

# **I rendimenti di scala nel settore della gestione dei rifiuti solidi urbani**

FINAL REPORT Fondazione AMGA, January 2019

Graziano Abrate (Università del Piemonte Orientale, Hermes)

Clementina Bruno (Università del Piemonte Orientale, Hermes)

Fabrizio Erbetta (Università del Piemonte Orientale, Hermes)

Giovanni Fraquelli (Università del Piemonte Orientale, Hermes)

Dipartimento di Studi per l'Economia e l'Impresa – Università del Piemonte Orientale, Novara.

Centro di Ricerche HERMES (Higher Education and Research on Mobility Regulation and the Economics of Local Services), Moncalieri, Torino.

## Sommario

EXECUTIVE SUMMARY.....	3
1. MODELLO TEORICO ED ECONOMIE DI SCALA .....	6
2. SURVEY DELLA LETTERATURA.....	9
3. IL CAMPIONE UTILIZZATO.....	25
4. LE VARIABILI DI OUTPUT E DI INPUT .....	28
5. IL MODELLO EMPIRICO RELATIVO ALLA STIMA DELLE ECONOMIE DI SCALA .....	33
6. RISULTATI.....	35
7. CONCLUSIONI .....	40
APPENDICE.....	42
BIBLIOGRAFIA .....	43

Questo rapporto di ricerca è stato commissionato al Centro di Ricerca HERMES dalla Fondazione AMGA con l'obiettivo di indagare le caratteristiche di costo nel settore dei servizi di gestione dei rifiuti solidi urbani. In particolare, l'indagine è volta a verificare la presenza di economie di scala, al fine di valutare l'opportunità di politiche di aggregazione (o eventualmente di disaggregazione) nella gestione del servizio. I quesiti a cui rispondere sono i seguenti.

- Si possono ottenere risparmi di costo affidando il servizio di raccolta e smaltimento ad un'unica impresa su più territori comunali, ad es. attraverso scelte consortili dei comuni affidanti? Oppure è più efficiente avere diverse imprese operanti su tali territori?
- E' possibile identificare una dimensione minima efficiente?
- Come incidono sui costi le condizioni ambientali del bacino di riferimento, quali ad es. la densità abitativa o la raccolta differenziata?

Partendo dall'esame della letteratura esistente, il presente rapporto si concentra su una decina tra i più recenti contributi internazionali dal 2000 ad oggi e identifica innanzitutto le problematiche relative alla definizione degli output del servizio e l'eterogeneità degli approcci metodologici. Se la letteratura è pressoché univoca nell'identificare la quantità di rifiuti gestiti come la misura di output principale del servizio, alcuni autori pongono l'enfasi sulla distinzione tra rifiuti indifferenziati e differenziati e sull'impatto sui costi del miglioramento dei target ambientali; altri evidenziano il ruolo della rete servita, misurata in termini di chilometri del percorso di raccolta piuttosto che in termini di superficie servita; altri ancora si soffermano sugli utenti e sulla loro densità nel territorio servito. A fronte di una varietà di approcci seguiti corrisponde anche una molteplicità di evidenze empiriche, talvolta non facilmente conciliabili tra loro. **In sintesi, dall'esame della precedente letteratura, non emerge un supporto univoco all'ipotesi di presenza di economie di scala. La maggior parte degli studi concorda comunque con la presenza di economie di scala per le imprese più piccole, pur divergendo nella definizione della soglia dimensionale minima efficiente.**

L'analisi empirica presentata in questo studio è stata effettuata su un panel non bilanciato composto da 86 imprese osservato nel periodo tra il 2008 ed il 2016, per un totale di 671 osservazioni annuali. Il campione è ampiamente rappresentativo del contesto italiano (copertura della popolazione totale pari a 1/3), anche tenendo conto della localizzazione geografica delle imprese (sono rappresentate 16 regioni su 20). **Il periodo analizzato è particolarmente interessante perché caratterizzato da una forte crescita della percentuale di raccolta differenziata su tutto il territorio italiano** (nel campione analizzato, tale dato passa dal 40 per cento

nel 2008 al 58 per cento nel 2016). La base dati risulta utile anche per indagare le eventuali ripercussioni in termini di costo e scala ottimale di tale crescita, spesso legata alla diffusione di modalità di raccolta di tipo porta a porta.

Il modello teorico di riferimento è quello della funzione di costo. In particolare, è stata definita una funzione di costo di lungo periodo e multi-output. Nello specifico, le determinanti dei costi sono rappresentate da 4 misure di output (quantità di rifiuti indifferenziati, quantità di rifiuti differenziata, abitanti serviti e superficie servita) ed i prezzi di 3 fattori produttivi (lavoro, capitale e carburante). L'analisi econometrica si è basata sulla stima una funzione di costo translogaritmica mediante il metodo SUR (Seemingly Unrelated Regression). Il vantaggio di tale forma funzionale, largamente utilizzata in letteratura, è quello della flessibilità. In particolare, **il modello consente di stimare rendimenti di scala e di densità specifici per ogni osservazione del campione e per ogni combinazione di output ipotizzata.**

I principali risultati dello studio possono essere riassunti come segue.

- **Vi è evidenza di significative economie di scala in corrispondenza del punto medio del campione, ascrivibile ad un'impresa che serve 114.250 abitanti su una superficie di 316 chilometri quadrati, con una produzione di rifiuti pro-capite di circa 0,5 tonnellate e una percentuale di raccolta differenziata pari a circa il 46%. In tale punto, le economie di scala sono pari a 1,104.** Tale valore implica che un'espansione equi-proporzionale degli output (volumi raccolti e abitanti) e della superficie del 10 per cento genera un incremento dei costi meno che proporzionale, pari allo 9,1 per cento.
- **La dimensione minima efficiente si raggiunge in corrispondenza di circa 200.000 abitanti serviti, corrispondenti in termini di volumi a circa 100.000 tonnellate di rifiuti complessivamente raccolti. A partire da questi livelli di output e fino ai 900.000 abitanti serviti, i rendimenti di scala si mantengono costanti.** Si evidenzia dunque un range di output piuttosto ampio nel quale, per un'impresa con caratteristiche medie in termini di percentuale di raccolta differenziata, produzione di rifiuti pro-capite e densità abitativa, la dimensione operativa può considerarsi ottimale.
- **Emergono diseconomie di scala significative per imprese con oltre i 900.000 abitanti serviti. Anche l'analisi delle stime impresa per impresa indica la presenza di alcune osservazioni nel campione significativamente oltre la scala ottimale: si tratta di un totale di 60 casi su 671.** Questo segnala la difficoltà ad operare in territori particolarmente ampi e indica che oltre ad un certo livello non risulta conveniente accorpare diverse gestioni. Un discorso più delicato riguarda i comuni metropolitani,

caratterizzati da un bacino naturale superiore rispetto alla soglia identificata, nei quali potrebbe anche essere valutata la suddivisione del servizio su più operatori.

- **Lo studio mette in luce il ruolo critico del fattore di densità abitativa. Le economie di densità sono generalmente inferiori rispetto alle economie di scala. Ciò è spiegabile dall'effetto di congestione che si viene a creare in corrispondenza a situazioni territoriali caratterizzate da maggiore densità.** Si può affermare che, nel contesto italiano caratterizzato da elevati tassi di urbanizzazione, le difficoltà operative legate alla congestione spesso prevalgono rispetto ai possibili vantaggi tradizionalmente ascrivibili alla densità degli utenti nei servizi a rete. In particolare, gli svantaggi iniziano a prevalere quando la densità è pari a 1.000 o più abitanti per chilometro quadrato, situazione che caratterizza la maggioranza dei comuni italiani con più di 100.000 abitanti.
- **Il diverso livello percentuale di raccolta differenziata non incide in misura rilevante sulla presenza o meno di economie di scala, ma incide positivamente sulla presenza di economie di densità.** Questo risultato è molto probabilmente legato all'adozione di sistemi di raccolta più capillari che, più di altri, beneficiano di contesti caratterizzati da maggiori densità abitativa.

## 1. MODELLO TEORICO ED ECONOMIE DI SCALA

Un obiettivo fondamentale è rappresentato dall'analisi della struttura di costo di un settore alla luce della teoria economica. In particolare, un punto centrale è connesso alla modellizzazione di una funzione di costo per l'esame delle economie/diseconomie di scala. Tale analisi riveste un'importanza particolare, data la possibilità da parte del regolatore o del policymaker di intervenire nella configurazione del settore.

Qualsiasi processo produttivo può essere visto come una funzione di trasformazione di un vettore di input ( $x$ ) in un vettore di output ( $y$ ) rappresentato dalla funzione:

$$f(x,y) = 0 \quad [1]$$

Per le imprese di gestione ambientale è ragionevole assumere che il vettore di output sia determinato esogenamente, dal momento che esse devono fornire i loro servizi a tutti i residenti sul territorio amministrato e questi ultimi sono vincolati a conferire i rifiuti secondo le modalità organizzative del servizio definite dall'impresa sulla base delle decisioni politiche assunte dalle amministrazioni locali.

Questo implica che, in ultima istanza, la decisione che le imprese devono affrontare riguarda la minimizzazione dei costi di lungo periodo (orizzonte temporale nell'ambito del quale tutti i fattori produttivi sono considerabili come variabili), dato il livello di output offerto. Si osserva, pertanto, come in tale processo di minimizzazione di lungo periodo è inclusa l'ottimizzazione nell'uso del fattore capitale, tipicamente adattabile solo con riferimento al framework temporale indicato.

Formalmente, i livelli ottimali di input ( $x_i^*$ ), dato il livello di output ( $\bar{y}$ ) possono essere ricavati attraverso la soluzione del seguente problema di ottimizzazione:

$$\begin{aligned} \min_{x_i \geq 0} \sum_i w_i p_i & \quad [2] \\ \text{s. t. } f(\bar{y}, x) = 0 & \end{aligned}$$

in cui i valori  $p_i$  sono i prezzi unitari dei fattori produttivi considerati come esogeni.

La soluzione di questo problema di ottimizzazione, definito dalle quantità  $x_i^*$ , conduce alla funzione di costo di lungo periodo dell'impresa, denotata come:

$$C_{LR}(y, p) = \sum_i p_i x_i^*(y, p) \quad [3]$$

Data la funzione di costo rappresentata nell'equazione [3], dove  $y$  rappresenta un vettore di output e  $p$  rappresenta un vettore di prezzi, il Lemma di Shephard (Diewert, 1974) consente la derivazione delle quantità ottimali dei fattori produttivi ( $x_i^*$ ), come segue:

$$x_i^* = \frac{\partial C_{LR}}{\partial p_i} \quad [4]$$

Le proprietà che tale funzione di costo devono rispettare sono le seguenti:

- 1) I costi devono essere non negativi e non decrescenti rispetto agli output e ai prezzi dei fattori;
- 2) I costi devono essere omogenei di grado 1 e concavi rispetto ai prezzi dei fattori. Ciò implica che un incremento equi-proporzionale dei prezzi degli input risulta in un incremento nella stessa proporzione dei costi totali. Inoltre, un aumento del prezzo del singolo input  $i$ -esimo ( $\Delta p_i$ ) genera un incremento di costo che non può mai essere superiore a  $x_i \Delta p_i$  (dove  $x_i$  rappresenta il livello di input utilizzato prima dell'aumento di prezzo), dal momento che le imprese hanno la possibilità di sostituire tra loro i fattori produttivi.

