

# Un unico parametro per la valutazione delle prestazioni termiche e sismiche di un edificio

Gian Michele Calvi<sup>1</sup> ■

## 1. EAL

Riprendo un tema discusso negli editoriali comparsi negli ultimi due numeri di questa rivista, per scrivere di nuovo di *Expected Annual Loss*, mi perdoneranno i lettori che ne sanno più di me.

Come ho sin troppe volte cercato di illustrare, con EAL si indica il costo medio annuo che ci si attende di dovere sostenere per riparare i danni indotti da eventi sismici<sup>2</sup> (intesi come danni "diretti" alla struttura ed agli elementi non strutturali), eventualmente includendo i cosiddetti costi "indiretti", ovvero quelli da sostenere per mancata produzione, perdita di competitività, rilocalizzazione ecc.

Da un punto di vista concettuale, l'EAL può essere rappresentato come illustrato in Figura 1, e generalmente oscilla tra valori dell'ordine dello

0.5% per edifici ben progettati secondo norme moderne e valori di qualche per cento per edifici privi di appropriate misure per il miglioramento della risposta sismica.

Si noti:

- Non necessariamente ad un edificio con una bassa probabilità di collasso, che soddisferebbe in modo più che appropriato quanto previsto dalle norme in termini di stato limite ultimo, corrisponde un EAL particolarmente basso. Può infatti darsi il caso di un edificio strutturalmente adeguato che subisce danni rilevanti agli elementi non strutturali anche per valori modesti, e quindi frequenti, dell'intensità del moto. In questo caso l'EAL può risultare elevato, in quanto l'edificio richiederà frequentemente costosi interventi di riparazione e indurrà forti costi di rilocalizzazione e mancata produzione.

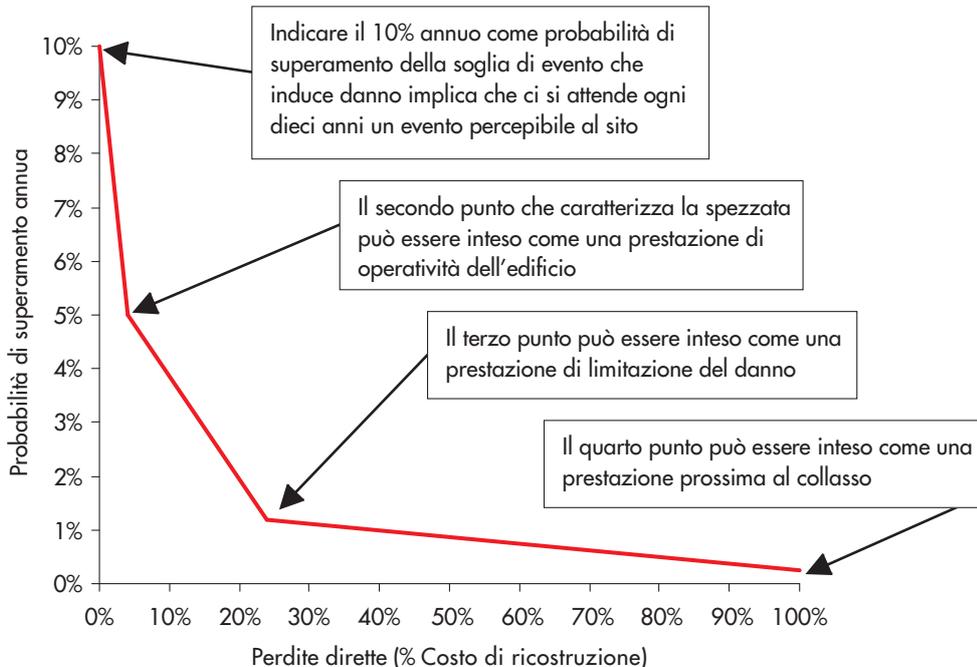


Figura 1  
Illustrazione grafica del concetto di costo medio annuo delle perdite attese (EAL), rappresentato dall'area che sottende la spezzata. I punti che caratterizzano la spezzata indicano la probabilità annua di superamento di determinate prestazioni. Nell'esempio in esame le prestazioni considerate sono di avere un danno, anche minimo (con probabilità assunta nel 10%), di mantenere l'operatività dell'edificio (costo da sostenere 4% del costo di ricostruzione - RC, probabilità 5%), di limitare il danno a situazioni riparabili (costo 24% di RC, probabilità 1.2%), di evitare il collasso (costo 100%, probabilità 0.25%).

