

EHHRA-GIS: UN SISTEMA DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO PER LA SALUTE UMANA

S. Bagli, G. Spadoni

Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, Università di Bologna, Viale Risorgimento, 2– 40136 Bologna;

e-mail: stefano.bagli@guest.ing.unibo.it; gigliola.spadoni@mail.ing.unibo.it

SOMMARIO

La procedura di valutazione del rischio per la salute umana e per l'ambiente (*Environmental and Human Health Risk Assessment*) richiede una grande quantità di informazioni che devono essere raccolte, analizzate ed elaborate attraverso l'integrazione di database, modelli matematici di destino e trasporto, modelli di valutazione della dose e del rischio, fogli di calcolo e sistemi di visualizzazione dei risultati. Obiettivo di questo lavoro è la descrizione di un'applicazione GIS che fornisce un notevole supporto alla risoluzione del problema delineato essendo in grado di valutare il rischio per la salute umana dovuto alla presenza di sorgenti inquinanti multiple in grado di contaminare le diverse componenti ambientali di un'area geografica. Un caso di studio evidenzia vantaggi e potenzialità dello strumento di calcolo, denominato EHHRA-GIS.

INTRODUZIONE

Il problema dell'inquinamento ambientale, e dei suoi effetti sulla salute umana e sugli ecosistemi, ha assunto un'importanza sempre crescente dall'inizio della rivoluzione industriale, divenendo negli ultimi decenni un fenomeno allarmante e percepito come tale da tutti i settori della moderna società. L'antropizzazione e l'industrializzazione del territorio determinano una sempre più frequente esposizione a sostanze chimiche (cancerogene e tossiche) da parte degli organismi viventi, cui segue un aumento della frequenza di effetti negativi sulla salute degli esposti.

Negli ultimi anni è emersa da parte degli organismi competenti (di pianificazione e legislativi) la necessità di fare ricorso a strumenti e procedure in grado di valutare in maniera quali/quantitativa l'effettivo rischio a cui sono soggette le popolazioni ai fini di gestire e pianificare le azioni di risanamento, bonifica e mitigazione dei rischi. Una grossa spinta allo sviluppo ed utilizzo di metodologie basate sulla valutazione del rischio per la salute è venuta dal programma americano per la prevenzione e la bonifica dei siti contaminati da rilasci di idrocarburi (*Underground Storage Tanks Programme*) che aveva portato all'identificazione di oltre 270.000 siti contaminati [1].

Conseguentemente alle esigenze espresse dai legislatori, diverse sono state le tecniche e le procedure sviluppate dalle comunità scientifiche internazionali (API DSS [2], ASTM RBCA [3], CONCAWE [4], CARACAS [5]), dalle agenzie governative (USEPA [6]), dalle Direttive Europee (67/548/EEC, Reg. EEC 793/93), da leggi nazionali (DM 25/10/1999) e regionali per la gestione e bonifica dei siti contaminati. La filosofia che accomuna i diversi approcci consiste nell'applicazione di qualche forma di Valutazione del Rischio (*Risk Assessment*) per la salute umana e la salvaguardia degli ecosistemi come base per risolvere il risanamento di un'area contaminata definendo gli obiettivi di bonifica e le risorse da impiegare.

In quest'ambito si inserisce la procedura di Valutazione del Rischio per la Salute Umana e per l'Ambiente (*Environmental and Human Health Risk Assessment*), di seguito indicata con l'abbreviazione EHHRA, definita nel 1983 dalla National Academy of Sciences [7], che ha come obiettivo la stima quantitativa del rischio per gli organismi esposti a composti chimici (cancerogeni e/o tossici) rilasciati da sorgenti antropiche e naturali nelle diverse componenti ambientali (aria, acqua suolo e sottosuolo). Essa si articola nelle seguenti fasi:

1. Identificazione del/dei composto/i chimico/i di interesse (*COC Chemicals of Concerns*) presente/i in concentrazioni potenzialmente pericolose (*Hazard Identification*),
2. Valutazione del destino e del trasporto degli inquinanti (*Fate and Transport Assessment*),
3. Definizione dello Scenario di Esposizione e stima della dose assorbita dai recettori *umani* (*Exposure Intake Assessment*),
4. Studio della relazione esistente tra la Dose assorbita e gli effetti sulla salute degli organismi (*Dose-Response Assessment*).
5. Caratterizzazione del rischio (*Risk Characterization*)

L'applicazione della procedura risulta in generale un'operazione assai complessa, sia per il numero e la multidisciplinarietà delle figure professionali coinvolte, quali medici, ingegneri, biologi, legislatori etc., sia per la complessità delle analisi condotte, come il trattamento e l'elaborazione di dati ed informazioni in database alfanumerici e spaziali, l'applicazione di modelli matematici anche complessi (numerici) per lo studio dei meccanismi di trasporto dei contaminanti e la stima dell'esposizione e del rischio, ed infine l'elaborazione statistica e la comunicazione dei risultati ottenuti. In definitiva se da una parte, la valutazione

quantitativa del rischio (*Risk Assessment*) consente di ottenere stime oggettive del rischio per la salute umana ed individuare le corrette azioni di bonifica dei siti contaminati o delle aree fortemente antropizzate, dall'altra risulta una procedura complessa, onerosa, e dispendiosa, soprattutto nelle situazioni in cui sono presenti molteplici sorgenti contaminanti e molteplici percorsi d'esposizione che interessano i ricettori umani.

La necessità di sviluppare sistemi efficienti in grado di valutare le diverse alternative per la protezione della salute umana, può trovare risposta nell'integrazione all'interno di un Sistema Informativo Geografico (GIS) dei molteplici sistemi, oggi disponibili, in grado di facilitare l'analisi e l'elaborazione dei dati per la procedura di EHHRA, tra i quali database relazionali, fogli elettronici, modelli matematici di simulazione (analitici e numerici) e visualizzatori di mappe bi e tri-dimensionali. La componente geografica e cartografica risulta inoltre fondamentale nel processo EHHRA ai fini di rappresentare le analisi e le elaborazioni relative alla valutazione del destino e trasporto degli inquinanti nell'ambiente, alle valutazioni della dose assorbita e del rischio per i ricettori umani coinvolti. Tale tipo di approccio diviene sempre più rilevante con l'incremento dei dati raccolti dalle regioni ed dagli enti competenti su supporti informatici quali archivi cartografici e sistemi territoriali informatici.

Obiettivo di questo articolo è presentare un approccio di tipo integrato dell'applicazione della procedura di EHHRA attraverso la descrizione della struttura e delle potenzialità di un software GIS in grado di gestire tutte le fasi della procedura di EHHRA all'interno di una struttura georeferenziata.

