

HARIA-2: UNA METODOLOGIA PER LA PIANIFICAZIONE E L'ANALISI DI EMERGENZE TECNOLOGICHE.

VALIDAZIONE DEL SISTEMA INFORMATICO IN BASE ALL'ANALISI DELL'INCIDENTE DI CITTA' DEL MEXICO!



M. PETEA(+), R. BOVALINI(+), S. GABBRIELLI(°), M. MAZZINI(+),

(+) *Università degli Studi di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione
Via Diotisalvi, 2 - 56126 - PISA*

(°) *THEMAS s.r.l., Via Rustichello da Pisa, 8 - 56126 PISA*

SOMMARIO

La validazione della funzionalità del sistema informatico HARIA-2 rappresenta un passo fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi di progetto. A tale scopo, si è pensato di utilizzare l'incidente di Città del Mexico, che in realtà rappresenta una sequenza incidentale molto complessa, iniziata da una fuga di GPL relativamente grande; questa ha portato ad un UVCE, che ha interessato la zona abitata vicina all'impianto, seguito da una sequenza di esplosioni ed incendi. La maggior parte delle conseguenze alle persone (circa 500 morti e 7000 feriti) è stata provocata dal BLEVE di una o due sfere da 1600 m³ di capacità, avvenuto 69 s dopo l'UVCE, che ha originato a sua volta un "fire-ball" di circa 400 m di diametro.

L'analisi di questa parte dell'incidente consente di verificare la funzionalità e la bontà dei risultati ottenuti con i modelli del modulo "Creazione Scenari Statici", nonché dei "data-bases" Sostanze, Stabilimenti, Impianti, Componenti, Territorio (orografia, meteorologia, distribuzione della popolazione, ecc.) di cui è attualmente dotato il sistema informatico. Ovviamente viene anche verificata la funzionalità del visualizzatore a corredo del sistema HARIA-2.

L'idea base è di trasformare l'analisi sopraindicata in un "sample problem", rendendola parte integrante del software che implementa il sistema informatico, al fine di fornire indicazioni circa la correttezza e la funzionalità dell'installazione da parte di eventuali nuovi utenti.

1. INTRODUZIONE

Per la validazione dell'intero sistema informatico HARIA-2, passo fondamentale per la verifica del raggiungimento degli obiettivi di progetto, si è pensato di utilizzare come incidente di riferimento quello di Città del Mexico [1]: questa scelta è dettata dalla disponibilità di dati ed informazioni, risultato di precedenti studi svolti presso l'allora Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari [2], [3].

La sequenza incidentale iniziò con una fuga di GPL relativamente grande, che portò all'esplosione della nube di vapori infiammabili (UVCE) formatasi; l'UVCE interessò la zona abitata vicina all'impianto e fu seguito da una sequenza di esplosioni ed incendi, con la quasi totale distruzione dello stabilimento Pemex di stoccaggio e distribuzione di GPL e il danneggiamento degli stabilimenti Unigas e Gasomatico vicini. La maggior parte delle conseguenze alle persone (circa 500 morti e 7000 feriti) sono stati provocati dal BLEVE di una o due sfere di 1600 m³ di capacità, avvenuto 69 s dopo l'UVCE, che ha originato a sua volta un "fire-ball" di circa 400 m di diametro [1].

L'analisi di questa parte dell'incidente consente di verificare la funzionalità e la bontà dei risultati ottenuti con i modelli del modulo "Creazione Scenari Statici", nonché l'efficienza dei vari "data-bases" di cui è attualmente dotato il sistema informatico (fig. 1) [4]:

- Sostanze;
- Stabilimenti, impianti e componenti;
- Territorio (orografia, meteorologia, distribuzione della popolazione).

Contemporaneamente viene provato il funzionamento del visualizzatore a corredo del sistema HARIA-2 (fig. 1).

Per inciso, la figura 1 mostra lo schema a blocchi del sistema informatico HARIA-2, evidenziando che esso si propone di considerare i tre sistemi che hanno un ruolo fondamentale nell'emergenza:

- il sistema fisico all'origine dell'incidente (sistema 1);
- il contesto ambientale e sociale in cui l'evento esplica i suoi effetti (sistema 2);
- il sistema della protezione civile (sistema 3) che, interagendo con i precedenti, è in grado di mitigare le

conseguenze dell'incidente.

Il modulo "Creazione Scenari Dinamici", indicato in figura 1, non è stato ancora messo a punto.

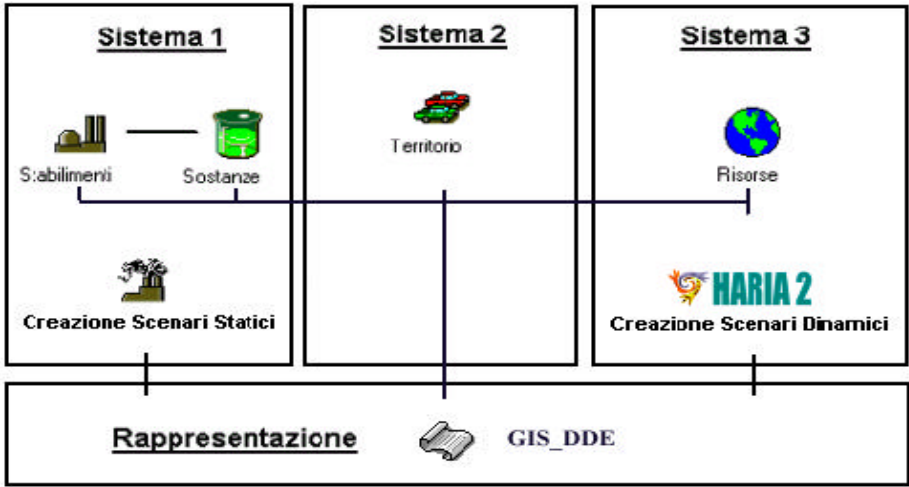


Figura 1. Schema a blocchi del sistema informatico HARIA-2.

2. L'INCIDENTE DI CITTA' DEL MEXICO

Nelle prime ore del 19 novembre del 1984 in San Juan Ixhuatepec, Mexico City, una sequenza di eventi incidentali interessò l'impianto Pemex di distribuzione e stoccaggio di GPL. La planimetria della regione interessata dall'incidente è riportata in figura 2, nella quale sono state anche evidenziate, indicandone i nomi, le varie zone intorno all'impianto. Le conseguenze dell'incidente furono la quasi completa distruzione dello stabilimento, 500 morti e oltre 7000 feriti nella zona abitata al confine sud dell'impianto; l'alta densità di popolazione (40000 abitanti per San Juan Ixhuatepec e circa 100000 considerando anche le zone collinari vicine) e la vicinanza all'impianto contribuirono in modo determinante all'elevato numero di vittime.

Lo stabilimento Pemex, circa nel centro della figura 2 (leggermente spostato a sinistra), era strutturato come riportato nella planimetria di figura 3; nella legenda sono indicate le caratteristiche dei recipienti di GPL corrispondenti ai numeri rappresentati e le altre parti dell'impianto.