<sup>1</sup> Istituto Universitario di Studi Superiori (IUSS), Pavia. [www.iusspavia.it](http://www.iusspavia.it)

<sup>2</sup> Si vedano gli ultimi due editoriali e, per chi volesse entrare nel merito delle formulazioni matematiche, il documento seguente ed i riferimenti in esso indicati: Welch D.P., Sullivan T.J., Calvi G.M. (2012) - "Developing Direct Displacement-Based Procedures for Performance-Based Earthquake Engineering," ROSE Research Report No. 2012/03, IUSS Press, Pavia.

- EAL indica un valore medio che può oscillare fortemente di anno in anno, in particolare risultando pari a zero per anni in cui non si manifesta alcun evento che induca danni all'edificio e potenzialmente molto alto negli anni in cui si verifica un evento forte. In un certo senso si potrebbe vedere il problema come la necessità di accumulare anno per anno le risorse necessarie per potere fare fronte a quanto indotto dall'evento raro.

Per calcolare quantitativamente, sia pure in modo semplificato, il valore di EAL di un edificio, occorre disporre di una curva di vulnerabilità dell'edificio e di una curva di pericolosità che caratterizzi il sito di costruzione, entrambe espresse per il medesimo parametro di scuotimento (ad esempio la PGA).

La vulnerabilità dell'edificio potrebbe essere espressa come indicato in Figura 2, applicando semplici derivazioni a quanto normalmente effettuato da un tecnico in sede di progettazione di un nuovo edificio o di valutazione della sicurezza di un edificio esistente.

Si tratta in effetti di associare ad un parametro di intensità del moto (in questo esempio l'accelerazione massima al terreno, PGA) una stima del costo di riparazione atteso.

La cosa può sembrare strana o inusuale, in realtà è semplice (e normale) associare ad un certo valore del parametro di intensità stime dell'accelerazione attesa ai diversi piani dell'edificio e del corrispondente spostamento interpiano. È altresì semplice associare ai valori di accelerazione e spostamento una quantificazione dei danni attesi a strutture ed elementi non strutturali<sup>3</sup>.

In Figura 2 sono dunque rappresentati due esempi, riferiti a casi di edifici più o meno vulnerabili (si tratta di esempi, quindi non ci si stupisca di valori estremi).

Per il primo di essi (V1, più vulnerabile, si assume che risulti dai calcoli che una PGA pari a 0.2 g induca danni che richiederebbero costi di riparazione pari al 40% del costo di ricostruzione dell'edificio (RC), una PGA di 0.3 g costi pari al 70% di RC, una PGA di 0,4 g costi pari al 100% di RC (si noti che ciò non corrisponde necessariamente al collasso strutturale: la riparazione di un edificio fortemente danneggiato può essere più costosa di una costruzione ex-novo). Nel secondo caso (V2) a PGA 0.2 g corrisponde un costo pari al 15% di RC, a 0.4 g il 20%, a 0.6 g il 40%, a 0.8 g il 100%.

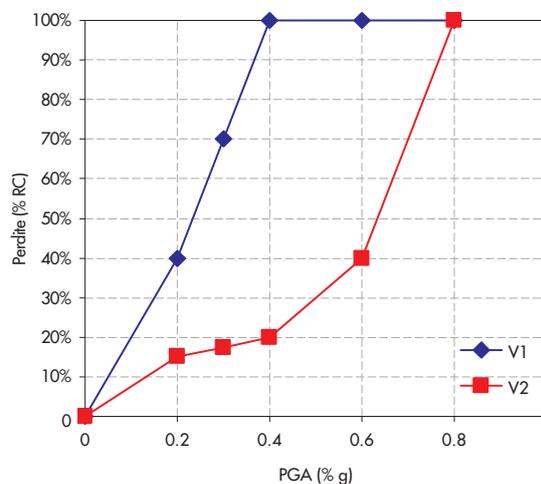
È pertanto evidente che il secondo edificio è meno vulnerabile del primo, non solo nel senso che occorre una accelerazione più elevata per indurre la perdita totale, ma anche nel senso che per qualsiasi valore di accelerazione al terreno il danno atteso è minore.