Una volta stimata la funzione di costo, le economie di scala di lungo periodo ( $ES_{LR}$ ) possono essere misurate come segue:

$$ES_{LR} = \frac{1}{\sum_r \varepsilon_{y_r}} \quad [5]$$

dove il coefficiente  $\varepsilon_r$  rappresenta l'elasticità del costo rispetto all'output  $r$ -esimo, ovvero  $\varepsilon_r = (dC_{LR}/C_{LR})/(dy_r/y_r)$ .

Valori di  $ES_{LR} > 1$  indicano la presenza di economie di scala, valori di  $ES_{LR} = 1$  indicano la presenza di rendimenti costanti mentre valori di  $ES_{LR} < 1$  indicano la presenza di diseconomie di scala.

Al fine di fornire una interpretazione del coefficiente di economia di scala, riarrangiando l'espressione dell'elasticità, ed assumendo che i processi produttivi siano caratterizzati dalla presenza di un solo output, si ottiene  $1/\varepsilon_y = (C_{LR}/y_r)/(dC_{LR}/dy_r) = AC/MC$  (dove  $AC$  indica l'*average cost* mentre  $MC$  indica il *marginal cost*)

Come evidenziato con l'ausilio della Figura 1, la presenza di economie di scala è associata ad un costo marginale inferiore al costo medio in corrispondenza alla produzione corrente (e quindi ad un costo medio decrescente). Ciò significa che c'è convenienza ad espandere la produzione dal momento che il costo dell'unità marginale di output ha un costo inferiore al costo medio delle unità attualmente prodotte. Viceversa, la presenza di rendimenti di scala costanti e di diseconomie di scala sono associate al fatto che  $MC$  sia uguale o superiore a  $AC$  rispettivamente (e quindi ad un costo medio crescente).

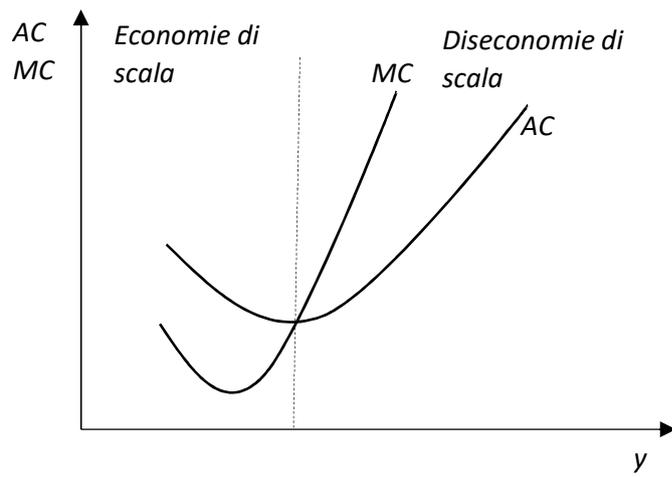


Figura. 1. Rapporto tra costo medio (AC) e costo marginale (MC)

## 2. SURVEY DELLA LETTERATURA

Nell'ambito della letteratura scientifica, il tema della raccolta e della gestione dei rifiuti è da molto tempo discusso, anche se la sua importanza è cresciuta in modo esponenziale in tempi relativamente recenti, con l'emergere prorompente del dibattito pubblico e mediatico relativo alle problematiche ambientali legate al servizio.

**Simões e Marques (2010)** propongono un'ampia analisi bibliografica della letteratura economica (accademica) relativa al settore "rifiuti". Anche se il contributo scientifico più "datato" che compare tra le loro citazioni è quello di Morse (1908), gli autori collocano l'inizio dell'attività accademica relativa all'analisi economica del settore "rifiuti" alla metà degli anni Sessanta, con il contributo di Hirsh (1965), che studia i costi del servizio di raccolta in 24 comuni statunitensi dell'area di St. Louis, in USA (peraltro, non riscontrando evidenze significative in relazione alla presenza di economie di scala). Per i decenni successivi, gli autori riscontrano un incremento della produzione scientifica, segnalando per l'ultimo decennio (rispetto alla data del loro contributo) il massimo numero di studi. In relazione alle tematiche trattate, anche se spesso i lavori analizzati presentano obiettivi di ricerca che ricadono in più di una categoria, vengono segnalati alcuni filoni principali: *ownership* (impatto della gestione pubblica o privata), ruolo degli incentivi, analisi di *benchmarking*, e *market structure*. Quest'ultima categoria è la più rilevante ai fini dell'analisi che qui viene proposta, in quanto include le tematiche della valutazione delle economie di scala e densità, oggetto di questo lavoro. In pochi casi, gli stessi lavori considerano anche l'analisi delle economie di scopo. Nell'ambito dei lavori analizzati in Simões e Marques (2010), i primi studi (risalenti agli anni Settanta) tendono a non evidenziare la presenza di economie di scala, riscontrando in alcuni casi anche diseconomie. Complessivamente, dall'insieme della letteratura studiata, gli autori identificano una scala ottimale per il servizio di raccolta rifiuti tra i 10.000 e i 50.000 abitanti. Dimensioni maggiori, sempre in termini di abitanti, caratterizzano le scale efficienti relative ai servizi di smaltimento (300.000 abitanti) e riciclaggio (80.000 abitanti). Inoltre, gli autori evidenziano un certo consenso rispetto alla presenza di economie di densità.

Qui di seguito si propone un'analisi dettagliata di una serie di contributi empirici selezionati in relazione alla loro rilevanza nell'ambito della letteratura di settore e all'importanza e all'originalità dei risultati proposti. Si tratta di contributi recenti, in quanto pubblicati dopo il 2000 (alcuni di essi rientrano tra i lavori citati nella menzionata survey di Simões e Marques, 2010). Per ciascun lavoro si analizzano il campione, il periodo di riferimento dei dati, l'approccio utilizzato per la stima, i principali risultati relativi alla presenza di economie di scala e di densità, oltre ad eventuali altri risultati rilevanti.

Il primo lavoro che si intende considerare è il contributo di **Callan e Thomas (2001)**. Gli autori si basano su un campione di 110 comuni del Massachusetts, osservati per l'anno 1996/1997 e propongono la stima di un sistema di due equazioni finalizzato a tenere conto della natura multi-output del servizio. Le due equazioni sono sostanzialmente due funzioni di costo, per l'attività di smaltimento ("*disposal*") e per l'attività di riciclaggio ("*recycling*"). L'approccio econometrico è basato sulla stima di un modello SUR (seemingly unrelated regressions, Zellner, 1962). Complessivamente, il modello è in grado di considerare le due attività come distinte ma correlate, e permette la stima di economie di scala specifiche per ciascuno dei due output. Esso permette anche la valutazione della presenza di economie di scopo (potenziali riduzioni di costo totale derivanti dalla produzione congiunta di più servizi) e *cost complementarities* (potenziali riduzioni nel costo marginale di un servizio indotte dalla produzione dell'altro servizio), in quanto ciascuna delle due funzioni di costo include tra i regressori, oltre alla variabile relativa al proprio output, anche quella relativa all'altro servizio e, soprattutto, l'interazione tra le due. Infine, la presenza di una variabile di densità abitativa (case mono-familiari per miglio quadrato) è utilizzata per la valutazione di economie di densità. I risultati evidenziano che l'elasticità del costo rispetto all'output non è statisticamente diversa da uno (quindi i rendimenti di scala sono costanti) nella funzione relativa all'attività "*disposal*", mentre esistono economie di densità. Al contrario, nell'ambito dell'equazione "*recycling*" le economie di scala sono presenti e significative, mentre le economie di densità non lo sono. Infine, si riscontrano economie di scopo tra le due attività pari circa al 5%. Rispetto alle variabili aggiuntive utilizzate, la frequenza nella raccolta agisce aumentando i costi in entrambi i segmenti, mentre la presenza di una discarica genera risparmi in relazione allo smaltimento.

*Smaltimento:  
rendimenti di scala  
costanti ed economie di  
densità*

*Riciclaggio: presenza di  
economie di scala (ma  
non di densità)*

**Antonioli e Filippini (2002)** verificano la presenza di economie di scala e densità su un campione di imprese italiane osservate nel periodo 1991-1995. Gli autori si basano sulla stima di una funzione di costo totale e una funzione di costo variabile. La scelta di ricorrere a entrambi gli approcci è legata al fatto che la funzione di costo totale implica la forte assunzione che tutte le imprese del campione stiano operando in equilibrio statico, ossia stiano utilizzando tutti gli input al livello ottimale. Secondo gli autori, tale assunzione potrebbe non riflettere adeguatamente la reale situazione degli operatori, che potrebbero non poter agire istantaneamente in relazione all'ottimizzazione del fattore capitale. La funzione di costo variabile, che include il livello di stock di capitale tra le variabili indipendenti, rilassa tale assunzione. Tuttavia essa presenta lo svantaggio "pratico" di accentuare eventuali problemi di multicollinearità nella stima empirica, in quanto il fattore capitale è spesso fortemente correlato all'output.

*Le economie di densità prevalgono, soprattutto per le imprese di piccole dimensioni*

*Economie di scala per le imprese piccole e medie, diseconomie per imprese grandi*

*Lunghezza ottimale del network: circa 400 km*

La forma funzionale scelta dagli autori è la translog, e nel modello empirico viene utilizzato un solo output, la quantità complessiva di rifiuti raccolti, affiancato da una variabile relativa alla rete, rappresentata dalla lunghezza dell'itinerario di raccolta. Gli input considerati sono il lavoro, l'energia e il capitale. Nella funzione di costo totale, chiaramente, sono i prezzi di tali input ad entrare come regressori, mentre la funzione di costo variabile utilizza direttamente il livello dello stock di capitale (numero di automezzi). Ulteriori variabili binarie sono introdotte al fine di controllare per la gestione della fase "disposal", l'esternalizzazione dell'attività di trattamento e l'alta frequenza nella raccolta. Nell'ambito della stima, i coefficienti di tutte le variabili rilevanti sono altamente significativi e

presentano il segno atteso (si noti che il prezzo del carburante – energia – non viene incluso perché identico per tutte le imprese) con l'eccezione della variabile relativa al capitale nella funzione di costo variabile, il cui coefficiente risulta positivo. Tale problematica, probabilmente legata alla già menzionata questione relativa alla multicollinearità, rende meno affidabili i risultati in termini di economie di scala e densità basati sulla funzione di costo variabile.