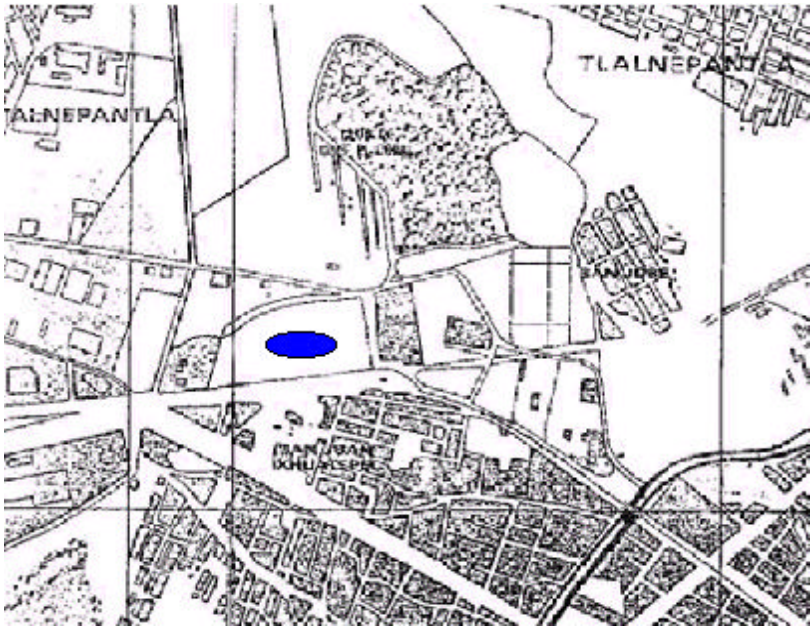


Figura 2. Planimetria della regione interessata dall'incidente di Mexico City, con localizzazione dell'impianto Pemex.

A circa 200 metri dal deposito Pemex (fig. 3), si trovavano i complessi di distribuzione privati Unigas e Gasomatico. Vicino alla Unigas vi erano altri 5 distributori privati, che si rifornivano dalla Pemex attraverso autobotti e contenitori.

Le case più vicine distavano circa 130 m dalle cisterne del deposito.

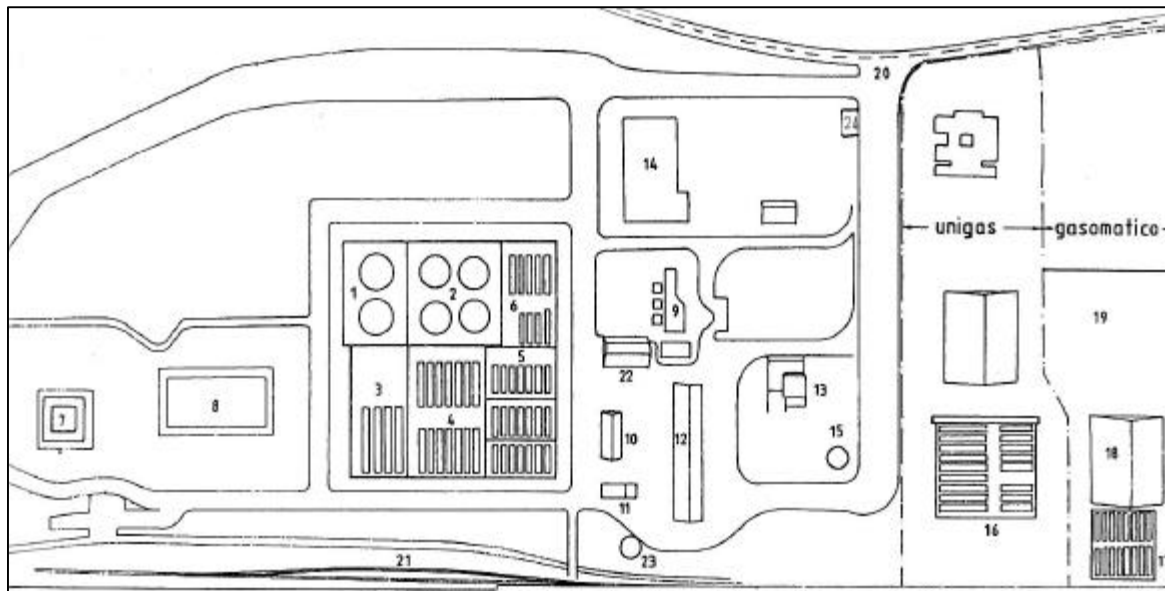


Figura 3. Stabilimento Pemex, con gli impianti della Unigas e Gasomatico.

Legenda

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 - 2 sfere da 2400 m ³ ; ϕ = 16.5 m (Serie F) | 13 - magazzino di gas |
| 2 - 4 sfere da 1600 m ³ ; ϕ = 14.5 m (Serie F) | 14 - manicotto per tubi/valvole |
| 3 - 4 cilindri da 270 m ³ ; ϕ = 32 (x 3.5) m (Serie I) | 15 - torre di acqua |
| 4 - 14 cilindri da 180 m ³ ; ϕ = 21 (x 3.5) m (Serie G, H) | 16 - magazzino Unigas |
| 5 - 21 cilindri da 36 m ³ ; ϕ = 13 (x 2) m (Serie C, D, E) | 17 - magazzino Gasomatico di GPL |
| 6 - 3 cilindri da 45 m ³ ; ϕ = 16 (x 2) m e 6 cilindri da 54 m ³ ; ϕ = 19 (x 2) m (Serie A, B) | 18 - terminale di imbottigliamento |
| 7 - pozzo | 19 - deposito di auto con bombole |
| 8 - piscina | 20 - entrata |
| 9 - sala controllo | 21 - carico dei treni |
| 10 - zona pompe | 22 - magazzino |
| 11 - pompe antincendio | 23 - tanca di acqua |
| 12 - carico dei mezzi | 24 - guardia |

La figura 4 mostra l'impianto Pemex più in dettaglio, con indicazioni circa la disposizione dei vari recipienti, distinti per serie, che sono stati coinvolti nell'incidente.

L'area dei serbatoi copriva un quadrato di circa 100 m di lato, al cui interno, come già visto in precedenza, erano sistemati 48 serbatoi cilindrici, denominati "sigari", e 6 sfere; i muretti di separazione delle varie zone erano alti 1 m.

L'ammontare complessivo del volume dei vari serbatoi era di circa 16000 m³; in realtà, al momento dell'incidente, il deposito non era completamente pieno, ma si stima che fossero presenti circa 11000 m³ di GPL.

L'impianto era dotato di tre linee sotterranee di alimentazione del GPL, una da 12 pollici e due da 4 pollici, con portata rispettivamente di 10000 m³/giorno (61 Kg/s) e 800 m³/giorno (5 Kg/s).

L'analisi dell'incidente [1] ha portato a ritenere molto probabile come evento iniziatore una fuga di gas dal deposito di sigari; la portata alla rottura, si ritiene che non sia stata molto elevata, dato che il gas impiegò quasi certamente abbastanza tempo per raggiungere la concentrazione limite inferiore di infiammabilità: alcuni sopravvissuti riferirono di aver sentito odore di gas nella notte, alcune ore prima dell'incidente [1].

Il gas diffuso nell'area circostante lo stabilimento Pemex venne a contatto con una fiamma, probabilmente nei pressi del magazzino di stoccaggio del gas in bombole, provocando l'esplosione della nuvola di vapore (UVCE) e quindi di una sequenza di esplosioni dei serbatoi.