IL SISTEMA EHHRA-GIS E LE SUE POTENZIALITÀ

Il sistema EHHRA-GIS è un sistema informativo geografico per la valutazione rischio per la salute delle popolazioni localizzate in aree geografiche contaminate o caratterizzate dalla presenza di sorgenti inquinanti di origine antropica (industriali, agricole, urbane...). Esso è stato sviluppato integrando all'interno di un ambiente informatico GIS munito di interfaccia grafica, i database con i dati ambientali e le proprietà chimico- fisiche –tossicologiche dei COC, i modelli di destino e trasporto dei contaminanti, i modelli di stima dell'esposizione e del rischio, ed infine l'insieme di procedure che definiscono la metodologia di EHHRA. La struttura predisposta è aperta alle integrazioni di nuovi modelli di calcolo (destino e trasporto), ovvero alla loro sostituzione con modelli più recenti od adatti alla particolare situazione oggetto dello studio.

I vantaggi offerti da una siffatta applicazione GIS sono molteplici, essi consistono principalmente in:

- utilizzo dei dati georeferenziati per accelerare e semplificare la fase di inserimento dati di input richiesti dai modelli matematici di destino e trasporto degli inquinanti e di valutazione dell'esposizione,
- realizzazione di un unico ambiente in cui sono presenti tutti gli elementi richiesti per la valutazione del rischio, che permette all'utente di gestirli attraverso un'unica interfaccia grafica,
- possibilità di visualizzazione degli output direttamente su mappe georeferenziate.

Inoltre, attraverso le potenzialità di analisi ed elaborazioni dei dati spaziali e delle mappe, è possibile risolvere direttamente all'interno del GIS le equazioni di destino e trasporto degli inquinanti nell'ambiente (map-based modelling), e visualizzare su mappe tutti gli output delle simulazioni.

Tra le potenzialità di EHHRA-GIS si desidera evidenziare come esso sia in grado di analizzare situazioni complesse ed eterogenee caratterizzate dalla contemporanea presenza di più composti rilasciati o presenti nelle componenti ambientali, di molteplici percorsi di esposizione che interessano le tipologie di ricettori umani presenti nell'area geografica oggetto dello studio.

Il sistema EHHRA-GIS persegue quindi un approccio innovativo per la valutazione, la gestione e la mitigazione del rischio per la salute umana, con molteplici finalità:

- Mappare i dati raccolti e costruire il modello teorico del sito in esame,
- Identificare le generiche popolazioni a rischio dai rilasci industriali,
- Condurre le valutazioni dell'esposizione e della dose per diverse popolazioni sensibili,
- Visualizzare nello spazio le curve iso-concentrazione, iso-dose e iso-rischio,
- Comunicare le informazioni sul rischio alla popolazione,
- Valutare l'efficacia di delle diverse opzioni per la riduzione del rischio,
- Selezionare e progettare le strategie che determineranno la maggior riduzione del rischio.

La struttura di EHHRA-GIS

La struttura di EHHRA-GIS comprende 5 elementi fondamentali (Fig. 1):

1. Interfaccia Utente Grafica (*GUI ARCVIEW GIS*)
2. Database Spaziale Georeferenziato (*GIS SPATIAL DB*)
3. Database relazionale (*MSACCESS RELATIONAL DB*)
4. Modelli Matematici di Valutazione del Destino e Trasporto (*FATE AND TRANSPORT MODELS*)
5. Modelli di Valutazione dell'esposizione e del Rischio (*EXPOSURE AND RISK ASSESSMENT MODELS*).

Ogni elemento è integrato all'interno del sistema attraverso la programmazione in ambiente ESRI ArcView di opportuni codici (script) scritti in linguaggio AVENUE [8].

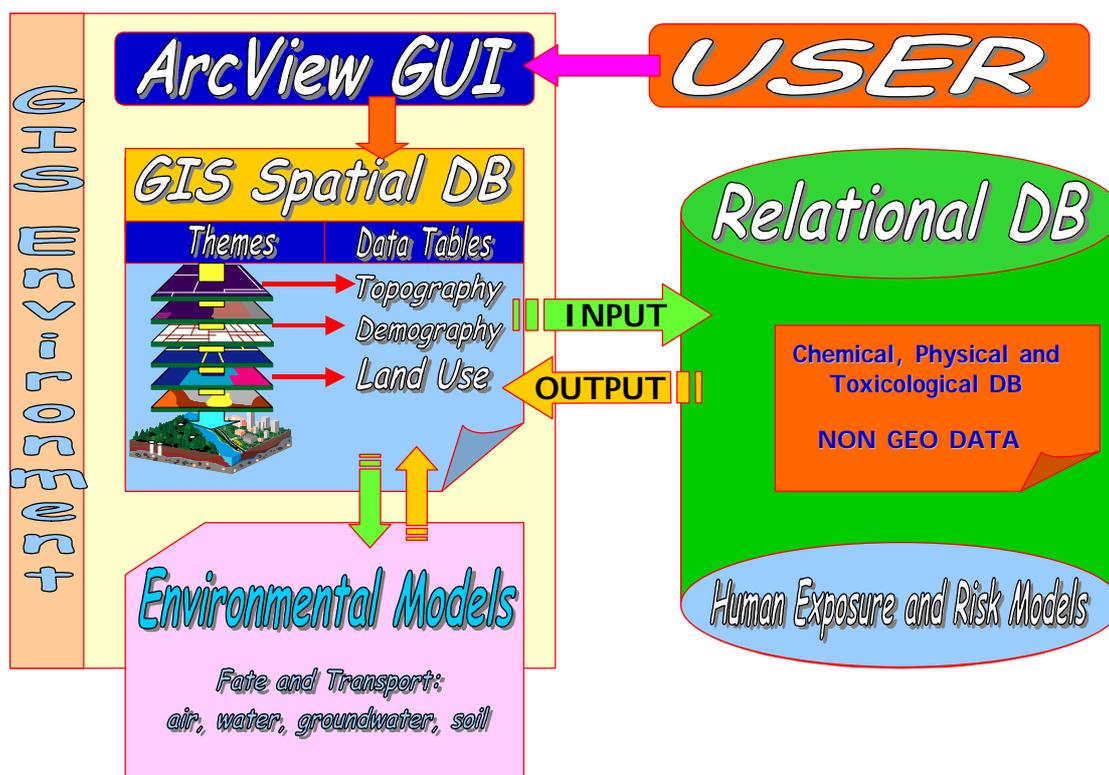


Figura 1. Struttura del sistema EHHRA-GIS

La Procedura di Valutazione del Rischio in EHHRA-GIS

Il sistema esegue il processo di valutazione del rischio per la salute umana e per l'ambiente in seguito alla presenza di COC nell'ambiente, attraverso una serie di passi sinteticamente descritti nel seguito.