In ogni caso, la presenza di economie di densità (risparmi di costo associati alla raccolta di quantità maggiori di rifiuti a parità di "rete") tende a prevalere, sulla base di entrambi i modelli (*variable* e *total cost function*) e assume valori maggiori per le imprese di piccole dimensioni. Tale risultato viene interpretato come evidenza a favore della gestione del servizio su base monopolistica. Economie di scala sono presenti per le imprese piccole e medie (alla mediana campionaria, in corrispondenza di circa 39.400 tonnellate raccolte, si riscontrano economie di scala), mentre diseconomie emergono solo per le imprese di dimensioni maggiori, suggerendo l'opportunità di fusioni tra operatori operanti in aree piccole. La lunghezza ottimale del network, valutata sulla base della funzione di costo totale è approssimativamente 400 km. Tra le variabili di controllo, particolarmente interessante è l'impatto della frequenza di raccolta, in quanto un'alta frequenza (superiore a tre volte a settimana) presenta un forte impatto a incremento dei costi (sia totali, sia variabili).

**Byrnes et al. (2002)** utilizzano su un campione di 158 enti locali (*councils*) australiani, osservati per un periodo di 5 anni (1995/1996 – 1999/2000), con focus sul servizio di raccolta di rifiuti domestici (completamente indifferenziata, sulla base della descrizione dell'attività). L'approccio empirico si basa sulla stima di una funzione di costo medio di lungo termine. Conseguentemente, la variabile dipendente del modello econometrico è il costo medio per bidone gestito (generalmente si tratta di contenitori da 120 o 240 litri, raccolti porta a porta, tranne nel caso dei condomini, dove è presente un solo grande contenitore), mentre l'output considerato è il numero dei contenitori stessi (la variabile viene considerata sia in termini lineari, sia

al quadrato). Le ulteriori variabili considerate riguardano il reddito medio dei residenti, un indice dei prezzi relativo alle spese statali e degli enti locali, la popolazione residente e la densità dei bidoni. Gli autori si

*Economie di scala per ogni livello di output sull'intero campione*

*Sottocampione enti "metropolitani": scala ottimale a 150.000 contenitori*

*Sottocampione enti "rurali e regionali: scala ottimale a 11.500 contenitori*

*Il costo medio aumenta all'aumentare della popolazione, a parità di contenitori*

basano sia su regressioni OLS, sia su un modello più avanzato (Kmenta's maximum likelihood) resosi necessario per l'emergere di problemi di correlazione seriale e di eteroschedasticità. In entrambi i casi, comunque, dalle stime emerge una relazione sostanzialmente lineare (negativa) tra output e costo medio, suggerendo la presenza di economie di scala per qualunque livello di output; infatti, il coefficiente della variabile di output di primo ordine è negativo e significativo, mentre il coefficiente di secondo ordine manca di significatività statistica. Rispetto alle variabili aggiuntive, esse presentano tutte impatto positivo (incrementativo del

costo medio) e statisticamente significativo. In particolare, gli autori discutono l'effetto della variabile "popolazione", che induce un aumento di costo medio a parità di bidoni gestiti (la maggiore quantità di rifiuti potrebbe rendere necessari più viaggi, o un maggiore numero di automezzi, o ancora maggiori rifiuti nei contenitori pubblici o commerciali, non contabilizzati come output).

Infine, gli autori ripetono la stima per due sotto-campioni, separando gli enti locali tra "metropolitani" e "rurali e regionali". In questi casi, la relazione tra numero di bidoni gestiti e costo medio sembra presentare una forma a "U", con significatività statistica del termine di secondo ordine (positivo). Tale relazione permette l'individuazione della scala efficiente, che risulta essere molto diversa tra i due sotto-campioni. Infatti, essa viene determinata in circa 150.000 bidoni per gli enti "metropolitani" e circa 11.500 bidoni per gli enti "rurali e regionali". Gli autori tuttavia riconoscono la minore affidabilità della stima associata a quest'ultimo gruppo, segnalata dal valore relativamente basso (0.24) dell'R-quadro. Gli autori sottolineano che, nonostante l'evidenza empirica suggerisca la presenza di economie di scala, una strategia di fusione tra enti locali non rappresenta necessariamente la migliore opportunità, anche in considerazione del ruolo della popolazione, che agisce aumentando i costi, e del fatto che la gestione dei rifiuti rappresenta solo uno dei molteplici servizi erogati dagli enti locali analizzati.

**Bohm et al. (2010)** si basano sulla stima di due funzioni di costo totale relative ai settori di raccolta e smaltimento di rifiuti generici e di raccolta porta a porta e riciclaggio di materiali riciclabili (modello SUR – Zellner, 1962, usando generalized least squares - GLS). Il campione di riferimento è costituito da 428 comuni statunitensi di diversa dimensione. Gli autori stimano sia una versione di base del modello, in cui le equazioni vedono come regressori solo le quantità (termine lineare e quadrato) di rifiuti raccolti e smaltiti o riciclati. In aggiunta, gli autori stimano un modello arricchito dei prezzi dei fattori (lavoro, capitale, carburante in

entrambe le equazioni. Costo dello smaltimento presente solo nella funzione relativa ai rifiuti indifferenziati) e di una serie di variabili di controllo.

La valutazione dei vantaggi derivanti dalla scala produttiva è svolta con riferimento al modello base. Si riscontrano economie di scala, ossia costi marginali e medi costantemente decrescenti, su tutto il campione per la funzione di costo relativa alla gestione dei rifiuti indifferenziati (da 40 a 1.389.000 tonnellate). In relazione all'altra funzione, relativa alla gestione dei materiali riciclabili, invece si riscontra un andamento a "U" delle funzioni di costo marginale e medio. In particolare, il costo medio presenta il suo punto di minimo (e quindi la scala produttiva è quella ottimale) in corrispondenza di una gestione di 13.200 tonnellate, corrispondenti a circa 80.000 abitanti. In relazione al modello arricchito con variabili aggiuntive, nella funzione di costo relativa alla raccolta e smaltimento di rifiuti generici, tra le variabili di controllo risulta avere effetto significativo la densità della popolazione, con impatto positivo sui costi totali. Nella funzione di costo relativa alla componente riciclabile, invece, si riscontra un impatto significativo il tasso di partecipazione delle famiglie (che genera un aumento dei costi totali), il fatto di separare i rifiuti riciclabili in un'apposita struttura centralizzata (riduzione dei costi totali), e il fatto che l'attività di raccolta sia effettuata da dipendenti comunali o data in outsourcing (la prima opzione è la più costosa).

*Rifiuti indifferenziati:  
economie di scala su  
tutto il campione*

*Rifiuti riciclabili: scala  
ottima in  
corrispondenza di  
13.200 tonnellate  
(80.000 abitanti)*

**Bel e Fageda (2010)** stimano una funzione di costo totale relativo al servizio rifiuti su un campione di 65 comuni spagnoli locati nella regione della Galizia. L'anno di riferimento è il 2005. Quella che gli autori propongono è una funzione di tipo Cobb-Douglas, stimata con approccio OLS. Come unico output si considera la quantità di rifiuti raccolti, mentre dal punto di vista dei prezzi dei fattori della produzione, gli autori inseriscono il salario medio per dipendente a livello provinciale. Si considerano inoltre altre variabili, quali la percentuale di rifiuti differenziati raccolti (non distinti per materiale), la frequenza settimanale di raccolta, un indice relativo all'attività turistica nell'ambito del comune, una variabile dummy che cattura la presenza di un inceneritore nell'ambito del distretto comunale e, infine, un'altra dummy volta ad isolare l'effetto dell'affidamento del servizio ad un'impresa privata (rispetto alla gestione diretta o attraverso un'impresa municipalizzata). Regressioni distinte vengono proposte per l'intero campione o per un campione ristretto che include i 60 comuni del campione con meno di 50.000 abitanti. Solo per questi ultimi, infatti, l'informazione relativa alla percentuale di differenziata è disponibile. In entrambe le regressioni, il coefficiente relativo alla variabile di output (in logaritmo) è positivo e inferiore a uno, suggerendo la presenza di economie di scala. Tuttavia tali economie sono statisticamente significative solo nell'ambito della

*Economie di scala  
statisticamente  
significative solo nel  
sotto-campione di  
comuni sotto i 50.000  
abitanti*

di un inceneritore nell'ambito del distretto comunale e, infine, un'altra dummy volta ad isolare l'effetto dell'affidamento del servizio ad un'impresa privata (rispetto alla gestione diretta o attraverso un'impresa municipalizzata). Regressioni distinte vengono proposte per l'intero campione o per un campione ristretto che include i 60 comuni del campione con meno di 50.000 abitanti. Solo per questi ultimi, infatti,

regressione relativa al sotto-campione di comuni di dimensione inferiore ai 50.000 (in questo caso, calcolando l'inverso del coefficiente della variabile di output, è possibile determinare economie di scala pari a 1.176). Gli autori interpretano questo risultato come evidenza a favore dell'opportunità di cooperazione tra comuni, allo scopo di aggregare la gestione del servizio. Sempre con riferimento alla regressione relativa al campione ristretto, si riscontra che la percentuale di raccolta differenziata non ha un effetto statisticamente significativo (ossia non genera incrementi di costo). Inoltre, in entrambe le regressioni (sia sull'intero campione che su quello ridotto) la frequenza della raccolta e la presenza di attività turistiche incrementano i costi, mentre la presenza di un inceneritore li riduce. Infine, la gestione privata ha un impatto debolmente significativo (al 10%) nella regressione relativa al campione intero, e presenta segno positivo (incremento di costi).

**Simões et al. (2010)** non indagano direttamente le questioni di dimensione e densità, ma propongono un'analisi di efficienza con un approccio di frontiera basato sul metodo non parametrico della Data Envelopment Analysis (DEA), usando un campione di 29 imprese portoghesi operanti nel segmento "wholesale" della gestione dei rifiuti (anno di riferimento: 2007). Oltre alla valutazione dell'efficienza, gli autori propongono un'analisi di secondo stadio, svolta attraverso una regressione troncata, dell'impatto di potenziali determinanti dell'efficienza stessa. In entrambi gli stadi si ricorre al bootstrapping, un metodo statistico basato sul ricampionamento, per migliorare l'affidabilità delle stime. Nell'ambito dell'analisi di primo stadio (DEA), si utilizzano come output le quantità di rifiuti trattati e riciclati, mentre come input si utilizzano i costi operativi e i costi di capitale. Dall'analisi DEA emerge un'efficienza complessiva pari, in media, al 65,8% in ipotesi di rendimenti di scala costanti: ipotizzando che le imprese possano recuperare la loro inefficienza operativa e collocarsi sulla scala produttiva ottimale, il risparmio di input sarebbe mediamente del 34,2%. Con l'ipotesi di rendimenti di scala variabili si assume invece che le imprese possano agire solo sull'inefficienza operativa, ma non sulla loro dimensione. In questo caso, gli autori stimano un'efficienza media pari all'81,3% (70.8% nel modello con bootstrapping). L'efficienza di scala, legata alla distanza dalla scala produttiva ottimale, è mediamente attestata all'81,1%. La dimensione ottima è invece attestata intorno ai 300.000 abitanti. In relazione alla regressione di secondo stadio, gli autori prendono in considerazione diverse variabili di tipo operativo ed economico, tra cui spicca per importanza, ai fini di quest'analisi, la densità della popolazione (sia il termine di primo ordine, sia il quadrato). I risultati evidenziano una relazione ad "U" tra densità della popolazione e performance di efficienza, con le performance peggiori collegate sia alle aree rurali (a bassissima densità) sia a quelle urbane congestionate.