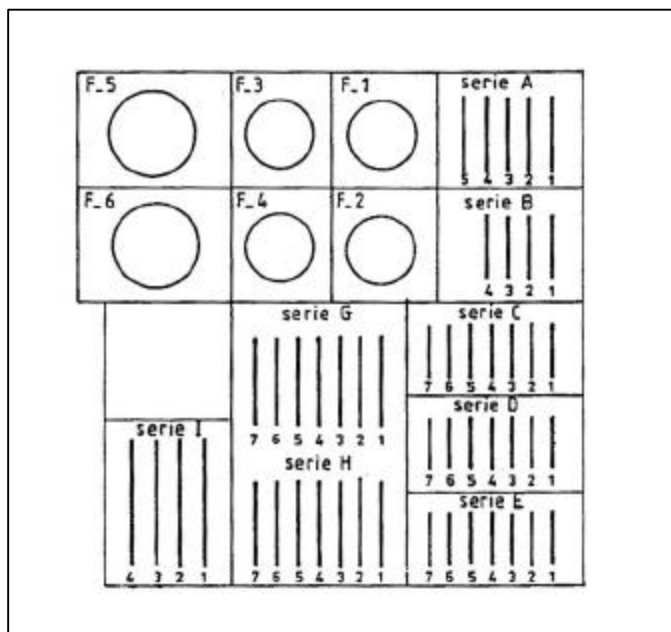


Figura 4. Disposizione relativa dei recipienti di GPL nell'impianto Pemex

Le esplosioni registrate dal sismografo di Città del Mexico avvennero nell'ordine di orario riportato di seguito:

- 1) 5.44 e 52 secondi;
- 2) 5.46 e 01 secondi;
- 3) 6.15 e 53 secondi;
- 4) 6.31 e 59 secondi;
- 5) 6.47 e 56 secondi;
- 6) 6.49 e 38 secondi;
- 7) 6.54 e 29 secondi;
- 8) 6.59 e 22 secondi;
- 9) 7.01 e 27 secondi.

La prima esplosione non generò significativi effetti di sovrappressione nella zona, ma si generarono incendi, con conseguente esplosione del gas accumulato nelle case: molte di queste furono distrutte. Nella zona dell'impianto, a causa dell'elevato grado di confinamento, l'esplosione provocò notevoli danni alle strutture, causando delle perdite dalle condutture e dai sigari che alimentarono estesi fronti di fiamma. Questa ipotesi è avvalorata dalla constatazione che la seconda grande esplosione avvenne solo dopo un minuto e 9 s dall'accensione della nuvola di vapore: quasi sicuramente si verificò il BLEVE di una od anche di due delle sfere più piccole. Le successive esplosioni registrate sono il risultato del BLEVE di alcuni sigari (6 segnalati dal sismografo) ed, alle 6.54 e 29 secondi, del BLEVE delle due sfere più piccole restanti.

I principali effetti del sinistro sono di seguito riassunti:

- le 4 sfere da 1600 m³ furono completamente distrutte;
- le 2 sfere da 2400 m³ mantennero la forma e la posizione, ma i loro supporti cedettero parzialmente, inoltre si squarciarono nella parte superiore ed il loro contenuto bruciò lentamente;
- 4 sigari vennero completamente distrutti, con proiezione di frammenti fuori dell'area di deposito (a Nord e a Sud del sito); 12 sigari vennero scaraventati a distanze notevoli;
- le serie I e G (fig. 4) furono le meno coinvolte;
- la serie H presentò 3 sigari distrutti completamente;
- si ebbero incendi di edifici intorno all'area di deposito;
- la Unigas non fu molto coinvolta; l'edificio principale venne parzialmente distrutto da un frammento, mentre tutti i 17 serbatoi mantennero la vernice bianca;
- i serbatoi di deposito della Gasomatico non restarono implicati nell'incidente, ma venne completamente distrutto da un incendio il deposito di 100 autocarri carichi di bombole di GPL, a causa di un frammento proveniente dall'impianto Pemex;
- i morti totali furono 490, la maggioranza dei quali entro un raggio di 200-300 metri dal centro dell'area di deposito: le cause principali sono da ritenersi le fiamme e le onde di pressione sviluppatesi dalla UVCE, le esplosioni dovute all'accumulo di gas dentro le case e, soprattutto,

l'intensa radiazione derivante dal "fire-ball" che seguì il primo grande BLEVE; circa 7000 persone riportarono gravi ustioni;

- alcuni frammenti di materiale furono proiettati fino ad un massimo di circa 1.2 km e grossi pezzi di sfera furono ritrovati fino a 590 metri, con inevitabili conseguenze sugli edifici e sulla popolazione;
- effetti delle radiazioni di calore furono registrati sulle foglie degli alberi sul pendio, a oltre 1200 metri di distanza;
- a 400 metri di distanza gli oggetti mostravano il distacco della vernice sovrastante.

3. SIMULAZIONE DELL'INCIDENTE

Data la complessità della simulazione e considerando la notevole incertezza delle informazioni disponibili circa la quantità di sostanza coinvolta nell'incidente, la distribuzione della popolazione nella zona abitata e le condizioni meteorologiche al momento dell'incidente, l'analisi è stata effettuata con alcune ipotesi semplificative, tenendo conto che l'obiettivo del lavoro non è la riproduzione dell'incidente, ma la verifica della funzionalità del programma HARIA 2.

Considerando le attuali caratteristiche del codice, sono state fatte le seguenti ipotesi:

- in mancanza di indicazioni adeguate circa la densità della popolazione nell'area abitata, si è supposto una distribuzione uniforme nelle varie zone, tenendo in considerazione una popolazione complessiva di 40000 persone;
- le condizioni del tempo erano stabili, con assenza di vento e temperatura di 7°C; nella simulazione si è supposta la presenza di un vento leggero con velocità u pari a 0.1-0.5 m/s proveniente da nord; ciò è giustificato dal fatto che la nube di gas è stata trasportata fino alle case più vicine, poste a sud dello stabilimento Pemex;

La simulazione non tiene conto di "effetti domino", in quanto il sistema HARIA-2 non include al momento alcuna opzione in tal senso.

In particolare è stato deciso di effettuare le seguenti analisi:

- 1) verifica di funzionalità del GIS HARIA-2, con inserimento dei dati necessari alla simulazione relativi a:
 - gli stabilimenti Pemex, Unigas e Gasomatico;
 - la distribuzione della popolazione sull'area;
 - l'orografia del territorio in esame, sovrapposta alla carta geografica della zona.
- 2) verifica del funzionamento del modulo "Creazione Scenari Statici", con:
 - "Termine Sorgente" costante, definito dall'utente;
 - analisi di sensibilità circa la dispersione del GPL nella fase iniziale dell'incidente, mediante il modello per gas pesanti "Display-1" [5], integrato nel codice;
 - simulazione del "fire-ball" che seguì la seconda esplosione (modello TNO [6]);
 - test di funzionamento del modello di vulnerabilità implementato nel codice [7];
- 3) rappresentazione grafica dei risultati delle prove e delle simulazioni citate mediante il modulo di visualizzazione di HARIA-2.

3.1 Verifica di funzionalità del GIS di HARIA-2

Una caratteristica molto importante del codice è la possibilità di visualizzare le informazioni georeferenziate presenti nei vari "data-bases" ed i risultati del calcolo di dispersioni, incendi e/o esplosioni. Le figure 5-8 riproducono, rispettivamente, la cartografia della zona interessata dall'incidente (con in evidenza i tematismi "stabilimenti", "impianti", "componenti", "strade cittadine", "aree urbane"), l'orografia della regione e la mappa della distribuzione della popolazione con riferimento al raster del territorio.

In particolare, la figura 6 rappresenta la mappa riprodotta nella figura 1, ripulita dalle informazioni ininfluenti ai fini della definizione dell'orografia della zona (come la disposizione delle abitazioni, ecc.): sono stati assegnati colori differenti a seconda dell'altezza delle aree delimitate dalle curve di livello, attribuendo ad ogni pixel dell'immagine un valore proporzionale alla sua altezza. Come nelle mappe di uso comune, è stato assegnato il marrone scuro alle zone più elevate ed una colorazione più chiara per le regioni più basse.