Descrizione Digitale del Sito (Digital Site and Facility Description)

La descrizione digitale del sito consiste nel processo di acquisizione delle informazioni caratterizzanti le sorgenti inquinanti e la regione geografica limitrofa all'interno di un ambiente informatico GIS. In particolare essa avviene attraverso la generazione di tematismi (layers) che descrivono e visualizzano su mappe digitali le principali caratteristiche del sito, tra cui la geologia, l'idrogeologia, le proprietà fisico- chimiche, l'uso del suolo, le condizioni meteorologiche, la demografia, la topografia, ecc...

La scelta del numero e della tipologia delle caratteristiche del sito descritte in questa fase è condotta, secondo i casi, in funzione del tipo e del grado di complessità del problema di valutazione del rischio per la salute umana oggetto dello studio.

Tra i tanti tematismi, molti di essi possono essere reperiti presso gli enti territoriali competenti o presso database cartografici consultabili via internet, mentre altri sono generati utilizzando gli strumenti e le funzioni realizzati in EHHRA-GIS, tra cui in particolare i tematismi che descrivono le sorgenti (geometria, tipo di rilascio, localizzazione) e tutte le grandezze ottenute mediante campionamenti sul campo (concentrazioni, piezometria).

Studio e Modellazione delle Concentrazioni dei COCs nei media ambientali (Fate and Transport Modelling)

Lo studio dell'estensione e natura della contaminazione del sito in termini di valutazione della distribuzione spaziale e temporale delle concentrazioni nei media ambientali, si può perseguire o con l'utilizzo di modelli matematici predittivi integrati nel sistema EHHRA-GIS, o attraverso l'interpolazione spaziale delle grandezze campionate puntualmente sul sito con una campagna di monitoraggio. In entrambi i casi i risultati dell'analisi producono una serie di mappe che descrivono l'andamento spaziale e temporale

delle concentrazioni (medie nel tempo, stazionarie) nei media ambientali interessati (aria, acqua, suolo, falda).

L'interfaccia grafica del sistema permette di interagire con le diverse fasi dello studio, ovvero la preparazione degli input (pre-processing), l'esecuzione dei modelli, la generazione e la visualizzazione dei risultati (post-processing) utilizzando le funzioni di analisi spaziale del GIS.

Stima delle Concentrazione nei mezzi di Esposizione

L'esposizione dei ricettori umani ai COCs avviene attraverso il contatto con i media di esposizione (exposure Media), rappresentati dai media ambientali (aria, acqua, suolo) e dagli alimenti (vegetali, carne, latticini). Le concentrazioni dei COCs nei media di esposizione sono stimate utilizzando i dati delle campagne di monitoraggio condotte oppure attraverso opportuni modelli matematici che utilizzano come input i dati provenienti dalla fase di caratterizzazione della contaminazione dei media ambientali.

Tra i modelli si citano quelli di Catena Alimentare (*Food Chain Modelling*) il cui obiettivo consiste nella stima delle concentrazioni dei COC nei cibi quali vegetali, foraggio, carne animale e latticini, che costituiscono uno dei principali mezzi di esposizione per l'uomo.

Le equazioni di calcolo utilizzate dal sistema estratte da *Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities* [9] e da *CalTOX Multimedia Total Exposure Model For Hazardous-Waste Sites* [10], sono basate sull'utilizzo dei fattori di trasferimento TF tra i media ambientali e di esposizione: essi definiscono la frazione di concentrazione del composto presente nel media ambientale che viene assorbita nel media di esposizione.

$$C_{i,em}(x, y, z, t) = TF_{i,e-em} \bullet C_{i,e}(x, y, z, t) \quad (1)$$

dove:

$C_{i,em}(x, y, z, t)$ = concentrazione nel mezzo di esposizione *em* relativo al COC *i*

$C_{i,e}(x, y, z, t)$ = concentrazione nel media ambientale *e* relativo al COC *i*

$TF_{i,e-em}$ = Fattore di Trasferimento per il COC *i* dal media ambientale *e* al media di esposizione *em*

I modelli di bioaccumulo negli alimenti integrati nel sistema qui descritto sono:

- bioaccumulo nei vegetali (sotterranei e superficiali) in seguito a deposizione diretta di particolato (secca e umida), assorbimento della fase gas sulla superficie delle piante ed assorbimento attraverso le radici;
- bioaccumulo nei cibi di origine animale (carni, uova, latticini) in seguito a ingestione di suolo e vegetali, ingestione di acqua e inalazione dei vapori e particolato;
- bioaccumulo e bioconcentrazione negli organismi acquatici.

Griglia di Calcolo

Sulla mappa dell'area oggetto dello studio si definisce un nuovo tematismo costituito da una griglia di punti georeferenziati che rappresenta l'insieme di punti su cui saranno effettuate le stime dell'esposizione e del rischio per i ricettori coinvolti. Ogni punto della griglia contiene tutte le informazioni elaborate negli step precedenti, come le concentrazioni nei media ambientali e di esposizione, i dati caratterizzanti i recettori umani, eccc. La matrice di punti viene successivamente elaborata dai modelli di stima dell'esposizione e del rischio presenti nel sistema.

Definizione dello Scenario di Esposizione

La definizione dello Scenario di Esposizione (Exposure Scenario) consiste nella descrizione delle proprietà fisiche generali del sito e delle caratteristiche delle popolazioni residenti o limitrofe alla area interessata. I dati raccolti ed ottenuti dalle precedenti fasi di descrizione digitale del sito e di studio della contaminazione debbono essere combinati con la descrizione dei ricettori umani coinvolti, descrivendone le proprietà che influenzano l'esposizione, come la localizzazione, il tipo di attività, la dieta e le caratteristiche anatomiche.

In particolare essa si articola nelle seguenti fasi:

1. Localizzazione e Identificazione dei Recettori Umani di interesse,
2. Caratterizzazione dei Recettori Umani,
3. Identificazione dei Percorsi di Esposizione.

Con la localizzazione spaziale il valutatore definisce la distanza e la direzione delle popolazioni potenzialmente esposte rispetto alle aree contaminate, rappresentando con una mappa la distribuzione spaziale della popolazione sull'area interessata.