*Dimensione ottima:  
circa 300.000 abitanti*

*Le aree con densità  
della popolazione molto  
bassa o molto alta  
presentano le  
performance peggiori*

**Carvalho e Marques (2014)** fanno riferimento alla totalità delle utilities portoghesi attive nella fase del riciclaggio (37 imprese osservate nel periodo 2006-2010). L'obiettivo del lavoro è la stima di economie di densità dell'output ("*economies of output density*") e di dimensione/scala ("*economies of size*") sulla base di una frontiera di costo. L'approccio metodologico utilizzato è quindi quello della *Stochastic Frontier Analysis*, che permette di isolare la componente di inefficienza. Gli autori stimano sia un modello *pooled*, che considera le osservazioni del campione come indipendenti tra loro, sia quattro modelli SFA che tengono conto della struttura *panel* della base dati (un modello con inefficienza *time-invariant* con effetti random, e tre modelli con inefficienza *time-varying*). Per la funzione (frontiera) di costo totale si utilizza un solo output, dato dalla somma delle quantità di rifiuti (da imballaggio) riciclati: vetro, plastica e carta. Per quanto riguarda gli input, si separano i costi operativi (Opex) dai costi di capitale (Capex) e i relativi prezzi sono calcolati rapportando le variabili al totale dei rifiuti riciclati (per gli Opex) e al totale degli *assets* netti (per i Capex). In aggiunta, come variabili di controllo, si considerano il PIL regionale, il numero di cassonetti per migliaia di abitanti, il tipo di proprietà (pubblica o privata), il fatto che l'utility sia regolata, il fatto che si occupi anche di compostaggio, se si avvalga di processi di incenerimento. Infine, si introducono anche i pesi relativi delle tipologie di rifiuto trattate (rapporti carta/vetro e plastica/vetro).

*Economie di densità dell'output fino a 15.400 tonnellate annue di rifiuti riciclati (420.000 abitanti)*

*Dimensione ottima (in base al calcolo delle economie di scala): 14.500 - 16.500 tonnellate annue di rifiuti riciclabili (400.000 - 550.000 abitanti)*

I risultati (principalmente basati sul modello *pooled*) dimostrano la presenza economie di densità dell'output, evidenti soprattutto per le imprese piccole. Al di sopra delle 15.400 tonnellate annue (corrispondenti circa a 420.000 abitanti), non si può invece escludere che i rendimenti rispetto all'output siano costanti. In relazione alle economie di scala, esse risultano essere presenti, anche se non particolarmente forti, per le imprese piccole e per quelle prossime alla mediana, mentre rendimenti costanti (corrispondenti al dimensionamento ottimo) si riscontrano per imprese che servono 400-550 mila abitanti, ossia gestiscono

quantità di rifiuti riciclabili comprese tra le 14.500 e le 16.500 tonnellate annue. Rispetto alle variabili di controllo, la gestione da parte di soggetti privati e l'utilizzo di processi di incenerimento sembrano agire a riduzione dei costi, mentre la regolazione e il compostaggio li incrementano. In particolare, quest'ultima variabile suggerisce l'opportunità di incentivare il compostaggio domestico. Inoltre, un aumento della proporzione di plastica (rispetto al vetro) sembra essere più costoso rispetto agli altri materiali. Infine, i livelli di efficienza stimati differiscono notevolmente tra i vari modelli (3% - 24%).

**Abrate et al. (2014a)** analizzano l'andamento delle economie di scala e scopo su un campione di 529 comuni italiani osservati sul periodo 2004-2006. Gli autori si focalizzano sulla natura multi-output del servizio, considerando sia i rifiuti smaltiti (in discarica o inceneritore) sia i rifiuti inviati al riciclaggio. L'approccio

econometrico si basa sulla stima di funzioni di costo (con relative *shares*, usando un approccio *non-linear generalized least squares*) *translog* e *composite*. Come gli autori discutono, la funzione *composite* (che

*Rendimenti di scala  
costanti su quasi tutto il  
campione.*

*Deboli diseconomie di  
scala per le città più  
grandi*

*La densità abitativa  
genera incrementi di  
costo*

presenta una struttura quadratica in relazione agli output), oltre a generare un migliore *fit* dei dati nel caso specifico, si presta meglio delle forme logaritmiche alla stima di economie di scopo in quanto può gestire anche livelli di output pari a zero. Conseguentemente, il commento dei risultati si basa principalmente su questa specificazione. Il modello base, contenente solo le variabili di output (quantità di rifiuti smaltita e quantità di rifiuti riciclata) e i prezzi dei fattori (lavoro, capitale e carburante) porta a riscontrare rendimenti di scala costanti su quasi tutto il campione: soltanto le simulazioni per le città più grandi (8 volte la media campionaria,

ossia in corrispondenza di 290.000 abitanti) segnalano deboli diseconomie. Tale effetto deriva dalla combinazione di due componenti. Da un lato le economie di scopo tra i due output (3% alla media campionaria) diventano sempre più rilevanti all'aumentare della dimensione (20% per una città di 290.000 abitanti). Dall'altro lato, i rendimenti di scala per i singoli output sono costanti solo fino alla media campionaria, diventando decrescenti per livelli di output maggiore. Interessante, poi, è l'analisi dell'impatto sui costi dell'aumento della percentuale di rifiuti riciclati, che risulta sempre positivo, ma relativamente moderato finché tale percentuale è ridotta e/o la dimensione del comune è media o piccola. Incrementi importanti si riscontrano invece per alte percentuali di riciclaggio in centri di grandi dimensioni. Gli autori propongono inoltre modelli più estesi, che tengono conto dell'effetto di variabili aggiuntive (densità abitativa, dummies dimensionali e geografiche, forma organizzativa, trend temporale). Tra queste variabili, particolarmente interessante è il ruolo della densità abitativa (abitanti per kmq), che impatta positivamente sui costi. Quando però tale variabile è scissa tra urbanizzazione verticale (abitanti per edificio) e orizzontale (edifici per km<sup>2</sup>), si riscontra che sia quest'ultima ad esercitare l'impatto prevalente. Rispetto alla forma organizzativa, la gestione *in house* sembra generare risparmi di costo. Infine, i comuni sotto i 50.000 abitanti presentano costi inferiori, così come quelli locati nel Centro-Nord.

In **Abrate et al. (2014b)** si lavora su un campione analogo di dati comunali, ma con un importante approfondimento relativo alla presenza di economie di densità. Il modello si basa sulla stima di diverse specificazioni di una funzione di costo totale di tipo *translog* con *cost shares* (approccio SUR, Zellner 1962). Nella funzione si considerano le quantità di rifiuti smaltite e inviate al riciclaggio (aggregate in un'unica variabile o separate, a seconda dei modelli), la popolazione, il numero di edifici e la superficie dell'area comunale. In aggiunta si considerano i prezzi di lavoro, capitale e carburante. Altre variabili aggiuntive relative all'attività a livello provinciale di discariche e inceneritori, al regime tariffario, alle presenze turistiche, al trend temporale, oltre a dummies geografiche e dimensionali, vengono testate nell'ambito delle diverse specificazioni. Gli autori si interrogano in particolare sulla presenza e sulla scomposizione delle economie di densità, riscontrando, sulla base della specificazione scelta come riferimento e in corrispondenza dell'impresa media, la presenza significativa di economie di densità dell'output (ossia, si riscontra una crescita meno che proporzionale dei costi totali al crescere della quantità di rifiuti gestiti, a parità di popolazione, area e numero di edifici). Gli autori interpretano, seguendo la letteratura, tale risultato come evidenza a favore di una gestione monopolistica del servizio, nell'ambito di un dato territorio.

Al contrario, quando si considera l'impatto globale della densità degli utenti emergono diseconomie (il costo totale aumenta in modo più che proporzionale all'aumentare dell'output, della popolazione e degli edifici, a parità di area servita). Questo effetto viene "scomposto" in due elementi fondamentali. Il primo è legato all'effetto di densità "orizzontale", che misura la reattività dei costi all'aumentare delle quantità gestite e degli edifici, a parità di popolazione e di area (la popolazione è meno concentrata negli edifici, che sono più ridotti e/o con meno piani); in questo caso si riscontra la presenza di economie. Al contrario, se l'output e la popolazione aumentano, a parità di edifici e di area (ossia con un modello di urbanizzazione a sviluppo verticale), questo effetto di densità ("verticale", appunto) genera diseconomie, probabilmente a causa di fenomeni di congestione. Tali diseconomie eccedono l'effetto positivo della densità orizzontale. Infine, in relazione alla presenza di economie di dimensione ("*size*"), che misurano la reattività dei costi totali in presenza di una crescita proporzionale dell'output, della popolazione, degli edifici e dell'area servita, si riscontrano deboli diseconomie. Tali risultati tendono ad essere piuttosto robusti sia tra diverse specificazioni della funzione di costo, sia al variare delle dimensioni dei comuni considerati.