Il file corrispondente alla rappresentazione di figura 6 è stato ricavato utilizzando il programma, per la digitalizzazione di mappe orografiche per il sistema HARIA-2, precedentemente messo a punto e denominato CONVMEX2 [8]. Questo codice permette di ottenere una matrice di punti orografici, di passo dato, a partire da una pianta orografica della regione in esame. Rispetto a quanto riportato in [8], sono state apportate delle modifiche per tenere conto di un passo, tra due punti orografici, differente lungo i due assi ortogonali.

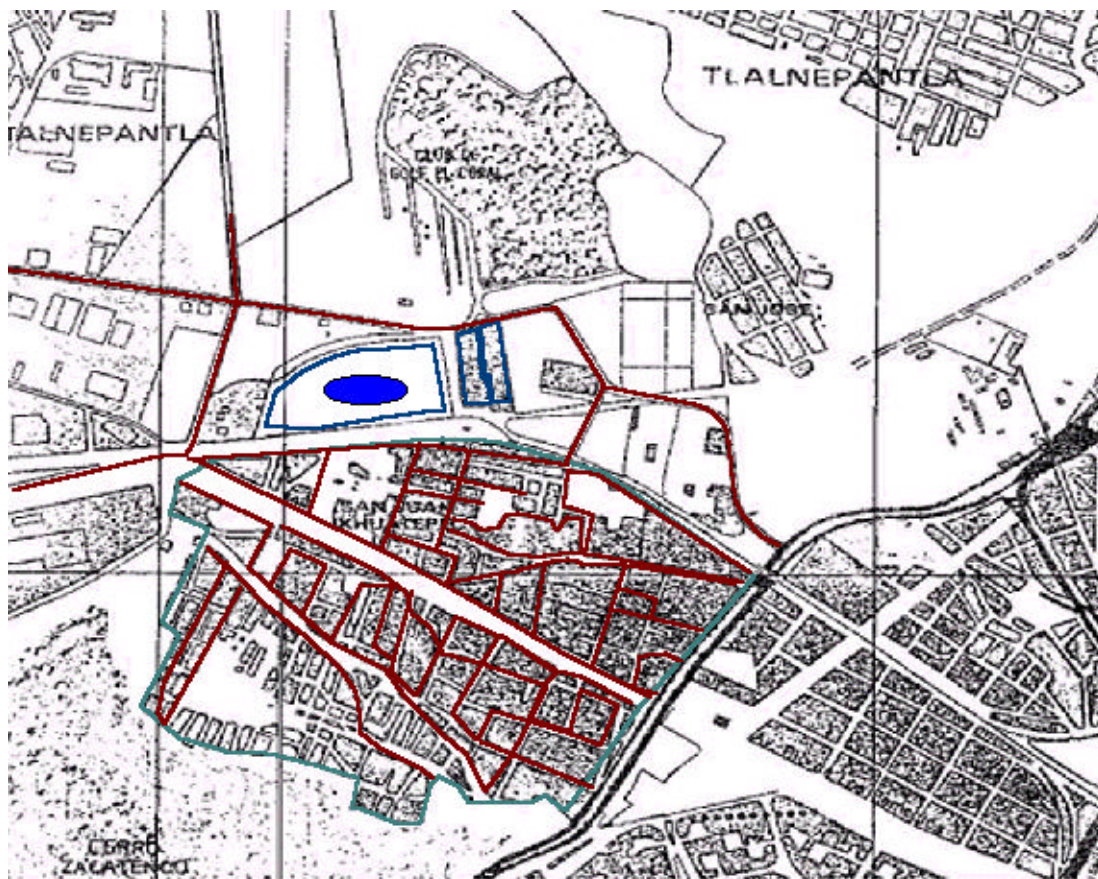


Figura 5. Planimetria dell'area interessata dall'incidente, restituita da HARIA-2.

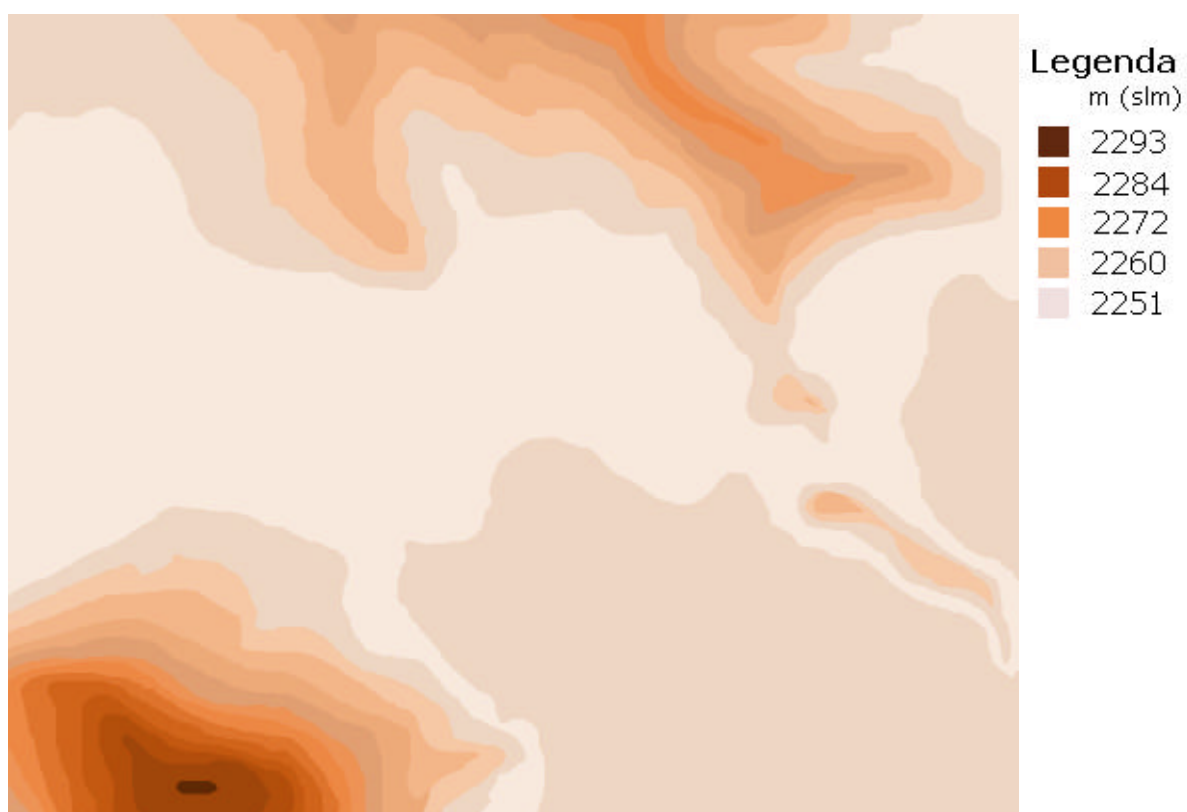


Figura 6. Orografia nella zona di San Juanico (Mexico City).