L'identificazione delle diverse tipologie di individui coinvolti avviene in funzione della localizzazione e dello stile di vita, in particolare si riconoscono tutte le popolazioni potenzialmente esposte, rappresentate sia dagli individui vicini o residenti nell'area contaminata, sia dagli individui remoti ma che possono entrare in contatto con i media dell'area contaminata, ed anche tutti gli individui che nel futuro immediato potrebbero essere esposti in seguito ad un cambiamento di destinazione d'uso del sito e dei suoi media ambientali.

Particolare attenzione deve essere rivolta alla identificazione di tutte le sotto popolazioni particolarmente sensibili alla contaminazione, a tal fine occorre localizzare scuole, ospedali, asili, aree residenziali con bambini, centri commerciali, laghi da pesca, fattorie ed aree industriali.

In tabella 1 sono elencate alcune delle sotto popolazioni sensibili raccomandate dalla USEPA:

RECETTORI
Residenziali (Adulti e Residenti)
Industriali (Lavoratori,..)
Ricreazionali (Bambini)
Agricoltori (adulti e bambini)
Pescatori (adulti e bambini)
Malati

Tabella 1. Recettori Umani Sensibili

Ogni tipologia di ricettore umano identificato viene caratterizzato in termini anatomici (peso corporeo, superficie esposta) e di abitudini alimentari (ingestione di cibo, acqua, suolo, inalazione di aria ed assorbimento dermale), utilizzando la banca dati del sistema EHHRA-GIS. Tra i molteplici vantaggi offerti dal sistema nella definizione dello scenario di esposizione, si evidenzia la possibilità offerta all'utente sia di utilizzare ricettori con caratteristiche standard presenti nel database, sia di definire nuove tipologie di ricettori ad hoc per la situazione in esame.

L'identificazione dei potenziali Percorsi di Esposizione (*Exposure Pathways*) si articola nella descrizione dei meccanismi che mettono in contatto la sorgente (Source Area) del COC con il ricettore umano. Un percorso di esposizione è generalmente costituito da quattro elementi: (1) una sorgente ed un meccanismo di rilascio del COC, (2) un mezzo di ritenzione o trasporto, (3) un punto di contatto (Exposure Point) tra il ricettore e il mezzo contaminato, e (4) una via di esposizione (Exposure Route). In figura 2 sono raffigurate le connessioni fisiche tra gli elementi che definiscono un percorso di esposizione per i ricettori umani a seconda della tipologia del rilascio.

Le vie di esposizione (Exposure Route) sono rappresentate da tre principali meccanismi di contatto tra ricettore e composto chimico:

1. Ingestione
2. Inalazione
3. Contatto dermale

Il sistema qui illustrato è in grado di effettuare le stime di esposizione per 23 percorsi di esposizione diversi.

Quantificazione dell'Esposizione

Per esposizione si definisce il contatto tra un organismo (umano nel caso del rischio per la salute) ed un composto chimico o un'agente fisico [11]. La valutazione della magnitudo dell'esposizione consiste nella quantificazione (misura o stima) della dose potenziale ovvero della quantità (massa nel caso di composto chimico) di agente che entra in contatto con l'organismo umano attraverso i propri organi di scambio con l'ambiente (polmoni, pelle, intestino, etc..) all'interno di uno specifico intervallo di tempo.

Essa rappresenta la quantità cumulativa di sostanza tossica o cancerogena che entra in contatto con il ricettore umano ed è funzione della distribuzione spazio-temporale delle concentrazioni $C_{i,em}$ del i -esimo contaminante nel mezzo di esposizione em , delle caratteristiche di assunzione $CR_{j,i}$ del k percorso di esposizione relativo al ricettore j che definisce il contatto tra mezzo e ricettore ed infine dalla frequenza annua di esposizione $Ef_{j,k}$:

$$D_{i,j,k}^{pot}(x, y, z, t) = \int_{ED_{j,k}} C_{i,em}(x, y, z, t) \bullet CR_{j,k}(x, y, z, t) \bullet EF_{j,k}(x, y, z, t) \bullet dt \quad (2)$$

Nell'ipotesi che le concentrazioni e i percorsi di esposizioni rimangano costanti all'interno del periodo di esposizione è possibile quantificare la dose in termini di massa di sostanza in contatto con l'organismo normalizzata nell'unità di tempo e per unità di peso corporeo (mg COC per kg peso corporeo per giorno, mg/(kg*d)), definita come *Intake* o dose potenziale (*Potential Dose*).

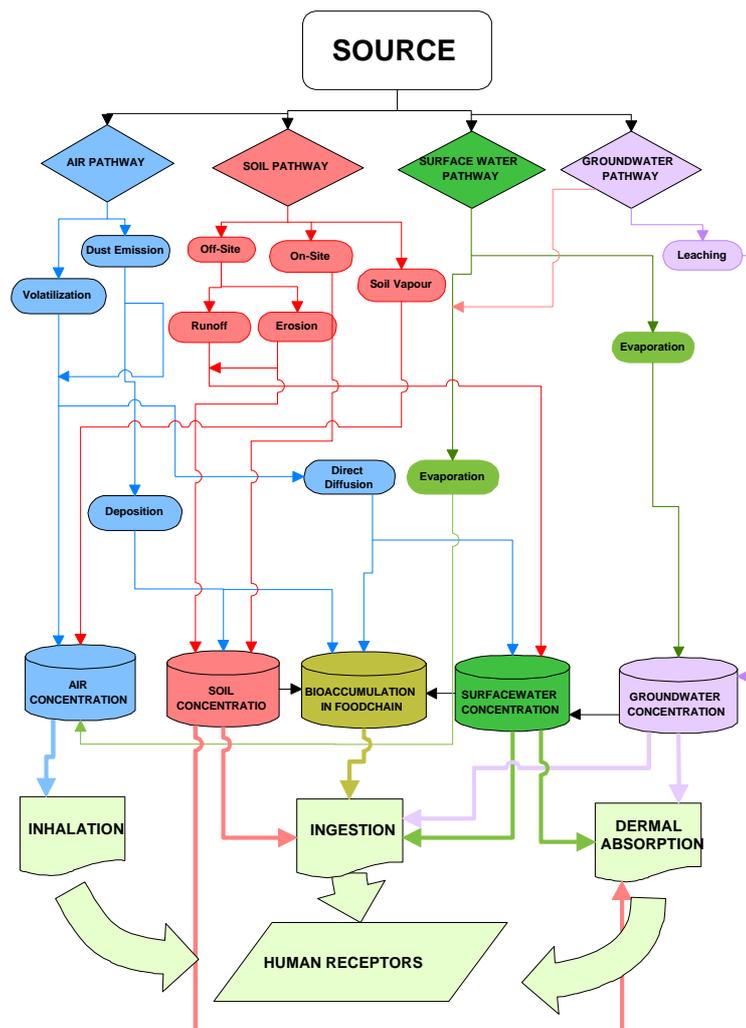


Figura 2. Connessioni fisiche dei costituenti del Percorso di Esposizione (*Exposure Pathway*)

Si osservi che l'intake rappresenta una stima conservativa della massa che effettivamente viene assorbita dagli organi dei ricettori, che costituisce la Dose Interna (*Internal Dose*), ovvero ciò che resta dopo aver considerato le perdite dovute ai processi metabolici.