Non è impossibile immaginare edifici con curve di vulnerabilità che intersecano, ad esempio, quella di V2, cui quindi può corrispondere un danno maggiore per accelerazioni più basse, ma per i quali è richiesta una accelerazione più elevata per indurre il collasso.

La pericolosità del sito può essere espressa nella forma illustrata in Figura 3, in cui è rappresentata l'accelerazione massima al terreno attesa con una definita probabilità di superamento annua.

I due esempi riportati in figura caratterizzano quindi due siti nei quali ci si attendono PGA pari a 0.4 g (H2) e 0.8 g (H1) con probabilità di superamento annua  $1 \times 10^{-4}$ , 0.3 e 0.6 g con

Figura 2  
Perdite attese (in % del costo di ricostruzione - RC) in funzione dell'accelerazione massima al terreno, per due edifici caratterizzati da curve di vulnerabilità diverse.



<sup>3</sup> Anche in questo caso si veda l'editoriale dello scorso numero per entrare maggiormente nei dettagli.

probabilità di superamento annua  $1 \times 10^{-3}$ , 0.1 e 0.3 g con probabilità di superamento annua  $1 \times 10^{-2}$ , 0.05 e 0.1 g con probabilità di superamento annua 1/10.

È pertanto chiaro che la curva H2 rappresenta un sito con pericolosità più bassa del sito H1.

Nel sito H2 ci si attende mediamente un terremoto con PGA 0.05 g o superiore ogni dieci anni.

Si noti che dati di questo tipo sono stati prodotti dall'INGV e sono reperibili in rete per tutto il territorio italiano<sup>4</sup>, con la precisazione che quelli ora disponibili non contengono le amplificazioni locali connesse alla natura del terreno o ad eventuali effetti orografici, che andrebbero quindi integrate caso per caso.

Anche qui, è certamente possibile concepire siti le cui curve di pericolosità si intersecano, ovvero situazioni per le quali un sito ha rispetto ad un altro una più bassa probabilità che si verifichi un moto a più bassa intensità e più alta probabilità che si verifichi un moto a più alta intensità o viceversa.

Dalla combinazione della curva di vulnerabilità di un edificio e della curva di pericolosità del sito in cui è costruito, si possono immediatamente derivare curve del tipo rappresentato in Figura 4, dove sono illustrati, a titolo di esempio, i quattro casi generati dalla combinazione delle curve di pericolosità di Figura 2 e delle curve di pericolosità di Figura 3.

Ciò che si ottiene è la probabilità annua che si verifichi un livello di danno tale da indurre la necessità di una certa spesa, indicata in funzione del valore di costruzione dell'edificio.

Il grafico è del tutto analogo a quello rappresentato in Figura 1 (ad assi invertiti), talché risulta evidente che il valore medio del danno atteso

annuo corrisponde, in ciascun caso, all'area sottesa da ciascuna curva.

È altresì evidente come la combinazione di bassa vulnerabilità (V2) e bassa pericolosità (H2) risulti nel caso con EAL più basso ed al contrario la combinazione di alta vulnerabilità (V1) e alta pericolosità (H1) risulti nel caso con EAL più alto. Negli esempi utilizzati i valori di EAL risulterebbero pari a circa 2.8% di RC (H1V1), 1.0% di RC (H2V1), 0.7% di RC (H1V2) e 0.5% di RC (H2V2).

Si noti, peraltro, che in questo esempio le probabilità di superamento sono state trattate come probabilità di occorrenza, quindi anche per questo i risultati sono da considerarsi approssimati.

Un altro aspetto qui trascurato è la probabilità di superamento ripetuta nel corso del medesimo anno. In generale la possibile ripetizione viene trascurata in quanto per valori alti di scuotimento la probabilità che un certo valore venga superato due o più volte è trascurabile rispetto alla probabilità che quel medesimo valore venga superato una volta sola. Nel caso in cui si considerino valori bassi di PGA, che hanno probabilità di superamento annuali potenzialmente alte e che quindi influiscono sul EAL, la probabilità di ripetizione non è necessariamente trascurabile. Questa è un'altra ragione per cui tutti i calcoli presentati sono approssimati.