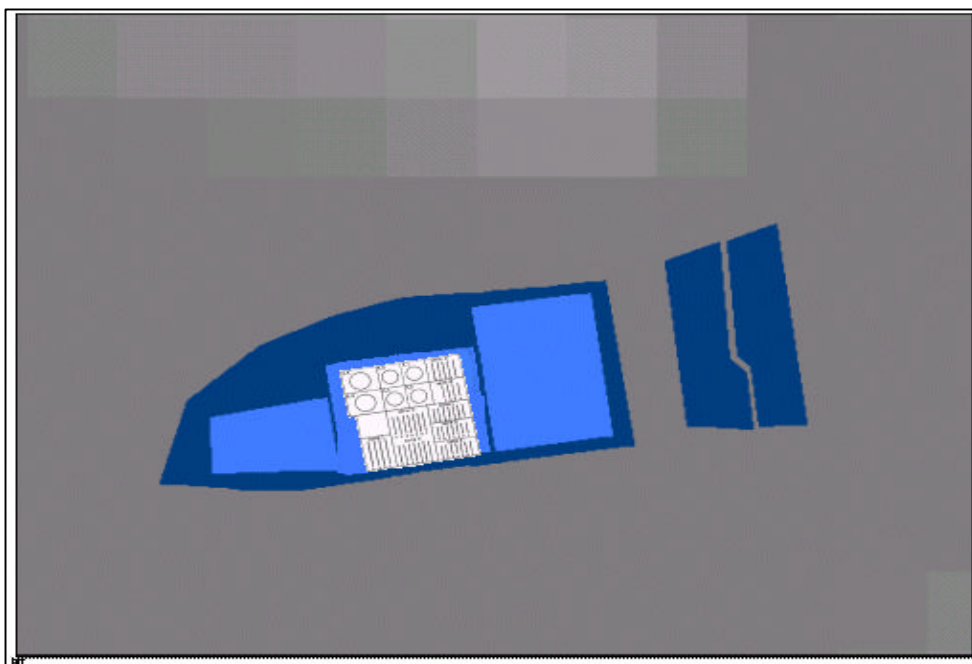
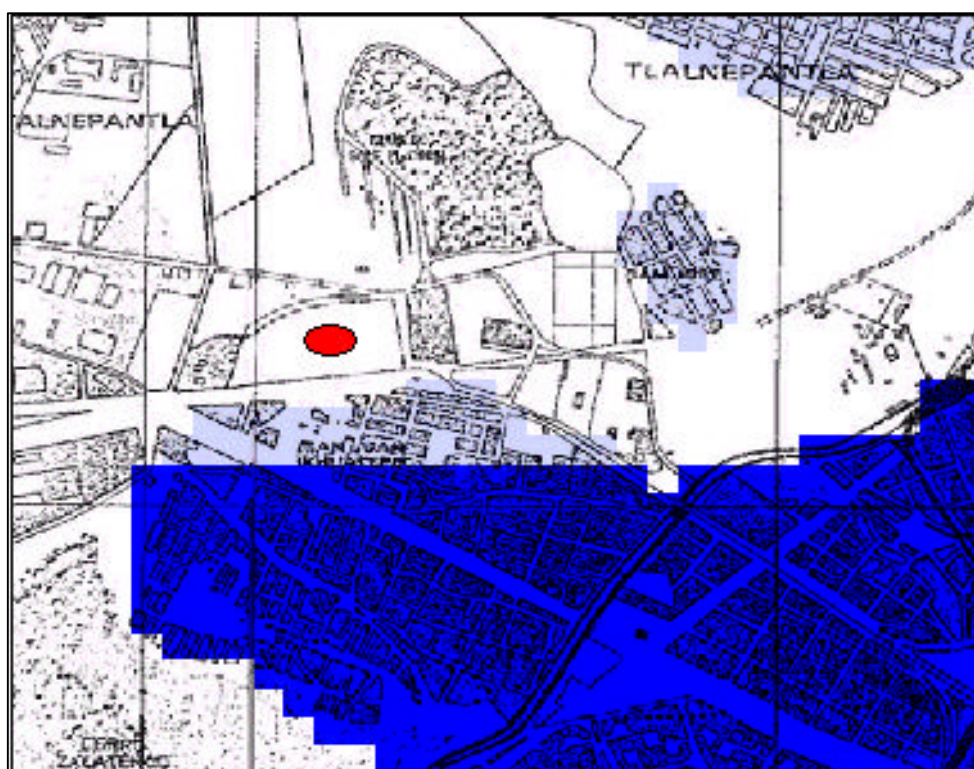


Figura 7. Dettaglio degli stabilimenti Pemex, Unigas e Gasometrico, riprodotti da HARIA-2.



Densità abitativa: • bianco: 3 ab/ha; • celeste: 20 ab/ha; • blu: 125 ab/ha.

Figura 8. Planimetria della zona dell'incidente, con sovrapposizione della densità di popolazione media.

3.2 Generazione “Termine Sorgente”

Le informazioni riguardo la causa che generò il rilascio di GPL e la portata di gas coinvolta nella dispersione sono estremamente carenti. Pertanto sono stati presi in esame alcuni possibili scenari in grado di produrre una nube di GPL di estensione e concentrazione tale da raggiungere i limiti di infiammabilità nei pressi della zona abitata, analogamente a quanto già fatto in [3]. Le ipotesi più accreditate per il rilascio della sostanza in atmosfera sono:

- apertura della valvola di sicurezza di un “sigaro”, connesso alla condotta da 12”, in condizioni di sovra-riempimento causato dalla mancata chiusura della valvola di ingresso;
- totale o parziale rottura di una delle linee di approvvigionamento dell’impianto di stoccaggio.

Nel caso a), è ipotizzabile una pressione di stoccaggio pari a circa 0.7 MPa, corrispondente alla temperatura di 280 K; la valvola di sicurezza era verosimilmente tarata ad aprirsi a una pressione di 1.1-1.2 MPa. A conclusione della iniziale depressurizzazione del contenitore, venne raggiunto un equilibrio tra il flusso in entrata e quello in uscita. Considerando un rilascio bifase di GPL in atmosfera e facendo uso del modello proposto dal TNO [6], è possibile stimare che la massa fuoriuscita in fase gassosa fosse dell’ordine degli 8 Kg/s, mentre la restante portata di liquido generò una pozza che, tenendo conto dei muretti di contenimento limitanti le varie aree, poteva avere un rateo di vaporizzazione massimo di circa 32 Kg/s; la portata massima stimata di GPL in fase vapore è quindi 40 Kg/s.

Nel caso b), adottando gli stessi parametri di valutazione utilizzati precedentemente, se si verificò una tranciatura completa della condotta da 12”, la portata massima di gas disponibile per la dispersione è ancora di 40 Kg/s se il rilascio avvenne nella zona con muretti di contenimento, mentre in assenza di questi si può ammettere la vaporizzazione di tutti i 60 Kg/s trasportati dalla condotta; nel caso di tranciatura parziale è verosimile ipotizzare portate minori (ad es. 20 Kg/s o 10 Kg/s). Con analoghe considerazioni, una portata di 5 Kg/s sarebbe del tutto plausibile nel caso di tranciatura di una condotta da 4”.

La situazione di incertezza sull’entità del termine di sorgente ha suggerito l’implementazione in HARIA-2 di un modello che fornisce all’utente la possibilità di generare un “Termine Sorgente” costante. Questa opzione è del tutto in linea con gli obiettivi del sistema HARIA 2 (pianificazione e analisi delle emergenze) e fornisce uno strumento di facile e rapido utilizzo nell’eventualità in cui si abbia la necessità di eseguire un’analisi di sensibilità sulla dispersione di una sostanza pericolosa.

