Gambolati, G., Teatini, P., Ferronato, M., 2005b. Basic conceptual guidelines for a sustainable gas/oil field development. In: *Land Subsidence* (Proc. Seventh Int. Symp. Land Subsidence, Shanghai, PR China, October 2005), Zhang A. et al. (eds), Shanghai Scient. & Tech. Publ., Vol. II, 919-924.
- Geertsma, J., 1973. Land subsidence above compacting gas and oil reservoirs. *J. Pet. Technology*, 25: 734-744.
- Mindlin, R.D., Cheng, D.H., 1950. Thermoelastic stress in the semi-infinite solid. *J. Appl. Phys.*, 21: 931-933.
- Taylor, D.W., 1967. *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York (NY).