## 2. Classi degli edifici in termini di risparmio energetico

Tutti sanno che è oggi necessario avere una certificazione della classe energetica di un edificio, richiesta, ad esempio, ogniqualvolta si proceda a compravendita.

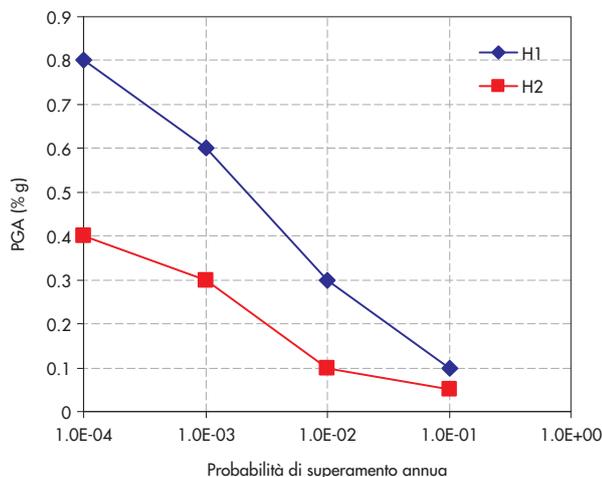
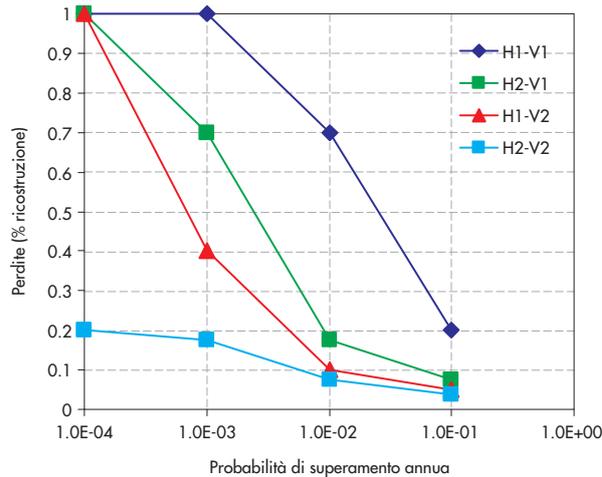


Figura 3  
Esempi di curve di pericolosità di siti diversi, rappresentate dai valori di accelerazione massima attesa al terreno con determinate probabilità di superamento annue. Si noti che la PGA qui indicata è intesa inclusiva delle amplificazioni locali.

<sup>4</sup> <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>; <http://esse1.mi.ingv.it/data/D2.pdf>

Figura 4  
Esempi di curve di rappresentazione del costo annuo medio da affrontare per diversi valori di probabilità di superamento, per combinazioni di edifici con diversa vulnerabilità (V1, V2) collocati in siti con diversa pericolosità (H1, H2). Il costo annuo medio atteso (EAL) è rappresentato dall'area sottostante ciascuna curva<sup>5</sup>.



Tali classificazioni variano da regione a regione, dipendono dalle categorie d'uso dell'edificio, possono considerare o meno le prestazioni estive (e quindi la spesa da sostenere per il raffrescamento) e richiederebbero quindi molto più spazio di quello disponibile (e certo molta più competenza di quella che posso vantare nel settore) per una discussione esaustiva<sup>6</sup>. Tuttavia, non è difficile riconoscere come in generale le classificazioni energetiche si basino sul consumo medio atteso annualmente in termini di energia primaria (poco importa se sia equiparata all'energia elettrica o ai litri equivalenti di gasolio) per metro quadro di edificio. Un esempio è riportato in Figura 5, dove ad un consumo annuale inferiore a 25 kWh per metro quadrato è associata una classe A+, ad un consumo compreso tra 25 e 40 kWh/m<sup>2</sup> è associata una classe A, e così via. In Figura 5 è dunque rappresentato un consumo medio per metro quadrato (EP<sub>tot</sub>), ed appare banale trasformare il consumo in costo (moltiplicando per il costo di un kWh, EUC) ed adimensionalizzare il risultato normalizzando ad una stima del costo di costruzione dell'edificio (RC),

ottenendo un parametro formalmente analogo all'EAL sismico.

