

DISTANCE DECAY FUNCTIONS E PENDOLARISMO NELLE INDAGINI SANITARIE E
NELLA PERIMETRAZIONE DELLE “AREE A RISCHIO”

Guido SIGNORINO¹, Roberto PASETTO², Elisa GATTO¹, Marina LA ROCCA¹, Massimo MUCCIARDI¹ e Pierpaolo MUDU³

¹ Dipartimento di Economia, Statistica, Matematica e Sociologia “W. Pareto”, Università di Messina, Via T. Cannizzaro n. 278, 98122, Messina

² Istituto Superiore di Sanità, Dipartimento Ambiente e Connessa Prevenzione Primaria, Viale Regina Elena n. 299, 00161, Roma

³ World Health Organization, European Centre for Environment and Health, Via F. Crispi n. 10, 00187, Roma

SOMMARIO

Esigenze metodologiche legate al governo del territorio (delimitazione delle “aree a rischio”) od orientate ad approfondimenti di studi epidemiologici, hanno evidenziato l’esistenza di vaste potenzialità applicative delle analisi geo-economiche in campo sanitario. La perimetrazione delle “aree a rischio” fino a questo momento non ha tenuto conto delle abitudini di mobilità delle popolazioni, concentrandosi sulle condizioni di contaminazione ambientale del territorio ed ipotizzando che l’esposizione ai fattori di rischio si riduca linearmente col decrescere della loro insistenza territoriale. Poiché molti lavoratori pendolari soggetti ad esposizione occupazionale risiedono in comuni distanti dal luogo di emissione, le attuali delimitazioni potrebbero risultare non efficienti, non considerando in maniera adeguata l’insieme della popolazione realmente esposta al rischio di salute. In questo lavoro l’analisi di mobilità (con la stima di funzioni di distance-decay) viene finalizzata ad affinare le caratteristiche della categorizzazione di una coorte occupazionale (5.621 lavoratori del petrolchimico di Gela), per definire un criterio di distinzione tra “residenti” e “pendolari” in assenza di informazioni certe sulla storia residenziale individuale dei soggetti. Nella stima delle funzioni di distance-decay, condizioni di omogenea distribuzione della popolazione sullo spazio (isotropicità) vengono simulate con la metodologia dei “pendolari-equivalenti”.

Lavoro coordinato da G. Signorino. I singoli paragrafi sono così attribuiti: Parr. 1 e 6: M. La Rocca; par. 2: P. Mudu, R. Pasetto (par. 2.2) e G. Signorino (par. 2.3); par. 3 E. Gatto e M. Mucciardi (par. 3.2); par. 4: G. Signorino; par. 5: R. Pasetto.

1. INTRODUZIONE

Questo paper presenta i risultati di un lavoro interdisciplinare svolto nell'ambito del progetto di assistenza alla Regione Sicilia da parte dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (Centro Europeo per la Salute e l'Ambiente) per la gestione delle "aree ad elevato rischio di crisi ambientale" della Regione e finanziato dall'Assessorato all'Ambiente nell'ambito delle iniziative svolte dall'Ufficio Speciale Aree a Rischio.

Lo studio (che combina competenze economico-territoriali, geografiche ed epidemiologiche e che è già stato esposto al 48° Congresso Annuale dell'ERSA) approfondisce il ruolo delle analisi territoriali e di mobilità per fini di politiche e studi per la salute pubblica nella gestione della "aree a rischio".

Le analisi territoriali relative alla salute pubblica rappresentano un ambito di applicazione naturale e di particolare rilevanza ed utilità sociale per gli studi di economia regionale e di geografia economica, eppure fino a questo momento gli studi epidemiologici non hanno dialogato in maniera sufficiente con le discipline territoriali.

La statistica spaziale integra spesso in modo importante ed efficace le indagini epidemiologiche comparate (Biggeri et al, 2008), consentendo in particolare di definire i livelli di contaminazione ambientale delle aree studiate combinando in maniera opportuna il campionamento delle popolazioni oggetto di studio e la zonizzazione del territorio al fine di valutare i livelli di esposizione cui la popolazione residente è sottoposta. Tuttavia, nella definizione delle aree a rischio e nella valutazione delle ricadute dell'inquinamento industriale sulla salute si è fino a questo momento tenuto poco conto del fenomeno del pendolarismo, che può assoggettare ad esposizione lavorativa popolazione residente in comuni differenti rispetto a quelli inclusi nell'area a rischio. D'altro lato, le indagini epidemiologiche si sono spesso articolate realizzando confronti tra "coorti" di lavoratori impiegati in impianti con forti ricadute ambientali ed altre popolazioni di riferimento utilizzate come termine di paragone per definire un eventuale incremento di rischio legato agli impianti inquinanti. Non di rado si ottengono in questi casi risultati ambigui, determinati dall'insorgere del cosiddetto "effetto lavoratore sano". In tali occasioni, per estrapolare un eventuale effetto di residenzialità sugli esiti sanitari delle popolazioni, è stato suggerito (Pasetto et al., 2007, 2008) di concentrarsi esclusivamente sulla coorte dei lavoratori, differenziando i "pendolari" dai "residenti". Poiché i primi sarebbero soggetti esclusivamente all'esposizione lavorativa, mentre i secondi andrebbero incontro ad una duplice esposizione (sia lavorativa che residenziale), l'esistenza di un eventuale differenziale epidemiologico positivo per il secondo gruppo rispetto al primo indicherebbe che la residenza nel comune (o nei comuni) interessati alle ricadute ambientali dell'impianto ha un impatto sulla salute pubblica.

È evidente che, anche in questo secondo caso, la qualità metodologica delle analisi di mobilità risulta di grande importanza per la validità delle conclusioni degli studi epidemiologici.

Dopo aver brevemente introdotto alcune considerazioni generali sul rapporto tra mobilità (pendolarismo) e definizione delle "aree a rischio" e sulla funzionalità degli studi di mobilità per le

analisi epidemiologiche (par. 2), il paper presenta l'applicazione di alcuni modelli di mobilità per l'analisi di coorte dei lavoratori con particolare riferimento al comune di Gela (parr. 3 e 4); tali analisi, applicate ad uno studio di coorte sui lavoratori dell'impianto petrolchimico di Gela (par. 5), ne rafforzano le conclusioni ed offrono un percorso metodologico potenzialmente replicabile in altri casi di studio. Sotto il profilo delle analisi di mobilità, il par. 4 propone l'adozione di una metodologia (detta modello dei "pendolari-equivalenti") che consente di simulare condizioni di "isotropicità" dello spazio in termini di omogenea distribuzione della popolazione attorno alla località centrale esaminata.