*Economie di densità  
dell'output*

*Economie di densità  
"orizzontale"*

*Diseconomie di densità  
"verticale"*

*Deboli diseconomie di  
dimensione*

**Carvalho et al. (2015)** analizzano un campione di 184 utilities australiane attive nell'ambito della raccolta rifiuti, osservate per un periodo di sei anni (2000/2001 – 2005/2006). Gli autori si basano su un approccio SFA, stimando cinque diversi modelli di frontiera di costo (un modello pooled e quattro modelli per dati panel, di cui due assumono efficienza *time-invariant*, mentre i rimanenti due assumono efficienza che varia nel tempo). La variabile dipendente utilizzata è il costo totale dell'erogazione del servizio. Tra i regressori si considerano due variabili definite come output in senso stretto (la quantità di rifiuti differenziati e la quantità

*Economie di densità dell'output significative sopra i 12.000 abitanti (rifiuti indifferenziati)*

*Diseconomie di densità degli utenti sopra i 12.000 abitanti*

*Scala ottima (sulla base delle economie di dimensione): circa 12.000 abitanti*

di rifiuti indifferenziati raccolti), altre due variabili relative alla dimensione (popolazione e dimensione dell'area servita) e i prezzi del lavoro e degli altri input (quest'ultimo prezzo calcolato in via residuale come rapporto tra i costi non legati al lavoro e la quantità complessiva di rifiuti raccolti). Per quanto riguarda la forma funzionale, gli autori adottano una translog "ridotta" per far fronte a un problema di multicollinearità. Tra i vari modelli testati, quello che genera stime più affidabili sembra essere il modello "True random-effects" (Greene, 2005), su cui gli autori basano il commento ai risultati. Le stime suggeriscono la presenza di forti economie di densità dell'output (risparmi legati all'aumento delle quantità raccolte a parità di

popolazione e area servita), significative soprattutto nell'ambito dei rifiuti indifferenziati e per utilities che gestiscono più di 12.000 abitanti. Oltre tale dimensione, però si riscontrano anche diseconomie di *customer density* (che riflettono il comportamento dei costi rispetto a variazioni proporzionali di quantità di rifiuti raccolti e abitanti serviti). Considerando invece le *size economies* (che indicano il comportamento dei costi al variare di quantità, abitanti e area servita), si riscontrano economie per le utilities più piccole e diseconomie per quelle di dimensioni maggiori, con una scala ottima corrispondente a circa 12.000 abitanti. Infine, gli autori riscontrano *cost complementarities* debolmente significative solo per le utilities di dimensioni maggiori (oltre i 32.300 abitanti).

*Impatto negativo della popolazione sull'efficienza fino a 15.000 abitanti, positivo tra 15.000 e 17.000.*

*Impatto negativo della densità fino a 900 ab/kmq*

*Impatto positivo della dimensione delle famiglie*

Infine, si vuole considerare il lavoro di **Guerrini et al. (2017)**. Il lavoro presenta in effetti obiettivi di ricerca che si discostano parzialmente rispetto al focus principale di questa analisi, in quanto propone un'analisi di benchmarking a livello locale, ma appare importante menzionarlo in questo contesto in quanto propone alcuni risultati molto rilevanti anche ai fini della presente *survey*. Lo studio applica un'analisi di efficienza a 40 comuni di piccole dimensioni (sotto i 33.500, con media di 7599 abitanti) siti nella zona occidentale della provincia di Verona. L'analisi si focalizza sull'impatto di una serie di variabili ambientali (operative e demografiche) sulla performance di efficienza. Interessante ai fini di questa analisi è

l'impatto della dimensione della popolazione servita e della sua densità. Dal punto di vista empirico, si adotta un modello di efficienza non parametrico (*order-m efficiency*) che fornisce misure di efficienza condizionate rispetto a (ossia che tengano conto di) una serie di variabili ambientali. Confrontando le misure di efficienza condizionata e non condizionata è possibile determinare l'impatto di ciascuna variabile esterna. Gli autori dimostrano un impatto negativo della dimensione della popolazione sull'efficienza fino a 15.000 abitanti, e positivo tra i 15.000 e i 17.000. Anche la densità della popolazione impatta negativamente, anche se con andamento altalenante, fino a 900 abitanti/kmq, mentre la dimensione delle famiglie (abitanti residenti per unità abitativa) presenta un effetto positivo sull'efficienza, almeno oltre il livello di 0.75 abitanti residenti per unità abitativa.

Tabella 1: Tavola sinottica delle references bibliografiche

Autore (anno)	Periodo e paese di riferimento dello studio	Metodologia	Input	Output	Altre variabili	Risultati relativi ad economie di scala e densità
Callan, S.J., Thomas, J.M. (2001)	USA (Massachusetts) 1996/1997	Stima di un sistema di due funzioni di costo totale distinte per lo smaltimento e il riciclaggio (Approccio SUR, funzione esponenziale)	Non specificati	Quantità di rifiuti smaltiti Quantità di rifiuti riciclati	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densità abitativa</li> <li>- Frequenza della raccolta</li> <li>- Presenza di un gestore pubblico</li> <li>- Presenza di una discarica (solo per smaltimento)</li> <li>- Accesso a una struttura pubblica per il riciclaggio dei materiali (solo per riciclaggio)</li> <li>- Accesso a finanziamenti pubblici a supporto del riciclaggio (solo per riciclaggio)</li> </ul>	<p>Equazione attività di smaltimento: Economie di scala non significative (rendimenti costanti) Economie di densità significative</p> <p>Equazione attività di riciclaggio: Economie di scala significative (alla media campionaria pari a 3.68, calcolate in base all'elasticità riportata). Economie di densità non significative.</p>
Antonioli, B., Filippini, M. (2002)	Italia 1991-1995	Stima di funzioni di costo totale e di costo variabile (forma funzionale: translog)	Lavoro Capitale Energia (carburante)	Quantità complessiva di rifiuti raccolti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lunghezza rete (lunghezza itinerario di raccolta)</li> <li>- gestione della fase "disposal"</li> <li>- esternalizzazione della fase di trattamento</li> <li>- alta frequenza di raccolta</li> </ul>	<p>Funzione di costo totale: Economie di densità: 1.15-1.48 Economie di scala: 0.88 – 1.67</p> <p>Funzione di costo variabile: Economie di densità: 0.92-1.73 Economie di scala: 0.68 – 3.69 Lunghezza ottimale del network: circa 400 km</p>
Byrnes, J, Dollery, B., Webber, A. (2002)	Australia 1995/1996 – 1999/2000	Stima di una funzione di costo medio di lungo termine (regressione OLS e Kmenta's maximum likelihood estimator)	Non esplicitamente indicati	Numero di bidoni gestiti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- reddito medio dei residenti</li> <li>- un indice dei prezzi</li> <li>- popolazione residente</li> <li>- densità dei bidoni</li> </ul>	<p>La stima effettuata sul campione completo evidenzia economie di scala per qualunque livello di output. Sul sotto-campione di enti locali di tipo "metropolitano" si determina una scala efficiente pari a 149.631 bidoni gestiti Sul sotto-campione di enti locali di tipo "rurale e regionale" si determina una scala efficiente pari a 11.470 bidoni gestiti (quest'ultima</p>

						regressione presenta minore affidabilità)
--	--	--	--	--	--	---

Tabella 1: Tavola sinottica delle references bibliografiche (segue)

<b>Autore (anno)</b>	<b>Periodo e paese di riferimento dello studio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Input</b>	<b>Output</b>	<b>Altre variabili</b>	<b>Risultati relativi ad economie di scala e densità</b>
Bohm, R.A., Folz, D.H, Kinnaman, T.C., Podolsky M.J. (2010)	USA 1997	Stima di funzioni di costo totale distinte per i rifiuti indifferenziati e riciclabili. Approccio SUR, basato su GLS	Lavoro Capitale Energia (+ Smaltimento, nella funzione di relativa alla gestione dei rifiuti indifferenziati)	Quantità di rifiuti indifferenziati raccolti Quantità di rifiuti riciclabili raccolti (ciascuna variabile è utilizzata nell'ambito della specifica equazione)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso di etichette o sacchi appositi e soggetti a specifica tariffa</li> <li>- Raccolta dei due tipi di rifiuto nello stesso giorno</li> <li>- Densità della popolazione</li> <li>- Presenza di condomini – residente multifamiliari</li> <li>- Frequenza raccolta</li> <li>- Presenza di punti di raccolta (con o senza personale)</li> <li>- Tasso di partecipazione delle famiglie (per riciclaggio)</li> <li>- Fornitura gratuita alle famiglie di sacchi o contenitori</li> <li>- Separazione dei rifiuti riciclabili misti al momento della raccolta</li> <li>- Separazione dei rifiuti riciclabili misti in una struttura centralizzata</li> <li>- Numero di componenti delle squadre di raccolta</li> <li>- Raccolta dei riciclabili effettuata da dipendenti comunali</li> <li>- Riciclabili gestiti in una struttura comunale</li> <li>- Tipo di veicolo usato per la raccolta dei riciclabili</li> <li>- Obbligatorietà del programma di riciclaggio</li> </ul>	<p>Funzione di costo totale relativa alla raccolta e smaltimento di rifiuti indifferenziati:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Economie di scala presenti su tutto il campione: costi medi e marginali sempre decrescenti</li> </ul> <p>Funzione di costo totale relativa alla raccolta e riciclaggio di materiali riciclabili:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Curve di costo medio e marginale con andamento a "U"</li> <li>- Costo medio minimo in corrispondenza di 13.200 tonnellate di output (80.000 abitanti)</li> </ul>

					- Numero di anni da cui il programma di riciclaggio è attivo	
--	--	--	--	--	--	--

Tabella 1: Tavola sinottica delle references bibliografiche (segue)

<b>Autore (anno)</b>	<b>Periodo e paese di riferimento dello studio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Input</b>	<b>Output</b>	<b>Altre variabili</b>	<b>Risultati relativi ad economie di scala e densità</b>
Bel G., Fageda, X. (2010)	Spagna (Galizia) 2005	Stima di funzione di costo totale (approccio OLS) Forma funzionale: Cobb-Douglas	Lavoro	Quantità di rifiuti raccolti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Percentuale di differenziata</li> <li>- Frequenza settimanale di raccolta</li> <li>- Livello di attività turistica</li> <li>- Presenza inceneritore</li> <li>- Affidamento a impresa privata</li> </ul>	Economie di scala significative per i comuni con meno di 50.000 abitanti (valore calcolabile sulla base delle stime: 1.176)
Simões, P., De Witte, K., Marques, R.C. (2010)	Portogallo (2007)	DEA con regressione di second stage e bootstrapping	Opex Capex	Quantità di rifiuti trattati Quantità di rifiuti riciclati	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densità della popolazione (termine lineare e quadrato)</li> <li>- Pil pro capite</li> <li>- Distanza dalla discarica, dall'inceneritore o dall'impianto di compostaggio</li> <li>- Management (pubblico o privato)</li> <li>- Regolazione</li> <li>- Compostaggio</li> <li>- Incenerimento</li> </ul>	Scala dimensionale ottimale: circa 300.000 abitanti Relazione ad "U" tra performance e densità della popolazione, con performance bassa sia nelle aree rurali, sia in quelle urbane congestionate
Carvalho, P., Marques, R.C. (2014)	Portogallo 2006-2010	Stima di frontiere di costo (forma funzionale: (restricted) translog	Opex Capex	Quantità complessiva di rifiuti da imballaggio raccolti per il riciclaggio (vetro, plastica, carta)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Area servita</li> <li>- Pil regionale</li> <li>- Gestione pubblica/privata</li> <li>- Regolazione</li> <li>- Gestione compostaggio</li> <li>- Ricorso all'incenerimento</li> <li>- Peso relativo delle categorie di rifiuti</li> </ul>	Economie di densità: alla mediana: 1.019 (rendimenti costanti rispetto all'output a partire da 15.400 tonnellate annue – 420.000 abitanti) Economie di dimensione/scala: alla mediana: 1.009 Scala ottima (rendimenti costanti) compresa tra 400 – 550 mila abitanti (o 14.500 – 16.500 tonnellate annue).