Energy Class	Residential kWh/m <sup>2</sup>
A+	EP <sub>tot</sub> < 25
A	25 < EP <sub>tot</sub> < 40
B	40 < EP <sub>tot</sub> < 80
C	80 < EP <sub>tot</sub> < 130
D	130 < EP <sub>tot</sub> < 170
E	170 < EP <sub>tot</sub> < 250
F	250 < EP <sub>tot</sub> < 400
G	EP <sub>tot</sub> > 400

Figura 5  
Esempio di classificazione energetica di un edificio, in termini di consumo annuo medio atteso di energia per metro quadrato di edificio.

D'ora innanzi dunque definirò l'EAL sismico EAL<sub>S</sub> e il costo medio annuo atteso per la climatizzazione EAL<sub>E</sub>, definendo:

$$EAL_E = \frac{EP_{tot} [kWh/m^2] \times EUC [€/kWh]}{RC [€/m^2]}$$

<sup>5</sup> I calcoli utilizzati nell'esempio sono corretti solo se si assume che non ci siano incertezze, e conseguentemente si possono effettuare calcoli di tipo deterministico.

<sup>6</sup> L'indice di prestazione energetica di un edificio, indicato con Ep (energia primaria), è influenzato da quattro fattori fondamentali, descritti brevemente nel seguito. Si osservi che il primo di essi dipende dal contesto ed è in qualche modo associabile al concetto di pericolosità in ambito sismico, mentre gli altri dipendono dalle caratteristiche dell'edificio e sono globalmente associabili al concetto di vulnerabilità.

- CONTESTO: Si riferisce alla fascia climatica di riferimento e quindi alla localizzazione dell'immobile, caratterizzata da clima, vento, altitudine, esposizione, ecc. l'identificazione di una fascia climatica è basata sul calcolo della somma delle differenze positive, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, tra la temperatura dell'ambiente e la temperatura media esterna giornaliera. Il valore così calcolato si definisce Gradi Giorno (GG). Il territorio Italiano si suddivide in sei fasce climatiche in funzione dei gradi giorno, a ciascuna corrisponde un periodo massimo convenzionale di riscaldamento. Si vedano a tal proposito la figura 8 ed i commenti ad essa riferiti.
- FATTORE DI FORMA: È definito come il rapporto tra superficie disperdente (S) e volume riscaldato (V). A rapporti più bassi (poca superficie disperdente, grandi volumi riscaldati) corrispondono edifici più predisposti a raggiungere classi energetiche elevate.
- INVOLUCRO ESTERNO: Le superfici disperdenti opache e finestrate costituiscono l'involucro dell'immobile. Le prestazioni dell'involucro limitano la trasmissione di calore dall'interno verso l'esterno (nelle stagioni fredde) e dall'esterno verso l'interno (nelle stagioni calde). Un involucro a più elevate prestazioni caratterizza edifici più predisposti a raggiungere classi energetiche elevate.
- IMPIANTO TERMICO: L'efficienza dell'impianto di climatizzazione, che può giovare di tecnologie recenti e dell'utilizzo di risorse rinnovabili, incide in modo sostanziale sull'efficienza del sistema edificio-impianto.

I valori numerici che si ottengono per  $EAL_E$ , utilizzando stime ragionevoli per il costo dell'energia e per il costo di costruzione, sono riportati nella Figura 6.

Green Indicator	$EAL_E$ (%)
■ A+	$EAL < 0.50$
■ A	$0.50 < EAL < 0.75$
■ B	$0.75 < EAL < 1.50$
■ C	$1.50 < EAL < 2.50$
■ D	$2.50 < EAL < 3.50$
■ E	$3.50 < EAL < 4.50$
■ F	$4.50 < EAL < 7.50$
■ G	$EAL > 7.50$

Figura 6  
Esempio di classificazione energetica di un edificio, coerente con i dati riportati in Figura 5, normalizzando il consumo in funzione di costo dell'energia e costo di costruzione.  $EAL_E$  indica la spesa annua attesa in percentuale sul costo di costruzione.