2. PENDOLARISMO, DEFINIZIONE DELLE "AREE A RISCHIO" E ANALISI EPIDEMIOLOGICHE SULLA SALUTE DELLA POPOLAZIONE

2.1 Analisi di mobilità e perimetrazione delle "aree a rischio"

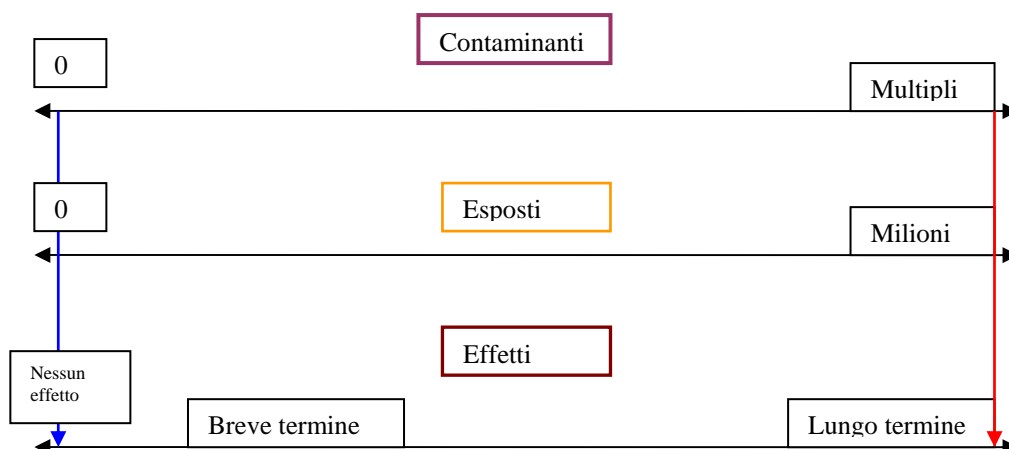
Nella definizione delle "aree a rischio" sono generalmente considerati aspetti geografici e territoriali (es.: conformazione del territorio, caratteristiche meteorologiche quali la prevalenza dei venti o delle correnti marine, ecc.) particolarmente utili per individuare le caratteristiche di contaminazione del territorio e l'estensione della superficie inquinata.

Terracini (2005) ha suggerito di considerare in modo adeguato anche le condizioni di salute delle popolazioni, la cui tutela dovrebbe in ultima istanza rappresentare la prima fonte di preoccupazione per l'operatore pubblico nella determinazione delle politiche di gestione del territorio. Sebbene ciò sia solo implicito nel suggerimento riferito, l'applicazione di adeguate analisi per la mobilità territoriale della popolazione consentirebbe un miglioramento della definizione delle popolazioni effettivamente assoggettate ad un incremento nel rischio sanitario causato dalla esposizione agli agenti inquinanti.

Sotto un profilo generale si può ritenere che quanto affermato da Cutter (1995) in relazione all'ambiguità dei risultati della ricerca nell'ambito della giustizia ambientale vale anche con riferimento alla definizione delle "aree a rischio". L'autore sostiene infatti che: "The ambiguity in the research results is a consequence of four factors: 1) the environmental threat chosen for analysis; 2) the geographic scale or areal unit chosen for measurement; 3) the subpopulation selected; and 4) the time frame" (Cutter, 1995: 114).

Allo stesso modo si può ritenere che la definizione di un'area a rischio richiede la corretta considerazione di tre aspetti che interagiscono pienamente tra essi: (a) la definizione dei livelli di contaminazione; (b) l'identificazione e la valutazione dell'estensione delle popolazioni esposte; (c) gli effetti nel tempo (breve, lungo termine) che la contaminazione produce sulla salute umana (fig. 1):

Figura 1: Contaminazione, esposizione ed effetti di salute



Negli studi applicati la perimetrazione delle aree a rischio è raramente posta in discussione, ma in realtà occorre tener presente che le aree istituzionalmente definite sono allo stesso tempo una componente di un'area più vasta e sono generalmente composte da porzioni non necessariamente omogenee di territorio. Nel complesso, occorre ricordare che, date le caratteristiche di continuità dello spazio (Meade, 2000), i ricercatori dovrebbero in realtà correttamente individuare i criteri di definizione della scala geografica di riferimento. In particolare, Most (2004) evidenzia che “la determinazione della popolazione di riferimento o di confronto può confondere i risultati delle analisi di giustizia ambientale geograficamente basati” sulla definizione istituzionale delle aree a rischio. Nella letteratura della giustizia ambientale questo problema è noto come Modifiable Area Unit Problem (MAUP o problema delle unità d'area modificabili).

È evidente che le abitudini di mobilità/residenzialità della popolazione ed i pattern di pendolarismo quotidiano debbano essere opportunamente considerati: (a) in sede di definizione e perimetrazione istituzionale delle “aree a rischio”; (b) nelle analisi applicate, con riferimento alla identificazione delle popolazioni oggetto di studio e delle popolazioni di riferimento o di confronto.

In relazione a questo secondo aspetto, va considerato il fatto che la popolazione è soggetta ad una doppia esposizione: residenziale e lavorativa. Queste possono essere tra loro sommate o distinte. In altri termini, un soggetto può: 1. risiedere in un'area contaminata, ma lavorare all'esterno di essa o non frequentare ambienti inquinati durante gli orari lavorativi; 2. risiedere in un'area contaminata ed allo stesso tempo lavorare all'interno dell'area ed all'interno di impianti con forte impatto ambientale; 3. lavorare all'interno dell'area contaminata ed all'interno di impianti con forte impatto ambientale, ma risiedere in territori esterni all'area stessa.

Tralasciando l'approfondimento metodologico della relazione tra analisi della mobilità e perimetrazione delle aree a rischio, questo lavoro presenta l'applicazione di modelli di mobilità che riducono la misclassificazione dei gruppi di uno studio di coorte sui lavoratori del petrolchimico di Gela, rafforzandone le conclusioni in termini di effetto della residenzialità.

2.2 Analisi di mobilità e studi epidemiologici di coorti lavorative – il caso dei lavoratori del petrolchimico di Gela

Una associazione tra il rischio di tumore al polmone e la residenza in prossimità di impianti petrolchimici è stata rilevata da vari studi¹. In questi studi le esposizioni all'inquinamento dell'industria petrolchimica sono state valutate indirettamente, utilizzando come *proxies* le distanze delle residenze dagli impianti e la durata della residenza.

Generalmente il contributo delle indagini epidemiologiche su una coorte occupazionale è relativo al rischio occupazionale nel contesto produttivo esaminato (Chekowsky et al., 2005). Nel caso di Gela, dove un vasto impianto petrolchimico è la principale fonte di inquinamento ambientale, l'analisi di mortalità e/o morbidità dei lavoratori può aiutare a chiarire il rischio ambientale/occupazionale, contribuendo così alla descrizione del locale contesto epidemiologico.

La coorte dei lavoratori dell'impianto petrolchimico di Gela è stata analizzata in due studi precedenti al fine di valutare il rischio associato all'occupazione ed alla residenza (Pasetto et al., 2007; Pasetto et al., 2008). In particolare, il secondo studio mirava a valutare il ruolo dell'esposizione ambientale (non occupazionale) nel rischio di tumore al polmone tramite il confronto tra due gruppi di lavoratori, classificati in termini di “probabili residenti” e “possibili non residenti” (pendolari), aggiustati per età, periodo di calendario e lavoro (colletti blu, colletti bianchi, entrambi). La categorizzazione dei gruppi è stata realizzata includendo nel primo gruppo i lavoratori che risultavano nati a Gela o in comuni esterni alla Sicilia e nel secondo gruppo i lavoratori nati in comuni siciliani diversi da Gela.

Il confronto tra gli esiti di mortalità del primo e del secondo gruppo aveva evidenziato l'esistenza di un Rate Ratio (RR) significativamente superiore all'unità² (Pasetto et al., 2008), confermando l'ipotesi che la residenza nel comune di Gela può avere significative implicazioni in termini di rischio di morte per tumore ai polmoni.