Tabella 1: Tavola sinottica delle references bibliografiche (segue)

Autore (anno)	Periodo e paese di riferimento dello studio	Metodologia	Input	Output	Altre variabili	Risultati relativi ad economie di scala e densità
Abrate, G., Erbetta, F., Fraquelli, G., Vannoni, D. (2014a)	Italia 2004-2006	Stima di funzioni di costo totale (non-linear generalized least-squares). Forme funzionali: translog e composite	Lavoro Capitale Carburante	Quantità di rifiuti smaltiti Quantità di rifiuti riciclati	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densità abitativa</li> <li>- (Urbanizzazione verticale e orizzontale)</li> <li>- Dummies dimensionali</li> <li>- Dummies geografiche</li> <li>- Forma organizzativa (in house, cooperazione tra comuni, affidamento ad una società)</li> <li>- Trend temporale</li> </ul>	Rendimenti di scala costanti su quasi tutto il campione Diseconomie solo per i comuni di dimensioni maggiori (output 8 volte la media campionaria, ossia in corrispondenza di 290.000 abitanti) Rendimenti di scala output-specific costanti solo fino alla media campionaria, poi decrescenti, ma compensati da economie di scopo tra smaltimento e riciclaggio
Abrate, G., Erbetta, F., Fraquelli, G., Vannoni, D. (2014b)	Italia 2004-2006	Stima di funzioni di costo totale Forma funzionale: transolog	Lavoro Capitale Carburante	Quantità di rifiuti smaltiti Quantità di rifiuti riciclati	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la popolazione</li> <li>- il numero di edifici</li> <li>- superficie dell'area comunale</li> <li>- attività di discariche</li> <li>- attività e inceneritori</li> <li>- regime tariffario</li> <li>- alle presenze turistiche</li> <li>- trend temporale</li> <li>- oltre a dummies geografiche</li> <li>- dummies dimensionali</li> </ul>	Economie di densità dell'output (1.45 alla media campionaria) Diseconomie da densità verticale (0.90 alla media campionaria) Economie di densità orizzontale (1.52 alla media campionaria) Diseconomie (complessive) di densità (0.92 alla media campionaria) Diseconomie di dimensione (0.96 alla media campionaria)
Carvalho, P., Marques, R.C., Dollery, B. (2015)	Australia 2000/2001 – 2005/2006	Stima di frontiere di costo Forma funzionale: (restricted translog)	Lavoro Altri input	Quantità di rifiuti indifferenziati raccolti Quantità di rifiuti differenziati raccolti Popolazione Area servita	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Popolazione</li> <li>- Area servita</li> </ul>	Forti economie di output density, soprattutto per la raccolta indifferenziata, significative sopra i 12.000 abitanti Diseconomie di customer density sopra i 12.000 abitanti Economie di dimensione presenti per le piccole imprese, diseconomie per

						le imprese medio-grandi. Scala ottima: 12.000 abitanti
--	--	--	--	--	--	--

Tabella 1: Tavola sinottica delle references bibliografiche (segue)

<b>Autore (anno)</b>	<b>Periodo e paese di riferimento dello studio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Input</b>	<b>Output</b>	<b>Altre variabili</b>	<b>Risultati relativi ad economie di scala e densità</b>
Guerrini, A., Carvalho, P., Romano, G., Marques, R.C., Leardini, C. (2017)	Italia (2008-2012)	Order-m efficiency (modello di efficienza non parametrico)	Costo totale della raccolta	Quantità di rifiuti differenziati e indifferenziati	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Percentuale di clienti non-residenziali</li> <li>- Popolazione servita</li> <li>- Densità della popolazione</li> <li>- Dimensione media delle famiglie</li> <li>- Quantità di rifiuto raccolta per ogni carico</li> <li>- Flussi turistici</li> <li>- Metodo di raccolta (cassonetti o porta-a-porta)</li> <li>- Numero di anni con raccolta porta-a-porta</li> </ul>	<p>Impatto negativo della popolazione sull'efficienza fino a 15.000 abitanti, e positivo tra i 15.000 e i 17.000.</p> <p>Impatto negativo della densità della popolazione fino a 900 abitanti/kmq. La dimensione delle famiglie ha impatto positivo oltre il livello di 0.75 abitanti residenti per unità abitativa.</p>

### 3. IL CAMPIONE UTILIZZATO

Il campione comprende 86 imprese operanti sul territorio italiano negli anni tra il 2008 ed il 2016, per un totale di 671 osservazioni annuali. La base dati costituisce un panel non bilanciato, in quanto la serie storica di dati non è disponibile per tutte le imprese. La principale fonte di rilevazione dei dati necessari è stata il bilancio di esercizio di ciascuna impresa, opportunamente integrata da dati presenti sui siti internet delle singole imprese,<sup>1</sup> nonché dalle informazioni sui quantitativi di rifiuti raccolti a livello comunale disponibili sul sito dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA (<http://www.catasto-rifiuti.isprambiente.it/>) e dai dati ISTAT su popolazione e superficie comunale.

Nel complesso, gli abitanti serviti dalle imprese considerate sono circa 19.300.000 e corrispondono a quasi un terzo della popolazione italiana. La Figura 1 mostra la distribuzione territoriale delle imprese analizzate. Il Centro-Nord contribuisce in maniera prevalente, a partire dalle 15 imprese di Lombardia e Toscana. Soltanto quattro regioni non sono rappresentate: si tratta di Umbria, Molise, Basilicata e Calabria. La successiva Figura 2 chiarisce ancora meglio la rappresentatività del campione su base regionale, considerando il rapporto tra popolazione servita dalle imprese del campione e popolazione complessiva. Il colore più scuro è associato alle regioni caratterizzate da una maggior copertura campionaria. Se tale indice supera l'85 per cento in Toscana e Val d'Aosta, nella gran parte delle altre regioni si attesta su valori compresi tra il 20 e il 50 per cento.

---

<sup>1</sup> Un aspetto particolarmente delicato nella raccolta dati ha riguardato l'individuazione univoca dell'insieme dei comuni serviti da una determinata impresa.

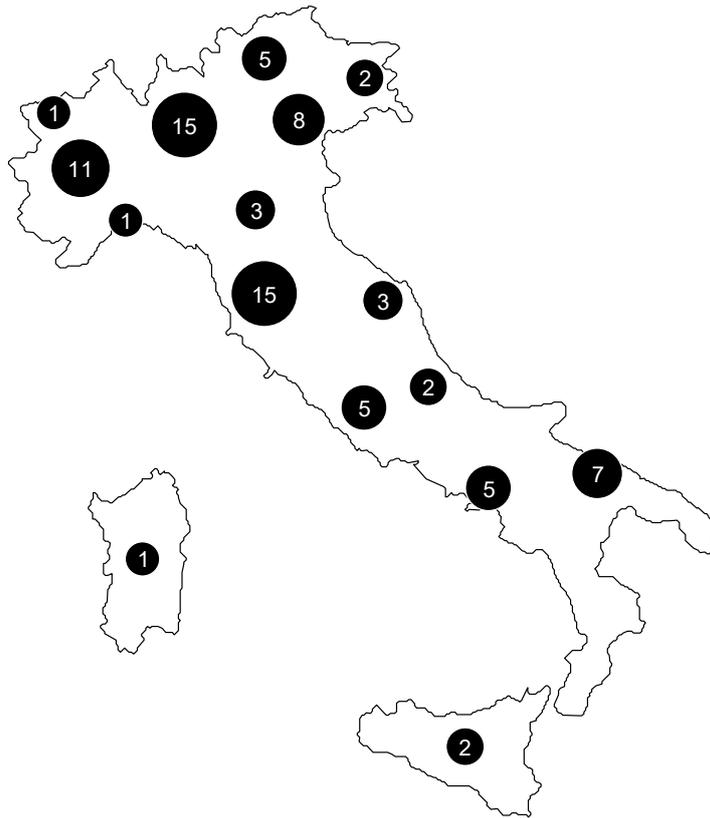


Figura 2. Distribuzione territoriale delle imprese del campione

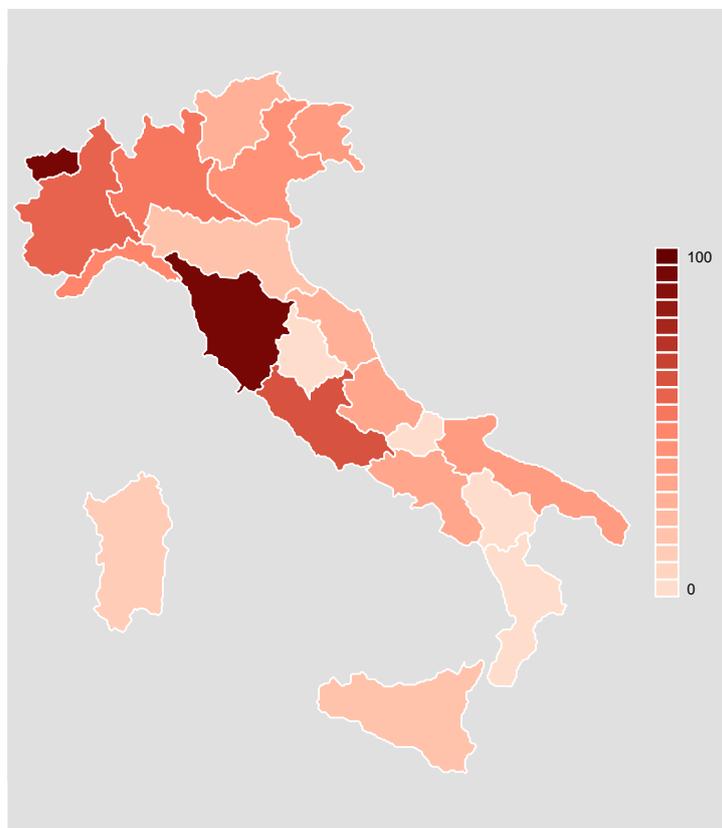


Figura 3. Quota percentuale di popolazione regionale servita dalle imprese del campione.

Circa un terzo delle imprese del campione gestisce direttamente una discarica, mentre nell'11 per cento di casi gestisce direttamente un inceneritore. La Tabella 1 mette in evidenza un altro aspetto interessante. Una quota consistente di imprese (24) fornisce i propri servizi su un unico comune, mentre le altre imprese operano su aggregazioni comunali più o meno estese. Naturalmente, il fatto di servire più comuni non costituisce necessariamente un indicatore di dimensione elevata, anzi, l'aggregazione di più comuni è più probabile nelle aree rurali e montane.