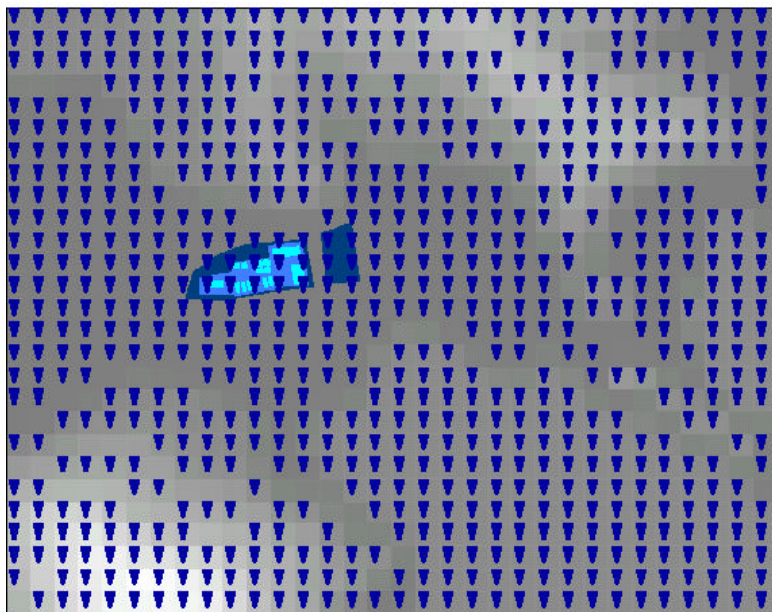
La figura 9 riporta una delle finestre di dialogo che il codice restituisce per la generazione del “Termine Sorgente” costante; il campo “Innalzamento” non è stato specificato dato che il software, automaticamente, valuta questo parametro nel caso di rilascio da camino o di incendio.

Figura 9. Finestra di dialogo per la definizione del termine di sorgente

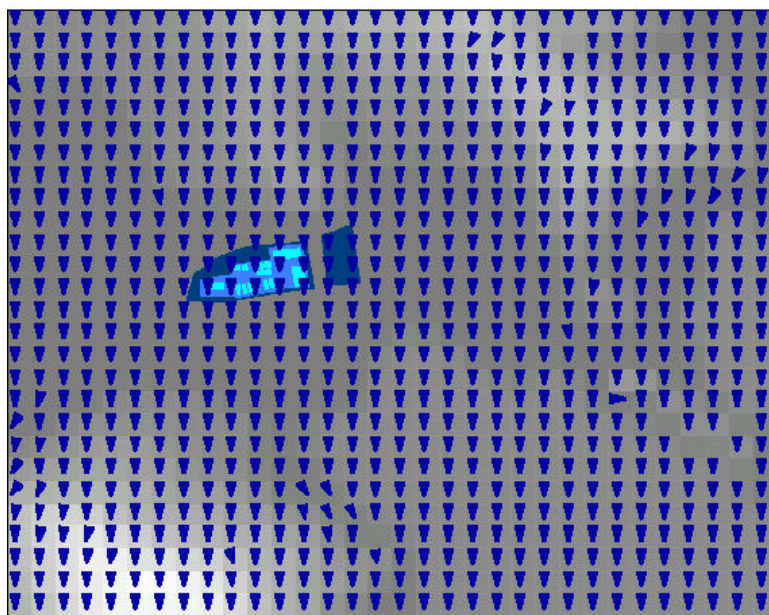
3.3 Simulazione della dispersione di GPL

La prima fase della simulazione dell'incidente di San Juan Ixhuatepec ha riguardato la dispersione della nube di vapori di GPL, liberatasi nella fase iniziale dell'incidente. Le condizioni atmosferiche, precedentemente specificate, insieme alla mappa orografica del territorio, consentono il calcolo del campo cinetico presente al momento dell'incidente, mostrato nella figura 10. Per velocità del vento bassissime (0.1 m/s, figura 10 a)), la routine implementata in HARIA 2 non vede alcun effetto di canalizzazione, ma calcola velocità zero nelle celle a livello orografico minore (assenza di frecce in figura 10 a)); il risultato con $u = 0.5$ m/s (figura 10 b)) evidenzia leggeri effetti di canalizzazione ai piedi del pendio, a sud dell'impianto Pemex.

I risultati dell'analisi della dispersione nei vari scenari ipotizzati, forniti dal modello "DISPLAY-1" in condizioni di rilascio costante a "jet" (condizione semi-stazionaria), sono riportati nella figura 11, in cui sono evidenziate, in colore rosso scuro, le zone a concentrazione di gas interna all'intervallo di infiammabilità.