La distinzione dei gruppi di lavoratori rappresenta il principale punto di debolezza di questo lavoro. Infatti, l'estensione e la qualità infrastrutturale delle comunicazioni della regione Sicilia, determinano evidenti problemi di misclassificazione differenziale (Pearce et al., 2007), con un sovradimensionamento del gruppo dei “possibili pendolari”. In particolare nel caso di Gela si riscontrano distanze molto elevate (anche superiori ai 250 kms.) ed un livello particolarmente carente di infrastrutturazione dei trasporti (assenza di tratte autostradali; lunghe tratte ferroviarie non sono elettrificate) che fa di Gela una piccola “isola nell'isola”. Se si considera la presenza di un grosso centro industriale petrolchimico in grado di esercitare una forte attrazione occupazionale, si comprende che se da un lato l'impianto petrolchimico attira un importante flusso di pendolari da

¹ Vedi, ad esempio: Bophal et al., 1998; Edwards et al., 2006; Gottlieb et al., 1982; Yang et al., 1999; Belli et al., 2004.

² Il Rate Ratio è il rapporto tra i tassi di mortalità standardizzati di due popolazioni. Al numeratore viene posto il tasso di mortalità della popolazione oggetto di studio, mentre al denominatore si include il tasso di mortalità della popolazione di riferimento. Nel caso di Gela al numeratore veniva incluso il gruppo dei “probabili residenti”, mentre al denominatore veniva inserito il gruppo dei “possibili pendolari”. Il risultato era un rapporto pari ad 1.66, con intervallo di confidenza al 90% di 1.07-2.58).

altri comuni dell'isola, da un altro lato, appare del tutto improbabile l'esercizio di un "pendolarismo quotidiano" per motivi lavorativi per tratti così lunghi da implicare i costi generalizzati (sia economici che di tempo) di percorrenze anche superiori ai 3-400 km. al giorno. Ne consegue che la scelta di considerare "possibili pendolari" tutti i lavoratori nati in comuni siciliani esterni a Gela tende a sovradimensionare il gruppo dei "possibili pendolari"

Chiaramente, tale misclassificazione assume caratteristiche di "conservatività" e "prudenzialità", nel senso che l'inclusione nel gruppo che si ipotizza soggetto ad una doppia esposizione (lavorativa e residenziale) individui in realtà soggetti alla sola esposizione occupazionale comporta che un risultato che evidenzia un significativo differenziale di rischio a carico della dei "probabili residenti" è suscettibile di essere sbilanciato per difetto, ma non per eccesso.

Indipendentemente da quest'ultima considerazione, si pone il problema di affinare il modello di analisi della mobilità per eliminare il problema della misclassificazione dei gruppi (o quanto meno ridurre la portata) e migliorare le caratteristiche qualitative e la robustezza delle conclusioni dello studio epidemiologico.

2.3 Modelli gravitazionali e funzioni di distance-decay: caratteristiche dei dati ed assunzioni implicite alle stime econometriche

In ciò che segue (paragrafi 3 e 4), stime di funzioni di distance-decay relative al pendolarismo su Gela sono state realizzate per individuare un punto di cut-off, ossia una distanza-limite superata la quale il flusso di pendolarismo non è più collegato all'incremento della distanza. L'individuazione del cut-off della funzione serve ad individuare una distanza di soglia (o, più correttamente, di "portata") del pendolarismo, superata la quale occorre presumere che i lavoratori abbiano trasferito il proprio domicilio su Gela anziché viaggiare quotidianamente per raggiungere la destinazione lavorativa. In altri termini, individuata la distanza di cut-off si procederà ad una nuova classificazione dei gruppi, definendo "probabili residenti" tutti i lavoratori del petrolchimico nati nel comune di Gela; "probabili trasferiti" tutti i lavoratori del petrolchimico nati in comuni differenti da Gela e distanti da questo centro più del raggio di cut-off, considerando invece "possibili pendolari" tutti i lavoratori del petrolchimico nati in comuni che presentano una distanza da Gela inferiore rispetto alla soglia stimata.

Il risultato atteso della nuova classificazione è quello di un miglioramento della qualità del modello epidemiologico, che confermi l'esistenza di un $RR > 1$ per i gruppi dei probabili non pendolari.

Le funzioni di distance-decay ed il raggio di cut-off sono stimate ricorrendo a due differenti metodologie.

Nel primo caso si è applicato un modello gravitazionale "standard": (a) stimando la frequenza dei viaggi quotidiani per motivi di lavoro su Gela in funzione sia della distanza che di un indicatore di "massa economica" del comune di origine del flusso, (b) definendo la forma funzionale in base al modello che offriva la miglior performance complessiva, (c) eliminando la variabile di massa per

concentrarsi sulla distanza ed individuare un limite superato il quale l'incremento della distanza risultasse sostanzialmente ininfluenza sul flusso di pendolarismo (il cut-off della funzione).

Nel secondo caso si è costruita una metodologia detta dei "pendolari-equivalenti" che, similmente a quanto avviene nelle analisi di economia del benessere per la comparazione di redditi percepiti da famiglie con dimensione differente, stima un vettore di "coefficienti di equivalenza" per cui dividere il flusso osservato di pendolarismo al fine di eliminare l'effetto di scala prodotto dalla "massa economica" della municipalità di origine del flusso stesso.

I dati utilizzati per la stima dei modelli sono ottenuti dalle informazioni censuarie sugli spostamenti sistematici della popolazione (ISTAT, 2001) relative alla provincia di Caltanissetta. In particolare, dall'insieme degli spostamenti sistematici è stato estrapolato il vettore relativo alle provenienze su Gela, individuando per ciascun comune d'origine l'intensità dei flussi degli spostamenti sistematici per motivi di lavoro per i quali si era registrata presenza su Gela anche nel giorno del mercoledì precedente alla rilevazione censuaria (con ciò riducendo il rischio che nei dati considerati possano rientrare spostamenti per motivi lavorativi che non possiedono caratteristiche di pendolarismo esclusivo o regolare, come ad esempio le attività di autotrasporto, i rappresentanti di commercio, le attività occasionali).

Il fatto che i dati ISTAT siano riferiti al Censimento Generale della Popolazione e dell'Industria del 2001, mentre lo studio epidemiologico è concentrato sui lavoratori del petrolchimico assunti ed impiegati nel periodo 1960-1993 implica che:

- 1) si sia assunto che i lavoratori del petrolchimico abbiano le stesse preferenze medie dei lavoratori pendolari su Gela appartenenti ad altri settori di attività (istruzione, P. A., commercio, ecc.);
- 2) si sia considerato che le abitudini di pendolarismo dei lavoratori del petrolchimico siano rimaste costanti nel periodo studiato e che queste siano approssimabili dai valori censiti nel 2001.

Questa seconda assunzione ha caratteristiche di "prudenzialità". Infatti, il progresso tecnico nel settore dei trasporti ed i miglioramenti nelle reti infrastrutturali dell'intorno anche non prossimo di Gela intervenuti nel quarantennio 1960-2001 possono aver progressivamente migliorato le condizioni di accessibilità del centro, facilitando il pendolarismo ed incrementando l'ampiezza del raggio di cut-off. In tal modo, la "portata" del pendolarismo stimata nel 2001 può essere eventualmente superiore a quella che ha caratterizzato in media (ed anno per anno) il periodo studiato, con la conseguenza che l'eventuale misclassificazione dovuta alla non coincidenza temporale che si registra tra lo studio epidemiologico e l'analisi di mobilità può condurre all'inclusione nel novero dei "probabili pendolari" di soggetti che, invece, avevano più probabilmente trasferito la propria residenza su Gela. Anche in questo caso la "conservatività" dell'assunzione posta rafforzerebbe la validità della conclusione dell'indagine epidemiologica qualora questa rilevasse un incremento del rischio di salute dovuto ad esposizione residenziale.