*Tabella 2. Distribuzione delle imprese per numero di comuni serviti*

Singolo comune	Tra 2 e 5 comuni	Tra 6 e 10 comuni	Tra 10 e 20 comuni	Tra 20 e 50 comuni	Oltre 50 comuni	Totale
24	8	10	19	16	9	86

#### 4. LE VARIABILI DI OUTPUT E DI INPUT

Il modello di funzione di costo, come evidenziato nel paragrafo 1, richiede innanzitutto di definire le variabili di output e di input del processo produttivo che si intende rappresentare.

La letteratura suggerisce la scelta di un modello multi-output, in grado di rappresentare sia le quantità di rifiuti trattati, sia le caratteristiche dell'area servita. In particolare, i dati raccolti permettono di specificare un modello con 4 variabili di output:

- la quantità di rifiuti solidi urbani indifferenziati ( $Y_{IND}$ ), espressa in tonnellate, e destinata perlopiù a essere smaltita presso le discariche o presso gli inceneritori;
- la quantità di rifiuti solidi urbani raccolta in modo differenziato ( $Y_{DIFF}$ ), espressa anch'essa in tonnellate, che può essere avviata ai processi di riciclaggio;
- il numero di abitanti residenti nell'area servita ( $Y_{AB}$ );
- la superficie dell'area servita ( $Y_{SUP}$ ).

Per quanto riguarda la scelta gli input, si è scelto di individuare 3 macro-categorie: il lavoro, il capitale e, come categoria residuale, il carburante e altre materie prime e servizi. Per ciascuna di queste categorie, è stato determinato il rispettivo prezzo:

- il prezzo del lavoro ( $P_L$ ) è stato ottenuto rapportando il costo del lavoro riportato nei dati di bilancio al numero di dipendenti;
- il prezzo del capitale ( $P_K$ ) è rappresentato dal tasso medio di ammortamento, calcolato rapportando il costo degli ammortamenti materiali e immateriali rispetto al totale delle immobilizzazioni lorde;
- il prezzo del carburante ( $P_C$ ) è stato rilevato, su base provinciale, attingendo alle pubblicazioni periodiche del prezzo del gasolio da autotrazione da parte delle camere di commercio provinciali.

La Figura 3 sintetizza le variabili utilizzate per il modello di funzione di costo e le relative fonti. Il costo totale ( $C_{TOT}$ ), variabile dipendente del modello, comprende la somma di tutti i costi operativi.

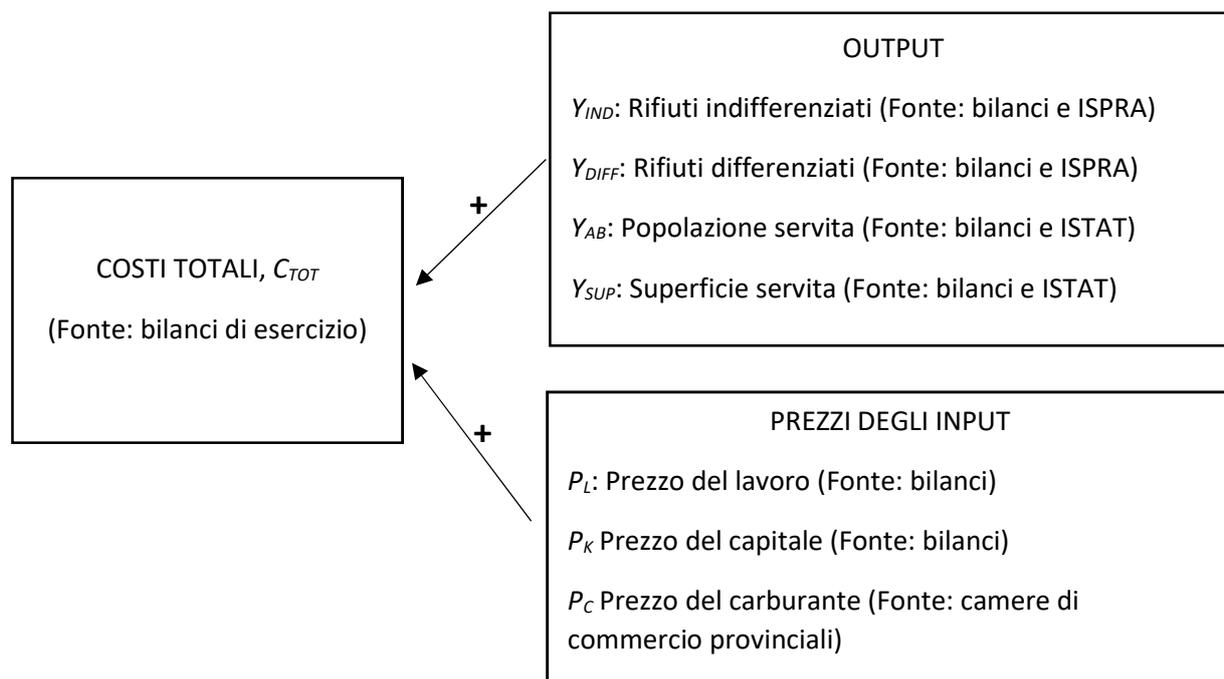


Figura 4. Variabili utilizzate nel modello di funzione di costo

La successiva Tabella 2 presenta alcune statistiche riassuntive del campione utilizzato, riportando in particolare il dato della media aritmetica, la media geometrica, la deviazione standard, il minimo ed il massimo. I dati rivelano una variabilità molto elevata, in particolar modo per quel che riguarda i costi e gli output. La media geometrica assume valori molto più bassi rispetto alla media aritmetica in quanto risente meno dei valori estremi della distribuzione. L'impresa tipo del campione, prendendo come riferimento proprio il dato della media geometrica, ha costi complessivamente pari a oltre 15 milioni, tratta un quantitativo di rifiuti pari a quasi 55.000 tonnellate, di cui oltre 25.000 raccolte in modo differenziato, e serve un bacino di 114.000 abitanti su una superficie di 316 chilometri quadrati.

Tabella 3. Statistiche descrittive

Variabile	Media aritmetica	Media geometrica	Deviazione standard	Minimo	Massimo
$C_{TOT}$	36.321.000	15.564.750	86.016.760	982.974	749.321.200
$Y_{IND}$	67.836	29.074	157.083	466	1.430.680
$Y_{DIFF}$	49.847	25.501	79.453	1.786	724.897
$Y_{AB}$	221.174	114.250	388.711	8.365	2.872.021
$Y_{SUP}$	650,95	316,51	757,77	8,14	4.503,12
$P_L$	44.684	44.047	7.796	20.733	77.309
$P_K$	0,07	0,06	0,04	0,01	0,32
$P_C$	1,17	1,16	0,17	0,82	1,76

Se i dati in valore assoluto aiutano a caratterizzare la dimensione media delle imprese del campione, risulta altrettanto utile analizzare i dati in termini relativi. In particolar modo, il costo medio per abitante servito è pari a circa 149 Euro, mentre, se rapportato alle tonnellate di rifiuti complessivamente prodotte, il costo medio si attesta a 283 Euro. La Figura 4 fornisce qualche prima indicazione sull'effetto della scala dimensionale sul costo medio per abitante. In particolare, il grafico descrive la distribuzione del dato di costo medio all'interno di diverse classi dimensionali, dalle imprese più piccole che servono meno di 50.000 abitanti a quelle più grandi che servono oltre 800.000 abitanti. La rappresentazione grafica attraverso il *box-plot* (o "diagramma a scatola e baffi") risulta particolarmente informativa: la scatola delimita i valori compresi tra il primo ed il terzo quartile (con, al suo interno, una linea a rappresentare la mediana), mentre i baffi evidenziano gli estremi della distribuzione. Sia pur in prima approssimazione, sembra emergere una tendenza del costo medio a diminuire fino ai 200.000 abitanti e a risalire oltre questa soglia.

Peraltro, l'eterogeneità del campione non riguarda soltanto la dimensione dell'impresa e i costi medi, ma anche i rapporti tra i diversi output considerati. A tal proposito, la Figura 5 evidenzia la dispersione nel campione dei valori di percentuale di raccolta differenziata, produzione di rifiuti pro capite (in chilogrammi) e densità della popolazione (abitanti per chilometro quadrato). Si può notare come la percentuale di raccolta differenziata si collochi prevalentemente tra il 30 ed il 60 per cento, con punte massime superiori all'80 per cento. La produzione di rifiuti pro-capite (sia indifferenziati che differenziati) è prevalentemente compresa tra i 400 e i 600 chilogrammi. Vi sono tuttavia alcuni casi con produzione particolarmente elevata, che vanno ricondotti a territori con forte vocazione turistica e elevata presenza di seconde case (infatti, il dato degli abitanti tiene conto solamente della popolazione residente). Per quel che riguarda la densità abitativa, la dispersione del dato è particolarmente elevata, in quanto nel campione sono rappresentate sia aree rurali che aree urbane (il dato massimo della densità arriva a superare i 10000 abitanti per chilometro quadrato, anche se per motivi di visualizzazione su scala il grafico viene delimitato a un massimo di 2000). Proprio l'eterogeneità di questi dati giustifica pienamente la scelta di un modello a 4 output, in grado di adattarsi il più possibile alle specifiche caratteristiche del territorio servito.