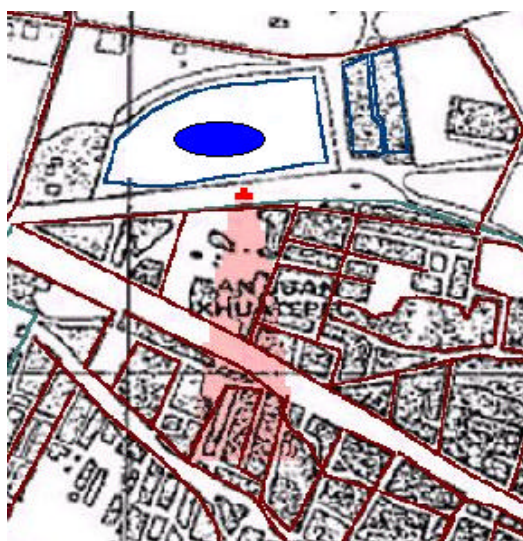
a) $u = 0.1$ m/s



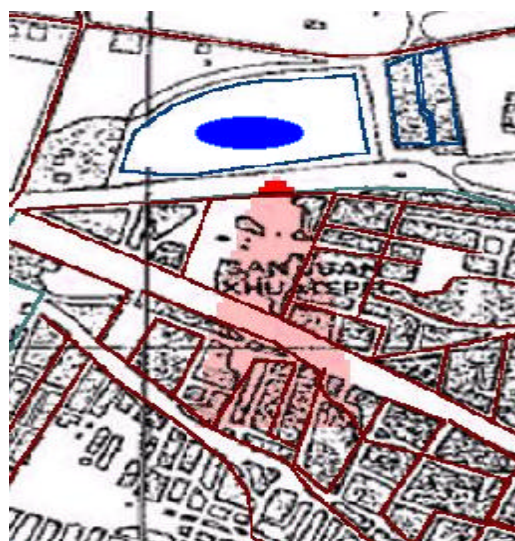
b) $u = 0.5$ m/s

Figura 10. Campo cinetico calcolato dal codice HARIA 2

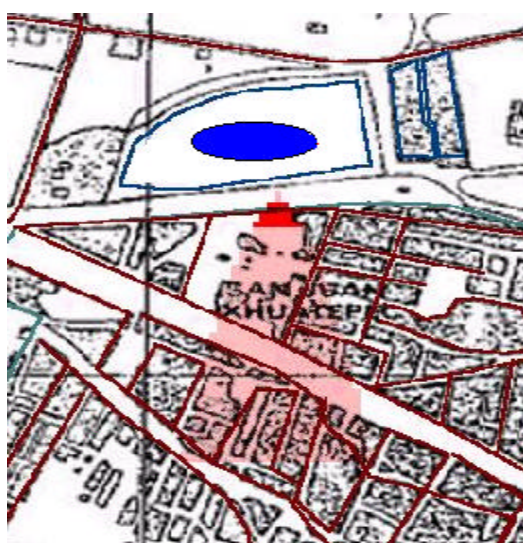
L'analisi della figura 11 mostra che, per rilascio costante di 5 Kg/s, il gas raggiunge concentrazioni tali da poter generare esplosioni soltanto all'interno dell'impianto o poco fuori, approssimativamente tra 70 m e 100 m dal punto di rilascio; è evidente che, in relazione agli eventi che si verificarono e alle testimonianze raccolte, questa portata non sarebbe stata sufficiente a generare nella zona abitata l'UVCE e il conseguente "flash fire". Portate di rilascio di 10 Kg/s e 20Kg/s originano una nube che raggiunge concentrazione nei limiti di infiammabilità tra 90 m e 130 m nel primo caso, e tra 100 m e 160 m nel secondo: è plausibile, ma poco probabile, che la portata di rilascio di GPL sia stata di questa entità. Tenendo in considerazione le assunzioni fatte ed i limiti del modello utilizzato, la perplessità maggiore deriva dal fatto che il cono di rilascio ha dimensioni trasversali contenute (approssimativamente 100 m): ne deriva che l'ampiezza della zona potenzialmente a rischio è abbastanza ristretta. Nell'ipotesi di portata di rilascio di 40 Kg/s, le distanze caratteristiche individuate dalla simulazione sono 120 m e 190 m, con massima dimensione trasversale del cono di diffusione dell'ordine dei 150 m: considerando che la distanza massima, alla quale si generano gli effetti dell'onda d'urto e del fronte di fiamma generati dall'esplosione, è abbastanza maggiore di quella caratteristica della nube (nella fattispecie circa 300 m), è verosimile che il rilascio di GPL sia avvenuto con una portata di quest'ordine di grandezza.



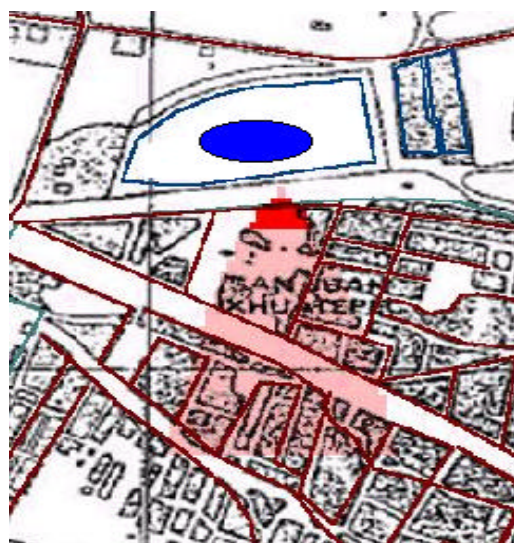
a) Termine di sorgente 5 Kg/s



b) Termine di sorgente 10 Kg/s



c) Termine di sorgente 20 Kg/s



d) Termine di sorgente 40 Kg/s

Figura 11. Estensione della zona in cui HARIA 2 calcola condizioni di UVCE

3.4 Simulazione del "fire-ball" e valutazione delle conseguenze

La seconda esplosione registrata alle 5.46 fu quasi sicuramente il risultato del BLEVE di uno o due dei contenitori sferici più piccoli (1600 m³). L'intervallo di tempo trascorso tra l'esplosione conseguente all'UVCE e il BLEVE (poco più di un minuto) è troppo breve affinché si possa ipotizzare un apporto di calore esterno, diffuso sul fondo del contenitore, tale da provocarne una pressurizzazione fino al valore di 2 MPa e generare il BLEVE; è più probabile che la sorgente di energia che provocò il BLEVE sia stato un "jet-fire" concentrato sulla sfera in corrispondenza dell'interfaccia liquido-vapore [3].

Da un punto di vista energetico, la portata di 60 Kg/s uscente dalla conduttura da 12", incendiandosi, può dare una potenza termica di 3 MW/m² sulla superficie della sfera, se il fattore di vista è superiore a 0.33 [3]. Una tale potenza termica è più che sufficiente a provocare il BLEVE della sfera, dato che il contenuto entalpico della perdita di vapori di GPL a seguito dell'apertura della valvola di sicurezza (assai probabile conseguenza della prima esplosione) corrisponde a circa 1 MW/m² [3].

Il "fire-ball" che seguì il BLEVE, è stato simulato con HARIA 2 ipotizzando un riempimento della sfera del 50% (circa 400 t di GPL), usuale in questo tipo di stoccaggio. In queste condizioni, il modello del TNO, predice un diametro del "fire-ball" di 418 m ed una durata Δt di 25 s: questi dati, alla luce della constatazione che la zona maggiormente interessata dalle conseguenze dell'incidente è compresa in un raggio di 300 m dal centro dell'area di deposito, sembrano del tutto ragionevoli.

I risultati della simulazione, sono riportati nella figura 12, che mostra le fasce di irraggiamento con limiti definiti a 40 kW/m², 14 kW/m² e 4 kW/m². Essi rendono conto anche degli effetti secondari del "fire-ball" (vernice distaccata dalle superfici a 400 m, foglie degli alberi bruciate anche a 1200 m dal centro dello stabilimento). La rappresentazione di Fig. 12 è volutamente semplificata; in realtà HARIA 2 calcola l'irraggiamento cella per cella e quindi una distribuzione continua dell'intensità di radiazione I. Applicando a tali dati la probit del modello di vulnerabilità inserito in HARIA 2 per gli incendi ^(c), si ottiene il risultato mostrato in figura 13, tenendo conto della densità della popolazione indicata in figura 8. I morti stimati dal codice sono circa 1300; tale numero è maggiore di quello che effettivamente si ebbe, ma questo è facilmente spiegabile se si tiene conto che le informazioni sulla distribuzione di popolazione al momento dell'incidente sono molto carenti e che il modello non tiene in considerazione effetti di protezione locale.

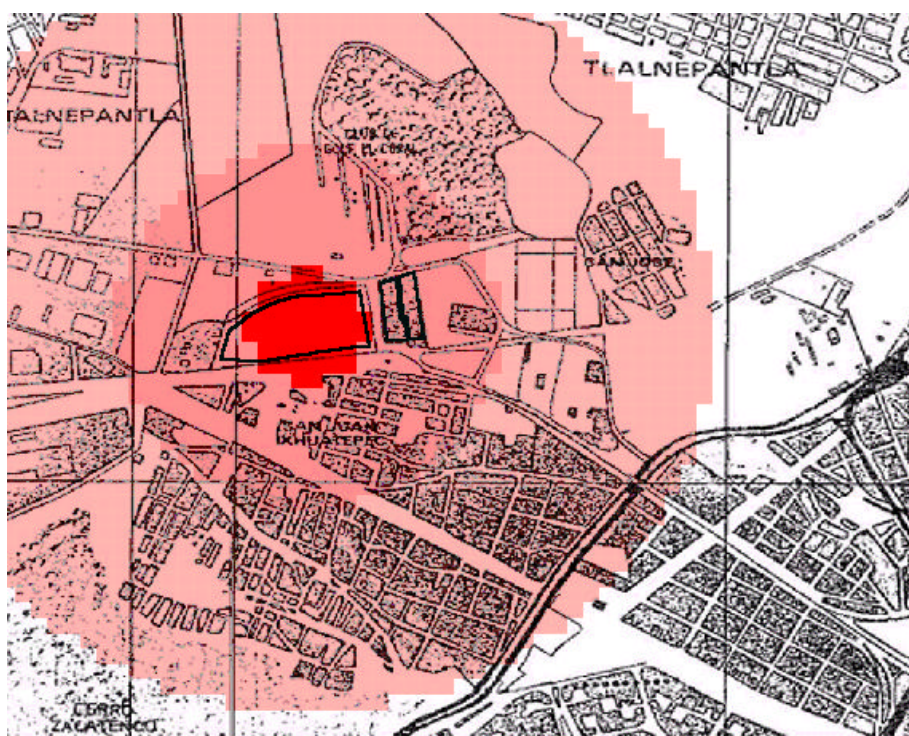


Figura 12. Zone di irraggiamento a seguito del "fire-ball", valutate con HARIA 2

^(c)La probabilità di morte è in funzione della "dose", calcolata con la relazione:
$$\int_0^{\Delta t} I^{4/3} dt$$