3. IL MODELLO GRAVITAZIONALE E LA FUNZIONE DI DISTANCE DECAY

L'esigenza di individuare un raggio di cut-off per il pendolarismo su Gela suggerisce, come già indicato, di ricorrere ai modelli gravitazionali, che applicano ai fenomeni sociali ed economici la legge newtoniana secondo cui la forza di attrazione reciproca di due gravi è data dal prodotto delle loro masse diviso per il quadrato della distanza che li separa: $G_{ij} = M_i M_j / d_{ij}^2$.

Similmente, l'interazione spaziale tra due località sarebbe dunque una funzione positiva delle rispettive "masse economiche" ed inversa della loro distanza (o del costo generalizzato di trasporto, che include il costo monetario ed il tempo di percorrenza) (Fotheringham e O'Kelly, 1989)

Un schema semplice e generale è offerto dal modello gravitazionale non vincolato di Wilson (1967):

$$T_{ij} = v_i^\mu w_j^\alpha F(d_{ij}) \quad (1)$$

Dove T_{ij} è la quantità di viaggi quotidiani dalla località i alla località j ; v_i e w_j sono le "opportunità" generate dalle località di origine e di destinazione dei flussi, ossia degli indicatori di "massa economica" delle località che rappresentano fattori di propulsione (per le origini) o di attrazione (per le destinazioni) dei flussi di pendolarismo ed $F(d_{ij})$ è una funzione (non specificata nella sua forma) della distanza, il cui segno è atteso < 0 .

La $F(d_{ij})$ nel modello che precede è la *distance deterrence* o *distance decay function*, che nelle stime empiriche deve essere specificata in termini sia di argomento che di forma funzionale. Per quanto concerne la variabile più adeguata ad esprimere gli elementi di attrito spaziale, questa è generalmente espressa in termini di: costo monetario del viaggio, tempo del viaggio, distanza³. Frequentemente, considerando costo e tempo proporzionali alla distanza, quest'ultima variabile viene utilizzata nelle applicazioni del modello (Fotheringham e O'Kelly, 1989).

In linea con questa tendenza, noi utilizzeremo la distanza stradale tra le località come *proxy* del costo generalizzato di trasporto, assumendo implicitamente l'utilizzo di un unico mezzo di locomozione (l'automobile privata) o di identiche preferenze modali per i pendolari che convergono su Gela⁴.

Nella nostra applicazione, studiando il flusso di pendolarismo attratto da un'unica destinazione (Gela), l'effetto di "massa economica" delle destinazioni perde variabilità e scompare dalla funzione, che rimane definita come segue:

³ La "distanza", inoltre, può essere associata ad uno spazio fisico (come generalmente avviene) o riferita allo spazio delle dimensioni "culturale", "sociale" o "religiosa", come accade nelle ricerche con maggiormente orientamento sociale (Sen e Smith, 1995).

⁴ De Vries et al. (2004), in uno studio sul pendolarismo in Danimarca, utilizzano una funzione di costo composita che considera il costo chilometrico della distanza (approssimato dalla stessa distanza) corretto per un indicatore di costo relativo al mezzo di trasporto utilizzato.

$$T_i = A v_i^\mu F(d_i) \quad (2)$$

dove T_i è il flusso di pendolari verso Gela originato dalla località i ; A è una costante del modello che incorpora tutti gli elementi di “attrazione” della destinazione; v_i è l’indicatore di “massa economica” delle origini (approssimato dalla popolazione residente in età lavorativa); $F(d_i)$ è la funzione di “deterrenza” esercitata dalla distanza sull’intensità dei flussi.

3.1 La specificazione funzionale dell’effetto “distance decay”

In letteratura la specificazione funzionale della relazione tra distanza ed intensità dell’interazione (il flusso di pendolarismo, nel nostro caso) è stata oggetto di attento dibattito (Fotheringham e O’Kelly, 1989) e la scelta tra differenti “forme” può essere realizzata su basi sia teoriche che empiriche (Thorsen et al., 1999). Indipendentemente da questioni legate alla eterogeneità della struttura spaziale (Fotheringham, 1981; Thorsen e Gitlesen, 1998) – che in questo paper assumiamo irrilevante, data la scala relativamente ridotta degli spostamenti (Tiefelsdorf, 2003) – si può affermare che la funzione di potenza presenta lo svantaggio di sovrastimare gli spostamenti di breve-brevissima lunghezza, dato che i valori teorici stimati dal modello tendono all’infinito man mano che la variabile dipendente (la distanza) si approssima allo zero. Per questa ragione, in linea generale, si può affermare che la forma esponenziale è considerata più adatta a modellare interazioni spaziali di breve distanza (es.: spostamenti intra-urbani), mentre le funzioni di potenza appaiono maggiormente adeguate a stimare spostamenti di più lunga distanza (es.: movimenti migratori) (De Vries et al., 2004).

Nel nostro caso, considerando anche il fatto che gli spostamenti analizzati sono di carattere inter-urbano e dunque presentano portata una intermedia (né brevissima, come nel caso degli spostamenti urbani, né lunghissima, come nel caso dei flussi migratori), la scelta funzionale può essere lasciata al miglior fit dei risultati della stima.

Ovviamente, nel caso della funzione di potenza, il modello (2) assumerebbe la forma:

$$T_i = A v_i^\mu d_i^{-\beta} \quad (3)$$

mentre, nel caso di specificazione esponenziale, si avrebbe:

$$T_i = A v_i^\mu e^{-\beta d_i} \quad (4)$$

3.2 L’analisi empirica (stima della funzione di distance decay e del raggio di cut-off del pendolarismo nel caso di Gela)

Come già riferito, la stima del modello di mobilità si è basata sulle osservazioni censuarie relative alla consistenza della popolazione ed alla matrice O-D (in base comunale) degli spostamenti sistematici. In particolare:

T_i = vettore di 117 osservazioni relative flussi positivi (> 0) di spostamenti sistematici per motivo di lavoro da comuni siciliani su Gela (Censimento ISTAT 2001);

v_i = osservazioni relative alla “massa economica” delle 117 località di origine dei flussi di pendolarismo, approssimata dalla consistenza delle forze di lavoro (Censimento ISTAT 2001);

d_i = vettore della distanza chilometrica delle località di origine da Gela, definita nei termini della tratta stradale più breve per viaggi con automobile.

I modelli stimati sono la versione linearizzata delle equazioni (3) e (4):

$$\ln(T_i) = \ln(A) + \mu \ln(V_i) - \beta \ln(d_i) + u_i \quad (5)$$

$$\ln(T_i) = \ln(A) + \mu \ln(V_i) - \beta d_i + u_i \quad (6)$$

I risultati della stima sono riportati nella seguente tabella:

Tab. 1. Estimation results using OLS

Dependent Variable:	Exponential	Power
$\ln T_i$		
$\ln(A)$	0,376* (0,766)	9,312*** (0,967)
μ	0,418*** (0,088)	0,427*** (0,072)
β	-0,025*** (0,002)	-2,572*** (0,173)
R^2	0,53	0,68
$F(2,113)$	65,54***	124,43***

Standard Errors in parentheses

*** 0,1 % significant, ** 1% significant, *10% significant

I segni dei parametri sono quelli attesi ($\mu > 0$; $\beta < 0$) e il valore dell’elasticità dei flussi di pendolarismo alla massa economica delle località d’origine (il fattore di potenza μ) è molto prossimo in entrambe le stime. Nel complesso, il modello a funzione di potenza presenta un R^2 sensibilmente migliore (0,68 vs. 0,53) ed una maggiore significatività per la costante. Esso sembra dunque preferibile in base alla sua performance.