### 3. Un unico parametro per valutare prestazioni energetiche e sismiche

È immediato osservare come il costo annuo medio atteso per la climatizzazione di un edificio oscilli nello stesso ambito in cui oscilla il costo annuo medio da sostenere per la riparazione dei danni sismici, tra valori di qualche decimo percentuale per edifici ben costruiti e valori di qualche per cento per edifici con cattive prestazioni. La differenza concettuale tra i due parametri di costo medio annuo atteso, normalizzato al costo di costruzione (o ricostruzione) dell'edificio è sostanzialmente limitata a quanto segue:

- Nel caso sismico si tratta di un costo che deriva dal danno prodotto da un evento; come si è visto il valore medio è prodotto da medie pesate tra valori molto diversi, e pertanto l'incertezza nella sua stima è molto più alta di quella della stima dell' $EAL$  energetico.;
- Nel caso energetico si tratta di un costo da sostenere ogni anno, che oscilla moderatamente attorno alla media, in funzione dello scostamento climatico della stagione rispetto ai valori medi.

È dunque logico e coerente immaginare di produrre una sola tabella, del tipo rappresentato in Figura 7, per entrambi gli indici.

Si noti peraltro che anche sotto il profilo dell'azione sull'edificio, rappresentata dalla pericolosità in ambito sismico, è possibile ravvisare un'analogia (si veda la Figura 8). Una mappa di pericolosità sismica rappresenta infatti la probabilità che un certo livello di scuotimento si verifichi al sito di un edificio. Analogamente, la progettazione energetica di un edificio richiede la definizione di un'azione, che può essere espressa, ad esempio, in termini di gradi giorno medi necessari per il riscaldamento invernale,

come in Figura 8. È evidente che laddove sono necessari minori quantità di energia per il riscaldamento invernale risulterà in generale necessaria una spesa più alta per il raffrescamento estivo.

GRI Classification (Green and Resilient Indicators)	$EAL_E$ or $EAL_S$ (%)
■ A+	$EAL < 0.50$
■ A	$0.50 < EAL < 0.75$
■ B	$0.75 < EAL < 1.50$
■ C	$1.50 < EAL < 2.50$
■ D	$2.50 < EAL < 3.50$
■ E	$3.50 < EAL < 4.50$
■ F	$4.50 < EAL < 7.50$
■ G	$EAL > 7.50$

Figura 7  
Classificazione sismica ed energetica di un edificio, espresse per mezzo del medesimo parametro: il costo annuo medio da sostenere per la riparazione dei danni indotti da eventi sismici ( $EAL_S$ ) e per le spese di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio ( $EAL_E$ ).

L'introduzione e l'uso di parametri confrontabili per la valutazione delle prestazioni sismiche ed energetiche degli edifici consentirebbe l'immediata valutazione della convenienza ed opportunità di investire nell'uno o nell'altro ambito, sia per il proprietario, sia per lo Stato (tenendo comunque in considerazione che i benefici per lo Stato sono certi, quelli per il proprietario dipendono dal termine temporale considerato: investire per il risparmio sismico può non ripagare la spesa se non quando l'edificio sarà abitato da altri; anche per questa ragione può risultare fondamentale prevedere appropriate forme di incentivazione).

Mi si consenta, in chiusura, di rilevare come, a fronte di un contesto concettuale che mi pare chiaro ed auspicabile, siano molti i temi da approfondire, le simulazioni da effettuare, le scelte da operare.

Si osservi, a puro titolo di esempio:

- Il tema è qui affrontato in puri termini economici, senza considerare gli aspetti connessi alla protezione della vita umana, chiaramente attinenti al solo caso sismico, ed in particolare a prestazioni prossime al collasso ed a valori di scuotibilità con bassa probabilità annuale di superamento.
- I vantaggi derivanti da migliori prestazioni termiche degli edifici investono prevalentemente la sfera della proprietà, con vantaggi pubblici essenzialmente connessi alla riduzione della spesa energetica globale ed alla riduzione dell'inquinamento.
- I vantaggi derivanti da migliori prestazioni sismiche dovrebbero essere pertinenti ad ambiti assicurativi (ma nel contesto attuale