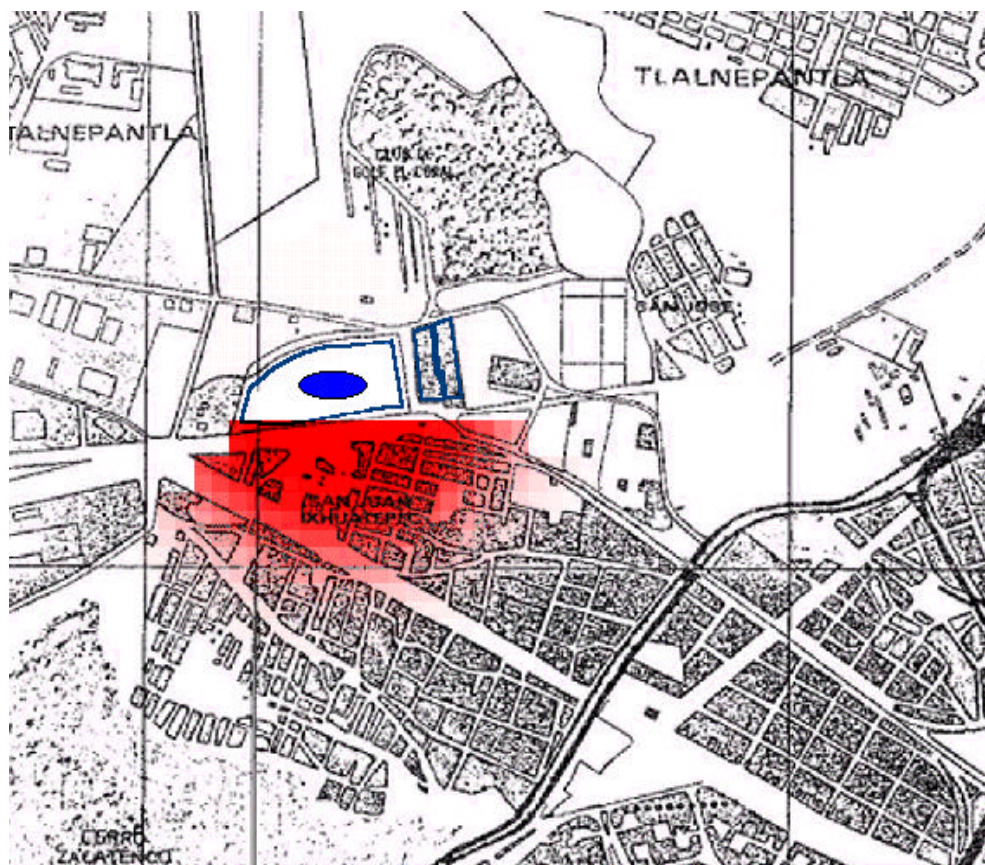


Figura 13. Distribuzione dei decessi per irraggiamento, calcolata da HARIA 2

CONCLUSIONI

L'analisi dell'incidente di Città del Mexico ha consentito di verificare la funzionalità della parte del sistema informatico HARIA 2 messa a punto, oltre a portare a considerazioni di una certa rilevanza sulla modellistica del sistema e sul suo impiego. In particolare:

- la nuova versione del sistema ha certamente caratteristiche più amichevoli per l'utente ("user friendly") ed una maggiore versatilità;
- il modulo "Creazione Scenari Statici" dovrebbe essere perfezionato almeno per quanto riguarda il calcolo del campo cinetico a basse velocità del vento, in modo da avere valori realistici di u in tutte le celle del dominio di interesse; una volta che tale risultato fosse raggiunto potrebbe essere modificato anche il modello DISPLAY-1, in modo da stimare effetti di canalizzazione della nube anche in zone con piccole differenze di livello orografico, come accadde nell'incidente analizzato;
- ad ogni modo, i modelli già implementati (dispersione di nube pesante, UVCE, "fire-ball") sembrano dare risultati adeguati per la maggior parte delle possibili applicazioni di HARIA 2.

A parte i possibili miglioramenti sopra accennati (con l'occasione potrebbero essere implementati nuovi modelli, quali incendio da pozza, "jet-fire", ecc., utili in previsione del calcolo di scenari con importanti effetti domino), il lavoro dimostra la funzionalità del sistema informatico HARIA 2, impegnando gran parte delle sue potenzialità. E' pertanto possibile ed opportuno trasformare l'analisi dell'incidente di Città del Mexico in un "sample problem", da integrare nel software HARIA 2, in modo che eventuali nuovi utenti possano verificare la correttezza dell'istallazione ed usarlo anche come guida per altre simulazioni.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano esprimere il loro ringraziamento a quanti hanno contribuito al presente lavoro. Una particolare menzione è dovuta al Dr. Ing. Marco BARLETTANI, per la collaborazione alla messa a punto della nuova versione del sistema HARIA 2, al Dr. Ing. Giuseppe DAQUINO che iniziò l'analisi alla base del lavoro,

ed al Dr. Jorgen WUERTZ, per l'uso del modello DISPLAY-1.

Un doveroso riconoscimento va infine alla Sig.na Dania DEL CORSO, per il particolare impegno profuso nella stesura dell'articolo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pietersen C.M., Huerta S.C., "Analysis of the LPG Incident in San Juan Ixhuatepec, Mexico City, 19 November 1984". TNO Dossier 8727 - 13325, 1985.
- [2] Bovalini R., Cecchella P., Mazzini M., "The Mexico City Disaster: an Appraisal of its Causes and Circumstances", Atti DCMN dell'Università di Pisa, 1994.
- [3] Carcassi M.N., Casali M., Cecchella P., "Evaluation Model of the UVCE Scenario, Taking into Account the Heavy Gas Atmospheric Diffusion: a First Application to the Mexico City Disaster", XIII Congresso UIT, Bologna, 22-23 Giugno 1995.
- [4] Mazzini M., Barlettani M., Volta G., "Il Sistema Informatico HARIA 2. Una metodologia per l'Analisi e la Gestione di Emergenze Tecnologiche", Convegno Nazionale Grandi Rischi, Firenze, Novembre 1998.
- [5] Wüertz J., "A Transient One-Dimensional Shallow Layer Model for Dispersion of Denser-Than-Air Gases in Obstructed Terrains Under Non-Isothermal Conditions". Commission of the European Communities, JRC Ispra, EUR 15343 EN, 1993.
- [6] TNO-ME, "Methods for the Calculation of the Physycal Effects of the Escape of Dangerous Material. Report of the Committe for the Prevention of Disaster". Directorate General of Labour, Nederland, Ministry of Social Affairs, 1979.
- [7] Mazzini M., Bovalini R., Barlettani M., "Modellistica di Valutazione delle Conseguenze Statiche di HARIA 2", Atti DCMN RL 764 (98), Pisa, Gennaio 1998.
- [8] Daquino G., "CONVMEX2 - Un Programma per la Digitalizzazione di Mappe Orografiche per il Sistema HARIA 2", THEMAS s.r.l. NT 216(98), Pisa, 1998.