Come s’è detto precedentemente, la stima della funzione di distance decay ha l’obiettivo di affinare il modello di categorizzazione dei lavoratori (“residenti” vs. “pendolari”), individuando una

distanza-limite superata la quale appare corretto assumere che un lavoratore abbia probabilmente trasferito la sua residenza su Gela, piuttosto che “pendolare” quotidianamente.

Per individuare l’ampiezza del raggio di cut-off del pendolarismo si è in primo luogo costruito un modello “a pura distanza”, eliminando la variabile di massa e ristimando il modello di potenza. In secondo luogo, date le caratteristiche dei dati (valori interi e positivi per le osservazioni sul pendolarismo) che implicano una funzione con caratteristiche quasi asintotiche anche rispetto all’asse delle ascisse, si è fissata una soglia di “ininfluenza” del flusso di pendolarismo alla distanza, assumendo che la distanza non esercita più un’influenza significativa sul pendolarismo quando l’inclinazione della funzione, al crescere della distanza, non subisce variazioni superiori al 3%.

La tabella che segue riporta il risultato della stima:

Tab. 2. Estimation results of a ‘pure distance’ model using OLS

Dependent Variable:	Power
$\ln T_i$	
$\ln (A)$	12,711*** (0,884)
β	-2,54*** (0,197)
R^2	0,58
$F(1,114)$	165,07***

Standard Errors in parentheses

*** 0,1 % significant, ** 1% significant, *10% significant

Come si vede, con qualche perdita di significatività ($R^2 = 0,58$), la funzione mantiene lo stesso segno e pressochè lo stesso valore (-2,54) per il coefficiente β che indica l’elasticità del pendolarismo alla distanza.

Fissando al 3% il livello di variazione dell’inclinazione della funzione ritenuto “irrilevante”, il raggio di cut-off del pendolarismo risulta pari a circa 116 km.

4. UN METODO ALTERNATIVO: I “PENDOLARI EQUIVALENTI”

Attingendo alla letteratura empirica dell’economia del benessere, ed in particolare alle analisi della povertà o della distribuzione dei redditi, è possibile tracciare un metodo alternativo per la determinazione di un modello di pendolarismo “a pura distanza” che consenta una opportuna trasformazione dei dati eliminando prima della stima l’effetto di scala sul pendolarismo esercitato dalla “massa economica” della località d’origine.

4.1 Scale di equivalenza e “redditi-equivalenti”

Nelle indagini sulla povertà o nelle analisi di comparazione dei redditi le osservazioni vengono generalmente ponderate con opportuni coefficienti di equivalenza al fine di evitare che la “scala” (numerosità) del nucleo familiare infici il confronto delle condizioni di benessere che le famiglie possono godere dato il proprio reddito complessivo.

Così, ad esempio, per realizzare un confronto tra i redditi familiari delle regioni italiane, Cannari e D’Alessio (2003) utilizzano la scala di equivalenza dell’OCSE modificata “pesando” il reddito familiare dividendolo per il numero di “adulti-equivalenti” che compongono il nucleo⁵. Così facendo, l’effetto di scala del nucleo familiare viene eliminato ed i redditi di tutte le famiglie vengono modificati e resi equivalenti equivalente al reddito percepito da un nucleo composto da un unico individuo adulto. In altri termini, il “reddito-equivalente” è quel reddito ipotetico che ogni famiglia percepirebbe senza modificare il proprio benessere qualora tutte le famiglie fossero composte esclusivamente da un individuo adulto.

Una diversa “scala di equivalenza” è utilizzata dall’ISTAT per le indagini sulla povertà⁶. Si tratta della cosiddetta “scala-Carbonaro”, costruita ipotizzando che l’elasticità dei bisogni del nucleo familiare alla sua consistenza numerica sia pari a 0,66. In altri termini, la costruzione di questa scala di equivalenza implica che all’aumentare dell’1% dei componenti del nucleo familiare i bisogni dello stesso crescano dello 0,66%. La scala-Carbonaro, utilizzata per rendere equivalente alla dimensione di 2 individui ciascun nucleo familiare, è costituita dal seguente vettore: [0,60; 1; 1,33; 1,63; 1,90; 2,16; 2,40]. Ciascuno degli scalari del vettore è un “coefficiente di equivalenza” da applicarsi rispettivamente alle famiglie composte da: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 o più componenti.

I coefficienti della scala-Carbonaro sono ricavati ponendo a 0,66 l’elasticità dei bisogni della famiglia al numero dei suoi componenti:

$$\eta_{b/n} = (\Delta b/b) / (\Delta n/n) = 0,66 \quad (7)$$

($\eta_{b/n}$ = elasticità dei bisogni al numero dei componenti della famiglia; b = bisogni familiari; n = numero dei componenti del nucleo familiare).

Poiché dalla (7) si ha: $(\Delta b/b) = \eta_{b/n} (\Delta n/n) \Rightarrow \Delta b = b \eta_{b/n} (\Delta n/n)$, ne segue che, ponendo pari a 1 l’incremento dei componenti del nucleo familiare, l’aumento di bisogni legato all’incremento unitario della dimensione della famiglia risulta pari a:

$$\Delta b = b \eta_{b/n} (1/n) \quad (8)$$

⁵ In particolare, la scala di equivalenza utilizzata, “nel calcolo degli adulti equivalenti, prevede un coefficiente pari a 1 per il capofamiglia, 0,5 per gli altri componenti con 14 anni e più e 0,3 per i soggetti con meno di 14 anni” (Cannari e D’Alessio, 2003, pag. 23, n. 23)

⁶ Si veda, a titolo di esempio, ISTAT (2007).

In tal modo, definendo una scala di equivalenza: $\varepsilon = [\varepsilon_1 , \varepsilon_2 , \varepsilon_3 , \dots , \varepsilon_n]$ ed attribuendo il valore 1 al coefficiente corrispondente ad una dimensione standard per la famiglia (ad esempio: 2 componenti), è possibile calcolare, a partire da questo, il valore degli altri coefficienti della scala, applicando la formula:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} [1 + \eta_{n/s} 1/(i-1)] \quad (9)$$

La scala-Carbonaro suggerisce che il valore del coefficiente di elasticità sia pari a 0,66.

4.2 La costruzione di una scala di equivalenza per le analisi di mobilità: il concetto di “pendolari-equivalenti”

Come s'è detto, dividendo il reddito di una famiglia per il coefficiente di equivalenza corrispondente alla sua ampiezza, l'effetto di scala del nucleo familiare viene annullato e si ottiene un valore ipotetico che indica il reddito che garantirebbe allo stesso nucleo familiare un livello di benessere identico all'attuale qualora la famiglia avesse la dimensione standard imposta (1 adulto, nel caso della scala OCSE modificata; 2 componenti nel caso della scala-Carbonaro).