Nell'ipotesi di stazionarietà citata, il sistema calcola l'*Intake* totale per ogni tipologia di ricettori j , relativo ad uno scenario di esposizione caratterizzato dalla presenza di i COCs e da k percorsi di esposizione mediante la seguente espressione:

$$I_{i,j}(x, y, z) = \sum_k \frac{C_{i,em} \cdot CR_{j,k} \cdot EF_{j,k} \cdot ED_{j,k}}{BW_j \cdot AT_{j,k}} \quad (3)$$

dove:

$I_{i,j}(x,y,z)$ = Intake totale per il ricettore j relativo all'esposizione all' i -esimo COC sommando il contributo di k percorsi di esposizione (mg/kg-giorno)

$ED_{j,k}$ = Durata dell'esposizione (anni)

BW_j = Peso Corporeo del recettore j (kg)

$AT_{j,k}$ = Durata in cui viene effettuata la media dell'esposizione (giorni).

Il valore di $AT_{j,k}$ definisce la durata temporale su cui viene normalizzata la dose assorbita; esso si differenzia a seconda della tipologia di composti oggetto della stima. Per i composti classificati come tossici, la dose viene normalizzata sulla durata effettiva dell'esposizione al COC, ovvero $AT_{j,k}$ = durata del periodo di esposizione, in queste ipotesi l'*Intake* viene definito come Dose Media Giornaliera (*Average Daily Dose ADD*). Nella valutazione dell'esposizione a sostanze cancerogene, poiché gli effetti sulla salute sono descritti in termini di probabilità nell'arco della vita, la dose assorbita è normalizzata considerando $AT_{j,k}$ pari alla durata media della vita del ricettore umano esposto. L'intake relativo a sostanze cancerogene prende il nome di Dose Media Giornaliera nell'arco di durata della Vita (*Lifetime Average Daily Dose LADD*).

Il sistema EHHRA-GIS contiene una database con i valori tipici dei parametri anatomici e dietologici per il calcolo della dose derivati dagli studi dell'USEPA [12], l'utente del sistema può adottare i valori dei parametri presenti nel database oppure definirne dei nuovi a seconda delle esigenze.

La stima dell'esposizione relativa ad ogni COC e percorso di esposizione viene effettuata in corrispondenza dei punti della griglia di calcolo; ne risultano superfici e linee di contour dell'intake per ogni recettore coinvolto.

Caratterizzazione del Rischio

La caratterizzazione del Rischio e del Pericolo consiste nell'integrazione delle informazioni ottenute nelle precedenti fasi di identificazione del pericolo (*Hazard Assessment*), di quantificazione dell'esposizione (*Exposure Assessment*) e di caratterizzazione della tossicità e cancerogenicità dei COC (*Dose-Response assessment*), ai fini di ottenere una stima quantitativa del rischio per i recettori umani esposti, analizzare le incertezze e l'attendibilità dei risultati ottenuti ed infine comunicare alle figure interessate i risultati delle analisi condotte.

L'algoritmo di calcolo è in grado valutare numericamente il rischio Cancerogeno (*Cancer Risk*) e l'Indice di Rischio Cronico o Quoziente di Pericolo (*Hazard Quotient*) per un recettore umano localizzato all'interno di uno scenario di esposizione caratterizzato dalla presenza di sorgenti, contaminati e percorsi di esposizione multipli. I due parametri sono stimati per ogni recettore sommando i contributi dei diversi composti (*i*) e dei percorsi di esposizione (*k*) coinvolti nella valutazione.

Rischio Cancerogeno

Il Rischio Cancerogeno Individuale è definito dalla misura dell'incremento di probabilità che un singolo recettore umano ha di sviluppare il cancro nell'arco dell'intera durata della sua vita, in seguito all'esposizione ad agenti chimici cancerogeni. In tal caso si parla anche di Eccesso di rischio cancerogeno individuale oltre il valore di background. Nel caso di esposizione per il recettore *j* ad un solo composto cancerogeno *i*, l'espressione di calcolo del Rischio Cancerogeno Individuale/Locale comunemente adottata è la seguente:

$$\begin{aligned} \text{Individual_CancerRisk}_{i,j}(x, y, z, t) &= LADD_{i,j} \cdot CSF_i & (4) \\ LADD_{i,j} = I_{i,j} &\Leftrightarrow AT_{j,k} = 70 \text{anni} \end{aligned}$$

essendo:

CSF_i = Fattore di Potenza Cancerogena (Cancer Slope Factor) del *i*-esimo COC (mg/kg-day)⁻¹

$LADD_{ij}$ = Intake Totale normalizzato nell'arco della durata della vita per ogni singolo recettore *j* e composto *i*, ottenuto sommando il contributo di tutti i *k* percorsi di esposizione (mg/kg-day).

In condizioni di esposizione a più sostanze cancerogene, in presenza di basse dosi e che le sostanze cancerogene siano ad azione indipendente, ovvero non vi sia comportamento sinergico o antagonista, si calcola il Rischio Cancerogeno Totale Individuale con la seguente relazione:

$$\text{TotalIndividual_CancerRisk}_j = \sum_i \text{Individual_CancerRisk}_i \quad (5)$$

Il CFS rappresenta la stima conservativa dell'incremento di probabilità di sviluppare il cancro in seguito all'esposizione ad una dose unitaria nel corso della vita ed è un parametro caratteristico del composto cancerogeno. I valori dei CFS sono ottenuti da una estrapolazione statistica dai dati degli studi tossicologici sugli animali (estrapolazione dalle alte dosi dei test, alla basse dosi dell'esposizione ambientale) utilizzando il modello multistage linearizzato con un limite di confidenza superiore al 95 esimo percentile. Nell'ipotesi di linearità tipica delle bassissime dosi considerate, CSF assume un valore costante e di conseguenza il rischio è proporzionale all'intake.