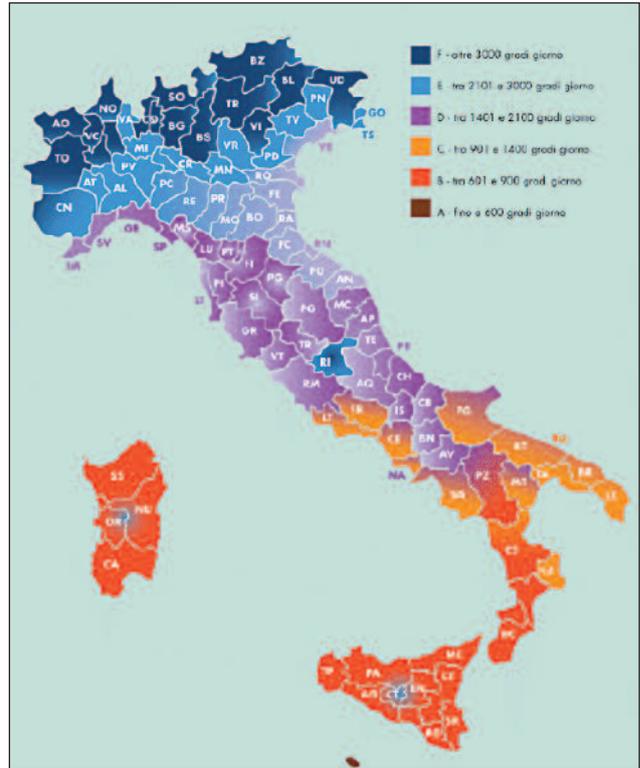
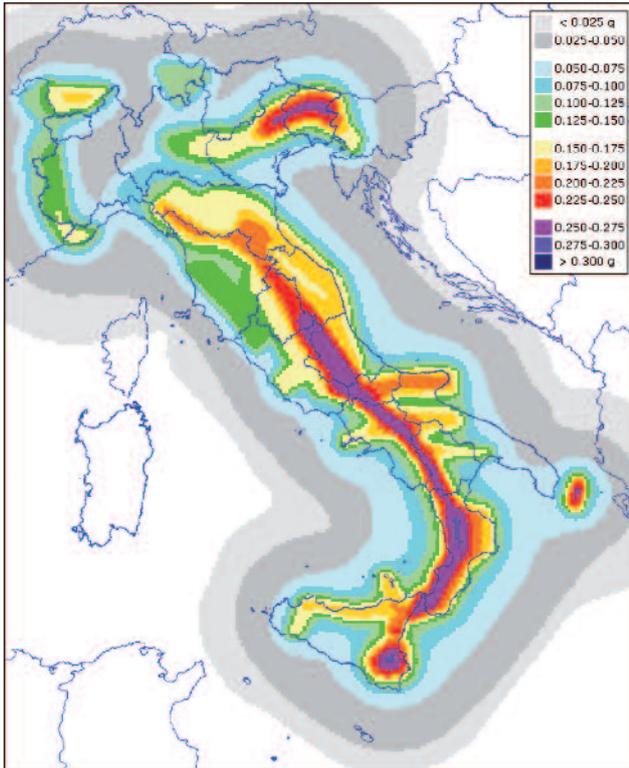


Figura 8  
Confronto tra una mappa di pericolosità sismica (espressa in termini di PGA attesa con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni su terreno rigido) ed una mappa che esprime una forma di "pericolosità climatica", espressa in termini di gradi giorno necessari per il riscaldamento invernale (si veda la nota 6 a piè di pagina).

non lo sono, sia in quanto le compagnie di assicurazione sono restie ad applicare tariffe differenziate in funzione del rischio specifico, sia in quanto le polizze connesse al rischio sismico sono poco diffuse nel nostro paese, sia, infine, in quanto lo Stato è tuttora percepito come il reale "assicuratore ultimo". In tale contesto, i vantaggi derivanti da migliori prestazioni sismiche si risolvono essenzialmente in un vantaggio pubblico).

Di tutto questo mi piacerà discutere ulteriormente in un prossimo editoriale, con qualche

stima quantitativa che consenta valutazioni di indirizzo operativo.

Certo, intanto, non sarebbe certo male procedere a valutazioni di  $EAL_E$  ed  $EAL_S$  in casi reali. Magari qualche lettore ha voglia di provarci?

GIAN MICHELE CALVI