La stessa metodologia della scala-Carbonaro può essere implementata per eliminare l'effetto della “massa economica” sul pendolarismo, ottenendo (tramite la trasformazione dei dati per gli opportuni coefficienti di equivalenza) il numero di pendolari che ciascuna origine genererebbe verso la destinazione indicata qualora la sua “massa economica” (la consistenza delle forze di lavoro, nel nostro caso) fosse identica a quella delle altre municipalità di origine. In altri termini, la trasformazione delle osservazioni sul pendolarismo effettivo in “pendolari-equivalenti” consentirebbe di costruire condizioni di omogeneità della distribuzione della popolazione attorno alla località centrale studiata (la destinazione dei flussi di pendolari), simulando uno spazio “isotropico” sotto il profilo della popolazione.

Va ancora sottolineato il fatto che il calcolo dei pendolari-equivalenti trasforma in variabile continua le osservazioni discrete dei flussi di pendolarismo.

L'applicazione dell'equazione (9) per la stima di una scala di equivalenza funzionale alla definizione dei “pendolari-equivalenti” richiede di:

- 1) stimare di un coefficiente di elasticità del pendolarismo alla “massa economica” delle località di origine;
- 2) definire del livello di massa economica omogeneamente distribuito tra le località di origine dei flussi di pendolarismo;
- 3) calcolare i coefficienti di equivalenza (equazione (9));
- 4) dividere le osservazioni relative al flusso di pendolari per i coefficienti relativi alla dimensione del centro d'origine volta per volta considerato.

Nella nostra applicazione il coefficiente di elasticità del pendolarismo alla massa economica delle località di origine dei flussi è stato stimato nel modello di potenza (il coefficiente μ delle equazioni (3) e (5)) ed è risultato significativo e pari a 0,43.

Il livello di massa economica omogeneamente distribuita attorno a Gela è invece individuato nei termini della media delle forze di lavoro residenti nelle municipalità da cui originano flussi di pendolarismo verso Gela, pari a 9.066 unità.

In pratica, dunque, applicando all'equazione (9) una elasticità di 0,43 ed attribuendo valore unitario al coefficiente di equivalenza corrispondente al valore 9.066 per la massa economica delle località di origine, si può calcolare un vettore di coefficienti che trasforma le osservazioni sul pendolarismo indicando quanti sarebbero i pendolari su Gela da qualunque origine qualora ogni municipalità avesse la stessa quantità di forze di lavoro (9.066).

4.3 Forma funzionale del modello e risultato delle stime

Il modello generale stimato è dunque:

$$T_i^* = A F(d_i) \quad (10)$$

Dove alla funzione di distance decay ($F(d_i)$) è assegnata la forma di funzione di potenza (eq. (11)) o di S-curve (eq. (12)):

$$T_i^* = A d_i^{-\beta} \quad (11)$$

$$T_i^* = A e^{-\beta d_i} \quad (12)$$

La cui linearizzazione conduce alla stima delle seguenti funzioni:

$$\ln(T_i^*) = \ln(A) - \beta \ln(d_i) + u_i \quad (13)$$

$$\ln(T_i^*) = A + \frac{\beta}{d} + u_i \quad (14)$$

Ambedue i modelli sono stati poi utilizzati per stimare il raggio di cut-off del pendolarismo, con lo stesso metodo descritto nel paragrafo 3, con i risultati riportati nella tabella 3:

Tab. 3. Estimation results of the 'equivalent commuting' model using OLS

Dependent Variable: LnT _i *	Power Model	S-curve
Intercept	13,157**** (0,773)	-0,35** (0,16)
Coefficient (β , or β/d_i)	-2,56**** (0,173)	159,29**** (10,46)
Cut-off	117 (km)	112 (km)
R ²	0,65	0,66
F(1,115)	219,26****	359,74****

Standard Errors in parentheses

**** 0,1 % significant, *** 1% significant, **5% significant, *10% significant

I due modelli presentano valori di R² molto simili e coefficienti con segno atteso ed elevata significatività.

Il raggio di cut-off è anche molto prossimo, risultando pari a 117 km. nel caso del modello di potenza ed a 112 km. nel caso del modello S-curve.

5. APPLICAZIONE DEL MODELLO DI MOBILITA' ALLO STUDIO EPIDEMIOLOGICO SULLA COORTE DEI LAVORATORI DEL PETROLCHIMICO DI GELA

Come già riferito nel par. 1, precedenti studi sulla coorte lavorativa del petrolchimico di Gela avevano rilevato un significativo differenziale di rischio di morte per tumore ai polmoni a carico dei lavoratori probabilmente residenti a Gela rispetto ai lavoratori possibilmente pendolari su Gela.

In particolare il Rate Ratio (RR) calcolato nel confronto tra questi due gruppi era risultato pari ad 1,66 (con intervallo di confidenza al 90% pari a 1,07-2,58). Lo studio, tuttavia - per le ragioni precedentemente esposte - appare caratterizzato da una intrinseca "misclassificazione differenziale" (Pearce et al., 2007) dovuta al criterio di definizione dei gruppi che sovradimensiona il gruppo dei "probabili residenti" e sottostima la consistenza del gruppo dei "possibili pendolari".

L'applicazione dei modelli di mobilità descritti ai paragrafi 2 e 3 consente di affinare la categorizzazione dei gruppi e migliorare l'affidabilità dei risultati dell'analisi epidemiologica. In particolare, è possibile distinguere tre gruppi di lavoratori: i "probabili residenti", i "possibili trasferiti", i "possibili pendolari", raggruppando eventualmente le prime due classi in un unico gruppo denominato "probabili residenti".

I risultati attesi di tale ri-classificazione vanno nel senso della conferma di un differenziale di mortalità per tumore ai polmoni dovuto alla residenza a Gela, con un eventuale incremento del RR riferito ai gruppi "non pendolari".

5.1 La categorizzazione della residenza

Come già indicato, la definizione di un raggio di cut-off relativo al pendolarismo su Gela consente di distinguere tre gruppi di lavoratori: i “probabili residenti” (lavoratori nati nel comune di Gela); i “possibili trasferiti” (lavoratori nati in comuni distanti da Gela più del limite stimato); i “possibili pendolari” (lavoratori nati in comuni distanti da Gela meno del raggio di probabile pendolarismo). In base all’analisi di mobilità, la distanza scelta come cut-off è quella ottenuta dalla stima della funzione di potenza per il modello gravitazionale “a pura distanza”. Questa distanza risulta pari a 116 km., valore incluso nel range stimato per il modello dei “pendolari equivalenti” (112-117 km.). Raggruppando il primo ed il secondo gruppo in un’unica categoria, risultano i seguenti criteri di definizione dei gruppi di lavoratori:

- a) probabili residenti a Gela: lavoratori nati a Gela ed in comuni siciliani distanti da Gela più di 116 chilometri;
- b) possibili non residenti a Gela (pendolari): lavoratori nati in comuni siciliani distanti da Gela meno di 116 chilometri.

5.2 La popolazione di studio

L’iniziale popolazione di studio era composta dai lavoratori occupati dal 1960 (anno in cui l’impianto aveva iniziato la sua fase produttiva) al 1993 incluso. Il periodo di follow-up dello stato vitale è stato il 1960-2002. La popolazione studiata è stata poi ristretta agli uomini nati in Sicilia senza dati mancanti in relazione alla classificazione lavorativa (colletti blu, colletti bianchi).

5.3 I metodi statistici

Sono stati stimati i Rate Ratio (RR) di mortalità per il tumore al polmone, per tutti i tumori e per tutte le cause confrontando i lavoratori per categoria di residenza. Un modello di regressione di Poisson, con controllo dei RR per età, periodo di calendario e tipologia di lavoro (colletti blu, colletti bianchi, entrambi) è stato applicato utilizzando il software STATA 9.0. Gli intervalli di confidenza al 90% sono stati stimati col metodo della massima verosimiglianza.