Per una popolazione di individui *j* aventi le medesime caratteristiche, si può definire un numero atteso di morti da cancro ENCD (Expected Number of Cancer Death):

$$\text{ENCD}_j(x, y) = \sum_j \text{Individual_CancerRisk}_j(x, y, z, t) \cdot \text{POP}_j(x, y, z, t) \quad (6)$$

dove:

$\text{POP}_j(x, y, z, t)$ = Numero di individui appartenenti alla popolazione *j*-esima

Quoziente di Pericolo

Le sostanze tossiche classiche non cancerogene hanno una relazione tra dose e risposta (effetto sull'organismo) caratterizzata dalla presenza di una soglia di non effetto, ovvero gli effetti negativi si manifestano sugli organismi esposti solo se la dose supera un certo valore di soglia. La caratterizzazione del pericolo associato all'esposizione a sostanze tossiche avviene attraverso la stima del Quoziente di Pericolo.

Il Quoziente di Pericolo non è una misura probabilistica come il rischio cancerogeno, ma piuttosto, una misura della magnitudo dell'esposizione a sostanze tossiche classiche rispetto ai rispettivi livelli di esposizione standard (RfD Reference Dose) a cui corrispondono effetti non negativi anche per le popolazioni deboli. EHHRA-GIS calcola il Quoziente di Pericolo mediante il rapporto tra la dose totale assorbita da un generico individuo appartenente al recettore umano k ed il livello di esposizione standard relativo al composto i , essendo entrambi i valori riferiti al medesimo intervallo temporale di esposizione:

$$HQ_{ij}(x, y, z, t) = \frac{ADD_{ij}(x, y, z, t)}{RfD_i} \quad (7)$$

$$ADD_{ij} = I_{ij} \Leftrightarrow AT_{jk} = Durata_Esposizione$$

dove:

$ADD_{ij}(x, y, z, t)$ = Dose media Giornaliera mediata nella durata dell'esposizione relativa al tossico i per il ricettore j ottenuta sommando il contributo dei k percorsi di esposizione j (mg/kg-d)

RfD_i = Dose di Riferimento (Reference Dose) per il COC i -esimo al di sotto della quale non si hanno effetti (mg/kg-d).

Nel caso in cui i COC presentino caratteristiche tossicologiche simili, con medesimi organi bersaglio ed effetti additivi, allora è possibile stimare il Quoziente di pericolo totale per un recettore come somma dei singoli contributi HQ_i :

$$HQ_{tot_j}(x, y) = \sum_i HQ_{ij} \quad (8)$$

Target Levels

In generale l'accettabilità di un rischio non dipende esclusivamente dalle stime quantitative delle probabilità di accadimento di un evento avverso e della magnitudo dei suoi effetti, ma anche da fattori politici e sociali. La definizione dei livelli di accettabilità appartiene pertanto alla successiva fase di gestione del rischio (Risk Management) a cui partecipano gli amministratori e legislatori che valutano i risultati numerici ottenuti con un approccio quantitativo alla luce di diverse necessità, quali la protezione dei diritti individuali, la valutazione costi benefici, la percezione pubblica del rischio, le incertezze.

Agli inizi degli anni '80 le agenzie federali americane preposte alla salvaguardia della salute dei cittadini hanno stabilito come soglia d'accettabilità, un livello d'eccesso di rischio cancerogeno pari a 10^{-6} ; ciò significa che uno su un milione di soggetti esposti uno può sviluppare il cancro.

A tutt'oggi è aperto un ampio dibattito tra le agenzie internazionali che si occupano di valutazione del rischio, ai fini dell'identificazione dei valori di accettabilità: essi sono in genere diversi in relazione all'obiettivo delle analisi, differenziandosi in particolare i criteri di bonifica dei siti contaminati dai criteri per aree industriali contaminate.

Ai fini di fornire un valido confronto con i valori di rischio cancerogeno e quoziente di pericolo (indice di rischio cronico) calcolati dal sistema EHHRA-GIS nelle valutazioni condotte su casi reali, si riportano le diverse fasce di giudizio utilizzate dall'USEPA per stabilire criteri di bonifica dei siti contaminati.

Con riferimento all'eccesso di Rischio Cancerogeno Individuale i livelli proposti sono:

1. $CancerRisk < 10^{-6}$ Rischio trascurabile, non viene intrapresa alcuna azione di bonifica del sito contaminato o di mitigazione del rischio per l'area interessata,
2. $10^{-6} < CancerRisk < 10^{-5}$ Rischio non Trascurabile, occorre approfondire le analisi svolte e caso per caso si procede con azioni mitigative e di bonifica,
3. $CancerRisk > 10^{-4}$ Rischio Elevato, occorre procedere con azioni tempestive di bonifica o mitigazioni dei rischi per l'area interessata.

In presenza di aree geografiche contaminate da sorgenti industriali, occorre considerare anche il contributo al rischio cancerogeno apportato dal livello di background della contaminazione, in questo caso si identifica un intervallo di accettabilità compreso tra 10^{-5} e 10^{-6} , mentre il rischio individuale connesso all'esposizione a sostanze cancerogene rilasciate da una singola sorgente è considerato inaccettabile se superiore a 10^{-5} .

Per l'indice di rischio cronico si adottano invece le seguenti classificazioni:

1. $HI > 1$ Si manifestano effetti negativi sugli individui esposti; vi è necessità di adottare misure di mitigazione degli effetti,
2. $HI < 1$ Non si manifestano effetti negativi.

Spesso ai fini di considerare anche gli effetti della contaminazione di background, sono stati proposti valori accettabili dell'indice di rischio cronico inferiori all'unità (0.75 o 0.25).

La fase di caratterizzazione del rischio si conclude con una analisi dei risultati ottenuti e la generazione delle mappe iso rischio ed iso dose ai fini di procedere alla successiva fase di gestione del rischio per la salute umana.

Conclusa la fase di stima quantitativa del rischio cancerogeno e dell'indice di rischio cronico, poiché diverse sono le incertezze e le variabilità dei calcoli eseguiti, la caratterizzazione del rischio richiede anche la valutazione dell'accuratezza delle stime. A tal fine uno sviluppo futuro della ricerca e del sistema fin qui descritto consisterà nell'inserimento all'interno del sistema stesso di un modulo in grado di valutare gli errori determinati dal maggiore o minor grado di precisione ed accuratezza dei dati utilizzati, di stimare come la variabilità dei dati di input incida sulle misure di esposizione e di rischio, ed infine di valutare le incertezze dei risultati conseguenti alla mancanza di dati o alle ipotesi.