5.4 Risultati

La tabella seguente riporta i dati descrittivi dei lavoratori per categoria di residenza:

Tab. 4

	Gela	> 116 km. from Gela	< 116 km. from Gela
N° of workers	1,685	745	3,191
Causes of deaths	n°	n°	n°
All deaths	145	82	335
Neoplasms	53	28	95
Lung cancer	20	10	24
Employment & follow-up	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)
Age at employment	26.6 (6.6)	26.5 (5.2)	26 (5.8)
Age at the end of follow-up	56.6 (10.2)	59.3 (10)	58.4 (9.6)
Latency ^a	30 (9.1)	32.7 (10.1)	32.3 (9.1)
Job	n (%)	n (%)	N (%)
Blue collar	818 (48.5)	389 (52.2)	1,548 (48.5)
White collar	512 (30.4)	222 (29.8)	991 (31.1)
Both	355 (21.1)	134 (18)	652 (20.4)

^a periodo intercorrente tra l'assunzione e la fine del follow-up (durata del follow-up)

La coorte analizzata è stata composta dunque da 5621 lavoratori.

La seguente tabella riporta le stime del RR per la mortalità dovuta a tumore al polmone secondo classificazioni differenziali della popolazione dei lavoratori. Il RR calcolato confrontando i nati a Gela con i nati in altri comuni è pari ad 1,49 (0,94-2,38), mentre l'inclusione dei “possibili trasferiti” (lavoratori nati in comuni distanti da Gela più di 116 km.) nel gruppo dei “probabili residenti” ed il “nuovo” gruppo dei “possibili pendolari” (ossia l'applicazione del nuovo criterio di categorizzazione) porta il RR al valore di 1,69 (1,07-2,65).

Tab. 5

Place of birth	RR^a lung cancer^b (90% CI)	RR^a all neoplasms^b (90% CI)	RR^a all causes^b (90% CI)
Other than Gela	1.0	1.0	1.0
Gela	1.49 (0.94-2.38)	1.11 (0.85-1.46)	0.89 (0.76-1.05)
< 116 km from Gela	1.0	1.0	1.0
Gela + > 116 km from Gela	1.69 (1.07-2.65)	1.16 (0.91-1.49)	0.92 (0.80-1.06)

^a RR aggiustato per età, periodo di calendario e tipologia di lavoro (colletti blu, colletti bianchi, entrambi)

^b Codici della International Classification of Disease IX revision: tumore al polmone = 162

L'RR risulta dunque > 1 e, con la nuova categorizzazione, varia nella direzione attesa.

Un risultato medesimo viene ottenuto valutando il RR relativo alla mortalità per tumore polmonare nei tre differenti gruppi:

Cause of death (IX ICD ^a)	Place of birth	RR ^b	90% CI
Lung cancer (162)	< 116 from Gela	1.0	-
	> 116 from Gela	1.68	(0.90-3.13)
	Gela	1.69	(1.03-2.79)

^a Codici della International Classification of Disease IX revision: tumore al polmone = 162

^b RR aggiustato per età, periodo di calendario e tipologia di lavoro (colletti blu, colletti bianchi, entrambi)

In questo caso si può notare che il gruppo dei lavoratori “possibili trasferiti” su Gela ha un RR molto maggiore di 1 e praticamente identico a quello dei lavoratori nati a Gela. Sebbene questo risultato sia poco robusto per via della bassa numerosità relativa del gruppo (e l'intervallo di confidenza al 90% sia piuttosto ampio), ciò sembra indicare che la probabilità di essersi trasferiti su Gela ha incrementato in maniera sensibile il rischio di morte per tumore al polmone.

5.5 Discussione dei risultati epidemiologici

I risultati ottenuti con la nuova categorizzazione della residenza appaiono coerenti con la nostra ipotesi sul rischio residenziale per la mortalità dovuta a tumore polmonare: l'evidenza riscontrata conferma l'esistenza di un maggior rischio associato con la residenza a Gela dovuto al più elevato inquinamento atmosferico ivi insistente.

Il risultato atteso era infatti che una miglior categorizzazione dello status residenziale avrebbe comportato una minor misclassificazione della residenza, migliorando le stime dei RR che confrontano i “probabili residenti” (i lavoratori nati a Gela o in comuni distanti da Gela più di 116 Km.) con i “possibili non residenti” o “pendolari” (i lavoratori nati in comuni distanti meno di 116 km. da Gela). Allo stesso tempo, la nostra ipotesi implicava che il rischio residenziale fosse proporzionale alla durata della residenza nel sito contaminato, ed abbiamo in effetti ottenuto un livello maggiore di rischio per il gruppo dei “probabili trasferiti” e dei lavoratori nati a Gela (che hanno nel complesso sperimentato una più lunga esposizione residenziale).

Le nostre osservazioni possono essere dovute anche a differenze nella distribuzione di altri fattori di rischio per il tumore ai polmoni tra le categorie di residenti come, ad esempio, differenze nelle abitudini al fumo. Cionondimeno, tutti i risultati osservati sono anche coerenti con la nostra ipotesi di ricerca.

I risultati ottenuti con la nuova (migliorata) categorizzazione residenziale dei lavoratori confermano e rafforzano la conclusione dello studio precedente (Pasetto et al., 2008) circa l'esistenza di un possibile eccesso di rischio residenziale/ambientale per la mortalità per tumore al polmone per i

lavoratori del petrolchimico di Gela che verosimilmente sono stati residenti a Gela per lo meno per il periodo lavorativo.

La definizione delle categorie residenziali ottenuta dall'analisi di mobilità è utile a ridurre la misclassificazione dello status residenziale per una categorizzazione qualitativa in assenza di dati individuali necessari per definire correttamente la storia residenziale di ciascun soggetto. Pertanto, la metodologia applicata in questo studio ha le potenzialità per essere replicata in altri studi di epidemiologia ambientale.

6. CONCLUSIONI

In linea con una esigenza avvertita in maniera crescente nella letteratura (Cutchin, 2006), questo paper presenta un tentativo per integrare analisi geo-economiche e studi territoriali ed epidemiologici relativi alle “aree a rischio”, ottenendo utili risultati.

In relazione al rapporto tra mobilità e perimetrazione geografica delle “aree a rischio”, questo lavoro sottolinea la necessità di attivare nella definizione delle aree un approccio più accorto, basato su procedure di “*re-scaling*”. Poiché nelle aree a rischio si verifica una interazione tra effetti spaziali e temporali sull'ambiente e la salute umana, la perimetrazione delle aree richiede l'adozione di approcci multi-scala. Inoltre, poiché “la scelta di una particolare scala può condurre a benefici più o meno ampi per i differenti attori sociali, risultando per conseguenza politicamente rilevante” (Karstens, 2007), ne consegue che tale scelta non è mai politicamente neutrale, ma assume un valore strategico (Karstens, 2007). Ad incrementare la complessità, occorre considerare che le differenti fasi della definizione geografica di un'area a rischio (fase del disegno, fase delle analisi di impatto) possono richiedere differenti scale di riferimento⁷. Infine, è necessario considerare procedure di revisione del livello di scala (*rescaling procedures*) nel definire la perimetrazione delle aree a rischio al fine di considerare la dimensione multiscalare della contaminazione industriale. Prossime ricerche dovranno tentare di chiarire opportunamente le procedure di selezione della scala e di valutazione degli effetti di scala, in particolare in relazione alla definizione dei termini in cui i risultati dovrebbero venir pesati secondo la dimensione dell'area studiata in relazione alla valutazione degli effetti cumulativi della contaminazione.

In relazione all'integrazione dell'analisi di mobilità agli studi epidemiologici, il paper propone una indagine sulle abitudini di residenzialità/pendolarismo dei lavoratori di Gela basato sui dati censuari dell'ISTAT (2001). Questa analisi è stata indirizzata all'identificazione di un raggio di cut-off, al fine di distinguere (all'interno di una coorte di 5621 lavoratori del petrolchimico di Gela), il gruppo dei “possibili pendolari” da quello dei “probabili residenti” (inclusivo, quest'ultimo dei “possibili trasferiti” su Gela).

⁷ “Le sfide più importanti per la fase della valutazione di impatto risiedono nella necessità di chiarire le interdipendenze tra impatti su scale differenti e producono informazioni rilevanti al livello appropriato di scala per i differenti attori. La scala appropriata per l'analisi di impatto può non coincidere con le scale utilizzate durante le fasi di scoping e design.” (Karstens, 2007, pag. 389).

Come già chiarito nel paper, l'applicazione dell'analisi di mobilità allo studio epidemiologico della coorte lavorativa è soggetto ad alcune assunzioni e restrizioni:

- 1) Lo studio di coorte riguarda uno specifico gruppo di lavoratori (i lavoratori del petrolchimico), mentre l'analisi di mobilità è condotta sull'intera forza di lavoro. Ciò implica l'assunzione che i lavoratori del petrolchimico abbiano lo stesso comportamento (preferenze) in termini di pendolarismo/residenzialità del complesso delle forze di lavoro occupate a Gela.
- 2) Lo studio di coorte è riferito ai lavoratori assunti ed occupati nell'impianto petrolchimico di Gela nel periodo 1960-1993, mentre l'analisi di mobilità è basata sulle osservazioni censuarie del 2001. Ciò implica l'assunzione che le abitudini (preferenze) di pendolarismo/residenzialità dei lavoratori del petrolchimico siano rimaste stabili nel trentennio considerato. Poiché l'analisi di mobilità è relativa ad un anno più recente rispetto al periodo coperto dall'indagine epidemiologica, questa assunzione assume caratteristiche di "conservatività" e "prudenzialità", visto che con ogni probabilità conduce ad una sovrastima del fenomeno del pendolarismo e ad una sottostima del numero dei lavoratori "trasferiti" (e dunque "residenti") a Gela.
- 3) L'analisi di mobilità presentata non tiene conto di eventuali differenti condizioni di accessibilità relative alla percorrenza di differenti direttrici stradali, considerando il costo generalizzato di trasporto come una funzione lineare della distanza. Sebbene sia auspicabile un miglioramento del modello di mobilità sotto questo profilo, alcune stime dell'impatto della diversa infrastrutturazione stradale (distinzione tra strade a scorrimento veloce e strade provinciali) non hanno ottenuto risultati significativi.
- 4) L'analisi di mobilità considera esclusivamente i flussi positivi di pendolarismo provenienti da municipalità di origine differenti da Gela e non prende in considerazione i comuni siciliani dai quali non si registra flusso di pendolari. Sarà opportuno stimare un modello più completo di mobilità, che includa tutti i comuni dell'isola.

Vale la pena di sottolineare il fatto che il risultato della stima relativa al raggio di portata del pendolarismo su Gela (cut-off = 116 km.) è risultata confermata da un'analisi qualitativa (focus group) condotta sul campo dal sociologo Pietro Saitta per l'Organizzazione Mondiale della Sanità.

In conclusione, l'applicazione dell'analisi di mobilità allo studio di coorte ha sicuramente migliorato la categorizzazione dei lavoratori in relazione alla loro residenzialità/mobilità, confermando e rafforzando le conclusioni di un precedente studio (Pasetto et al., 2008) che aveva già evidenziato l'esistenza di un possibile effetto di residenzialità sul rischio di morte per tumore ai polmoni nella città di Gela. Sotto il profilo metodologico, in assenza dei dati individuali necessari per una corretta individuazione delle caratteristiche di residenzialità dei lavoratori, la definizione delle categorie residenziali ottenuta tramite l'analisi di mobilità rappresenta sicuramente un utile strumento per ridurre la miclassificazione dello status residenziale in una categorizzazione qualitativa. Per conseguenza, la metodologia applicata in questo studio ha il potenziale per essere utilizzata in altri studi di epidemiologia ambientale.

7 Bibliografia

- Cannari L., D'Alessio G., 2003, La distribuzione del reddito e della ricchezza nelle regioni italiane, Banca d'Italia, *Temi di discussione*, n. 482, Giugno.
- Checkoway, H., N. Pearce, D. Kriebel, 2004, *Research methods in occupational epidemiology*, Oxford University press, New York.
- Cutchin M. P., 2007, "The need for the 'new health geography' in epidemiologic studies of environment and health", *Health & Place*, 13, pp. 725-742.
- Cutter S.L., 1995, "Race, Class, and Environmental Justice", *Progress in Human Geography* 19, 1, pp. 111-22.
- De Vries, J. J., P. Nijkamp and P. Rietveld, 2004, "Exponential or power distance-decay for commuting? An alternative specification", *Tinbergen Institute Discussion Paper* 097/3, available at <http://www.tinbergen.nl>.
- Fotheringham, A. S. and M. E. O'Kelly, 1989, *Spatial Interaction Models: Formulations and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Fotheringham, A. S., 1981, "Spatial structure and distance-decay parameters", *Annals of the Association of American Geographers*, 71, 3, pp. 425-336.
- Istat, 2001, *Censimento Generale della Popolazione*, Roma.
- Istat, 2007, "La povertà relativa in Italia", *Statistiche in breve – famiglia e società*, 4 Ottobre.
- Meade M.S., R.J. Earickson, 2000, *Medical geography*. New York: Guilford Press.
- Most M.T., R. Sengupta, M.A. Burgener, 2004, "Spatial Scale and Population Assignment Choices in Environmental Justice Analyses", *The Professional Geographer*, 56, 4, pp. 574-586.
- Pasetto, R., A. Biggeri, P. Comba and R. Pirastu, 2007, "[Mortality in the cohort of workers of the petrochemical plant in Gela (Sicily) 1960-2002]", *Epidemiologia e Prevenzione*, 31, pp. 39-45. [In Italian]
- Pasetto, R., P. Comba and R. Pirastu, 2008, "Lung cancer mortality in a cohort of workers in a petrochemical plant: occupational or residential risk?", *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 14, pp. 124-128.
- Pearce, N., H. Checkoway and D. Kriebel, 2007, "Bias in occupational studies", *Occupational and Environmental Medicine*, 64, pp. 562-568.
- Terracini B., 2005, *Aree oggetto di bonifica: inquadramento teorico e metodologico*. Rapporti ISTISAN 05/1, pp. 53-61.
- Thorsen, I., J. Uboe and G. Naevdal, 1999, "A network approach to commuting", *Journal of Regional Science*, 39, 1, pp. 73-101.
- Tiefelsdorf M., 2003, "Misspecifications in interaction model distance decay relations: A spatial structure effect", *Journal of Geographical Systems*, 5, pp. 25-50.
- Wilson, A. G., 1967, "A statistical theory of spatial distribution models", *Transportation Research*, 1, pp. 253-269.