IL CASO DI STUDIO

Si riportano in questo paragrafo i risultati di un semplice caso di studio a titolo esemplificativo dell'applicabilità e delle potenzialità del sistema EHHRA-GIS. Oggetto dello studio è un'ipotetica area geografica caratterizzata dalla presenza di una zona urbana, un distretto industriale e un'area agricola.

Il distretto industriale limitrofo all'area urbana è localizzato a circa 6 km a sud del centro città; esso comprende due cementifici e un polo petrolchimico le cui sorgenti di combustione sono responsabili dell'inquinamento atmosferico. L'area agricola attorno al distretto industriale è adibita alla produzione di vegetali e foraggio, una piccola porzione di essa presenta una contaminazione del suolo superficiale dovuta al passato ed intensivo utilizzo di pesticidi per la coltivazione del cotone.

I Composti chimici oggetto della valutazione (COC) emessi dalle sorgenti industriali sono il Benzene e la Diossina mentre il responsabile della contaminazione del terreno agricolo è il pesticida Aldrin.

Per lo studio del trasporto e del destino ambientale del Benzene e della Diossina è stato utilizzato il modello matematico ISCLT3 (Industrial Source Complex Long Term) sviluppato dall'USEPA [13] ed ora completamente integrato nel sistema EHHRA-GIS. La simulazione è stata condotta ipotizzando che il terreno sia piatto e con le condizioni meteorologiche definite dalla matrice delle distribuzioni annuali di frequenza di direzione e velocità del vento e delle classi di stabilità.

I risultati delle simulazioni sono visualizzati dal sistema su svariate mappe che descrivono la distribuzione spaziale delle concentrazioni medie annuali al suolo: in figura 3 è riportata la mappa delle linee iso-concentrazione per la diossina, in figura 4 è visualizzata invece la distribuzione spaziale della contaminazione da Aldrin del suolo.

I recettori umani identificati nell'area di studio sono agricoltori adulti e bambini residenti nell'area urbana; per i primi si è supposta una durata di esposizione pari a 40 anni, per i secondi pari a 6 anni. La localizzazione dei recettori è riportata in figura 5.

I percorsi di esposizione che definiscono i meccanismi di contatto tra i composti chimici e i recettori sono i seguenti:

1. Inalazione diretta di particolato e vapori,
2. Ingestione accidentale di suolo superficiale,
3. Ingestione di vegetali contaminati,
4. Ingestione di cibo di origine animale contaminato attraverso l'ingestione di suolo e mangimi contaminati,
5. Contatto dermico con suolo contaminato.

I risultati delle stime quantitative della dose e del rischio individuale totale sono rappresentati dal sistema mediante mappe geografiche raffiguranti la distribuzione delle linee di iso-dose e iso-rischio. In figura 6 è riportato il rischio totale cancerogeno per i recettori bambini residenti in area urbana, mentre il contributo dei percorsi di esposizione e dei singoli COC al rischio cancerogeno totale è illustrato in figura 7.

CONCLUSIONI

La complessità dei problemi di valutazione del rischio ambientale e la grande quantità di informazioni e dati diversi che sono richiesti nella gestione delle procedure, richiedono lo sviluppo di sistemi in grado di integrare analisi di natura diversa. Il sistema EHHRA-GIS qui illustrato è in grado di gestire efficacemente e velocemente tutti i numerosi passi della procedura per la valutazione del rischio. In conclusione costituisce un efficace strumento per la valutazione del rischio per la salute umana in grado di assistere i decisori e gestori dei rischi nell'analisi dei dati e nella valutazione delle possibili alternative di riduzione del rischio.

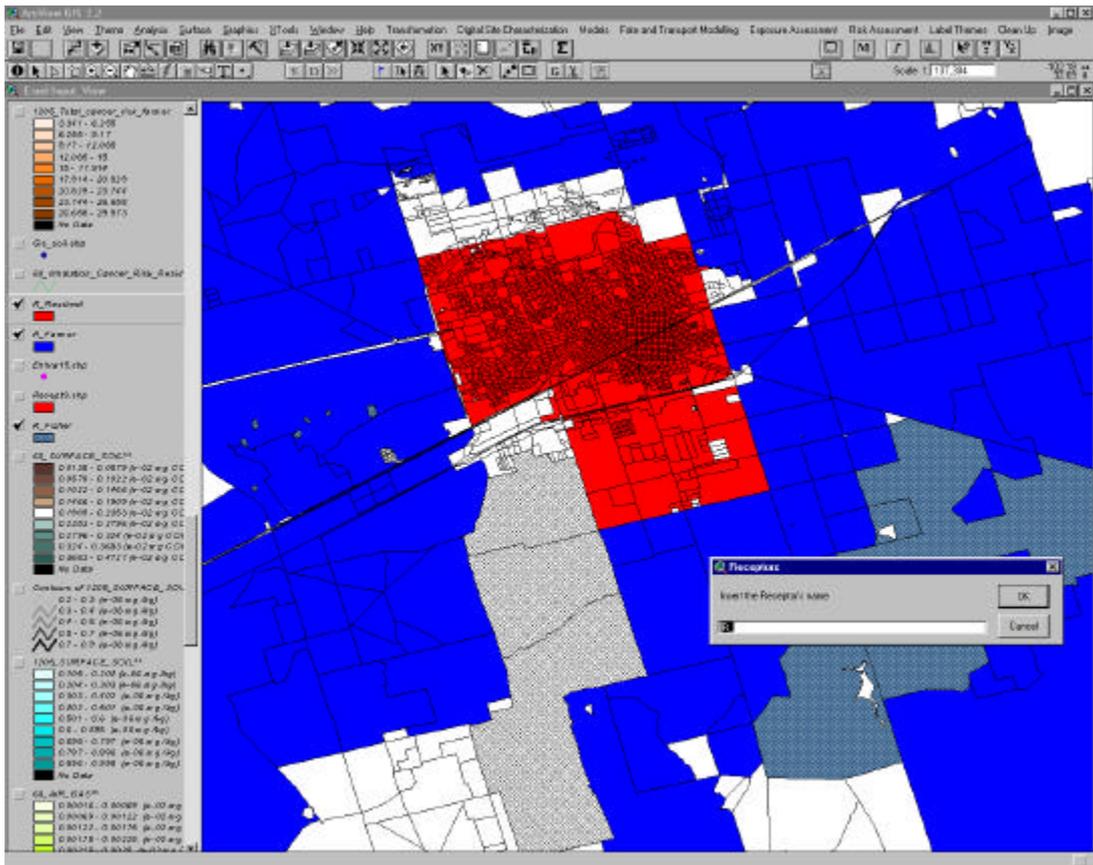


Figura 5. Localizzazione dei Recettori Umani

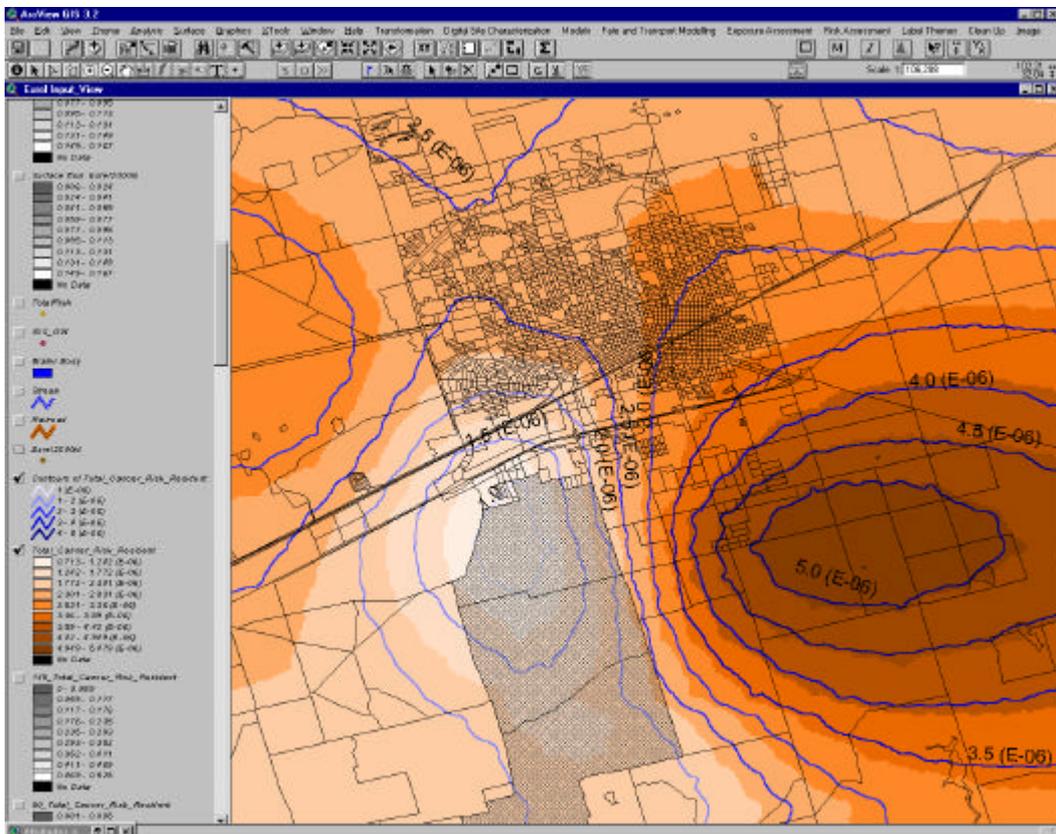


Figura 6. Linee Iso-Rischio Cancerogeno Totale per i recettori Residenti

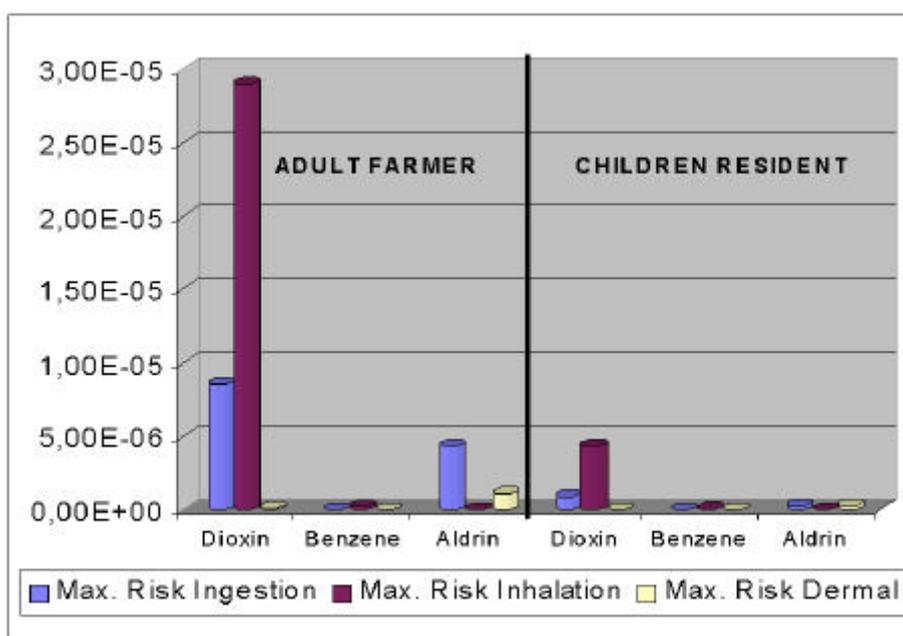


Figura 7. Composizione del Rischio Cancerogeno Totale per i recettori umani

BIBLIOGRAFIA

- [1] D.D. Rounds, P.C. Johnson, The Development and Implementation of the ASTM standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites – RBCA, (1995):
- [2] American Petroleum Institute (API), Risk/Exposure Assessment Decision Support System (DSS), User Manual, (May 1994).
- [3] ASTM Standard Guide for Risk-based Corrective action Applied at Petroleum Release Sites, E 1739-95, West Conshohocken PA.
- [4] CONCAWE European Oil Industry Guidline for Risk – Based Assessment of Contaminated Sites, The Oil Companies European Organization for environment, Health and Safety, Report n. 2/97;
- [5] CARACAS Basic Information Report by the Concerted Action on Risk Assessment for Contaminated Sites (CARACAS) in the European Union, Wien Berlin (1997).
- [6] USEPA Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume I, Human Health evaluation Manual, part A, washington DC, (1989).
- [7] National Academy of Sciences (NAS), *Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process*. National Academy Press. Washington, D.C., (1983).
- [8] ESRI Avenue Customization and application development for ArcView, (1996).
- [9] USEPA,. Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities. Peer Review Draft, (1998).
- [10] University of California Davis, CalTOX, A Multimedia Total Exposure Model For Hazardous-Waste Sites, Part I: Executive Summary, Lawrence Livermore National Laboratory,(1994).
- [11] U.S. EPA., Superfund Exposure Assessment Manual, Office of Emergency and Remedial, Response. Washington, D.C., (1988b).
- [12] USEPA, Exposure Factors Handbook”. Office of Research and Development. NCEA(1997).
- [13] USEPA, User’s guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models”. Office of Air Quality Planning and Standards., (1995).