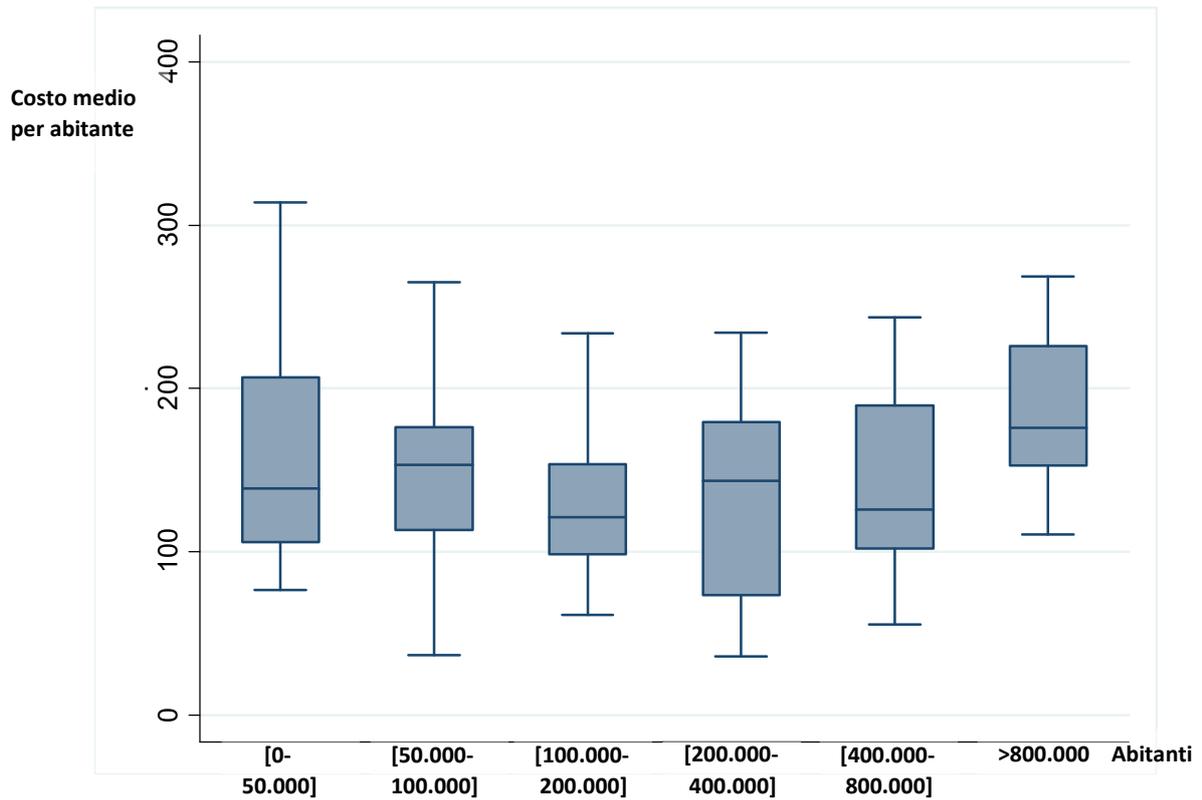


Figura 5. Relazione tra costo medio per abitante e numero di abitanti serviti

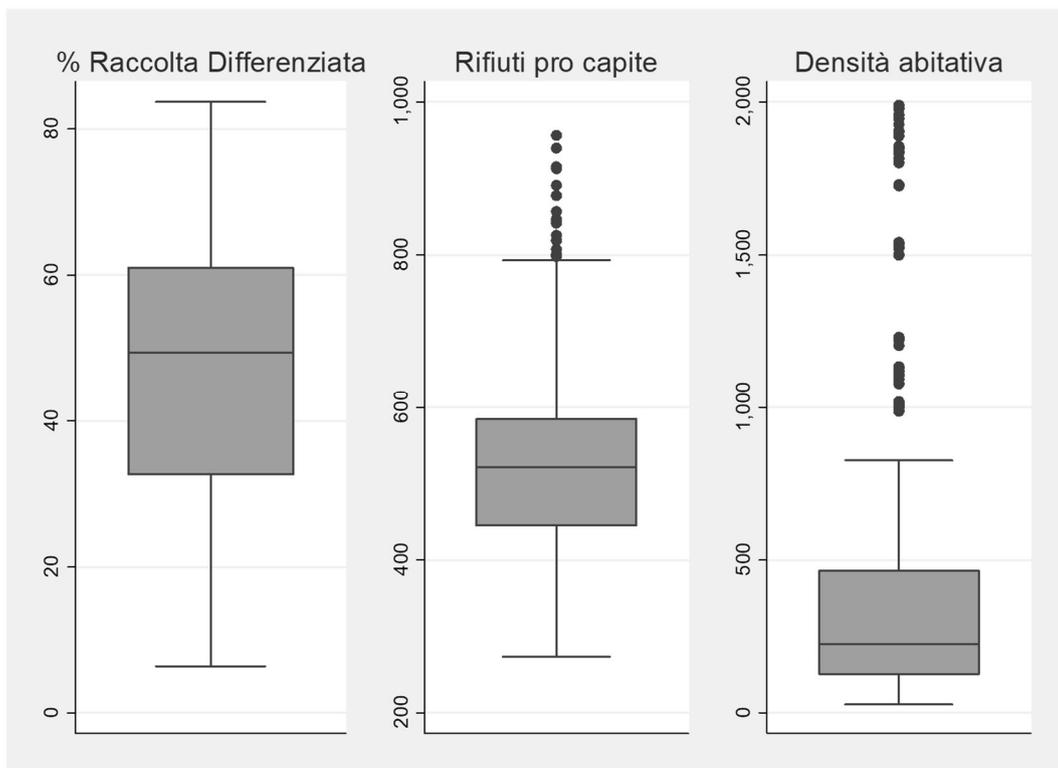
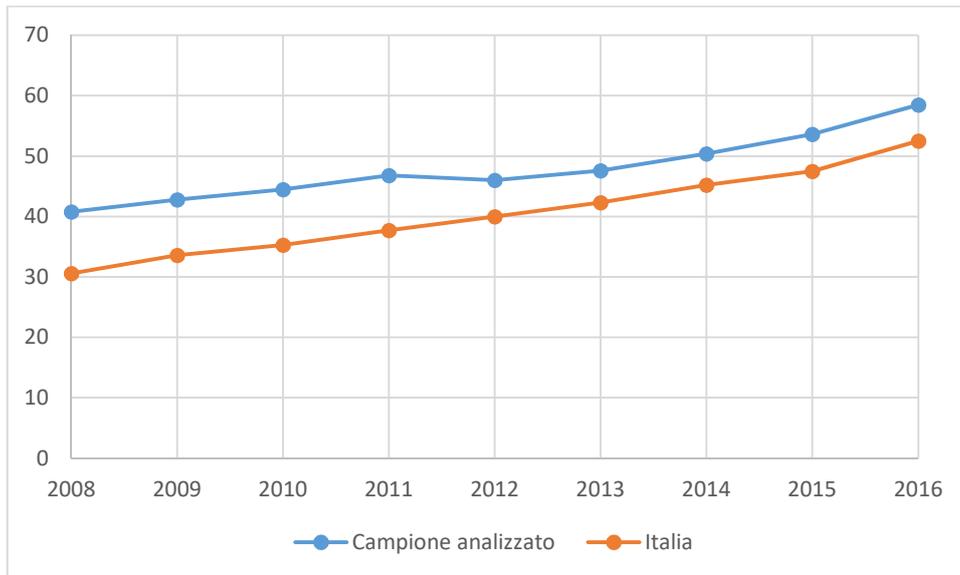


Figura 6. Variabilità nel campione di alcuni indicatori chiave.

La Figura 6 permette infine di soffermarsi ulteriormente sul dato della raccolta differenziata, un target ambientale particolarmente importante per misurare le performance dei comuni e delle imprese che vi operano. Nel periodo analizzato, in Italia la raccolta differenziata è salita dal 30 al 52,5 per cento (Fonte: ISPRA). Nel campione di imprese considerato, il dato si mantiene sempre su un livello superiore (dal 40 per cento del 2008 al 58 per cento del 2016), evidenziando comunque un trend in linea con la media nazionale.



*Figura 7. Aumento della raccolta differenziata dal 2008 al 2016.*

## 5. IL MODELLO EMPIRICO RELATIVO ALLA STIMA DELLE ECONOMIE DI SCALA

Ai fini della stima econometrica del modello, è stato utilizzato il modello di funzione di costo translogaritmica (Christensen, Jorgenson & Lau, 1971). L'espressione matematica di tale funzione costituisce l'approssimazione di secondo ordine in serie di Taylor in logaritmi di una generica funzione di costo  $c(y,p)$ . Il vantaggio di tale orma funzionale, largamente utilizzata in letteratura, è quello della *flessibilità*. In particolare, l'impatto di una variazione degli output o dei prezzi sul costo totale può essere diverso da impresa a impresa, a seconda del valore assunto dagli stessi output e prezzi. Questo si traduce, ad esempio, nella possibilità di stimare rendimenti di scala specifici per ogni osservazione del campione e per ogni combinazione di output ipotizzata.

Il modello di funzione di costo translogaritmico può essere espresso come segue:

$$\ln C_{TOT} = \beta_0 + \beta_i \sum_i \ln Y_i + \beta_r \sum_r \ln P_r + \frac{1}{2} \beta_{ij} \sum_{i,j} \ln Y_i \ln Y_j + \frac{1}{2} \beta_{rs} \sum_{r,s} \ln P_r \ln P_s + \beta_{ir} \sum_{i,r} \ln Y_i \ln P_r + \beta_{INC} INC + \beta_{DISC} DISC$$

dove:  $i, j \in \{IND, DIFF, AB, SUP\}$ ;  $r, s \in \{L, K, C\}$  [6]

Si noti come i pedici  $i$  e  $j$  identificano i 4 output del modello: le quantità di rifiuti indifferenziati (*IND*) e differenziati (*DIFF*), gli abitanti (*AB*) e la superficie servita (*SUP*). In parallelo, i pedici  $r$  e  $s$  identificano i prezzi dei tre input: lavoro (*L*), capitale (*K*) e carburante (*C*). La caratteristica della funzione translogaritmica è quella di stimare non solo l'impatto diretto di ciascuna di tale variabili (attraverso i coefficienti di primo ordine  $\beta_i$  e  $\beta_r$ , ma di stimare anche l'effetto di tutte le possibili interazione tra tali variabili (attraverso i coefficienti di secondo ordine  $\beta_{ij}$ ,  $\beta_{rs}$  e  $\beta_{ir}$ ). Sono proprio i coefficienti di secondo ordine a fornire alla forma funzionale la caratteristica di flessibilità.

Nel modello di costo sono state inserite anche due variabili aggiuntive per controllare l'effetto della gestione diretta da parte dell'impresa di una discarica (*DISC*) e/o di un inceneritore (*INC*). Si tratta di variabili *dummy*, che assumono valore 1 se l'impresa possiede una discarica (o un inceneritore) e valore 0 in tutti gli altri casi. Inoltre, sono imposte le condizioni di simmetria e di omogeneità della funzione di costo rispetto ai prezzi:

$$\beta_{ij} = \beta_{ji}; \beta_{rs} = \beta_{sr}; \sum_r \beta_r = 1; \sum_r \beta_{rs} = 0 \forall s; \sum_r \beta_{ir} = 0 \forall i$$
 [7]

Il lemma di Shephard applicato alla funzione di costo translogaritmica permette di ricavare, attraverso la derivata logaritmica della funzione di costo rispetto ai prezzi dei vari input, le c.d. *cost-share*, ovvero le quote di costo attribuibili ai singoli fattori produttivi. In particolare:

$$SHARE_r = \frac{\partial \ln C_{TOT}}{\partial \ln P_r} = \beta_r + \beta_{rs} \sum_s \ln P_s + \beta_{ir} \sum_i \ln Y_i \quad [8]$$

Sfruttando le informazioni sull'incidenza di ciascun input sul costo totale, ricavabili dai dati di bilancio di ciascuna impresa, è possibile stimare contemporaneamente la funzione di costo [6] e le equazioni delle cost-share [8]. Tale operazione consente di aumentare l'efficienza nella stima dei parametri della funzione di costo. Per evitare problemi di multicollinearità nel sistema stimato, occorre inserire nel sistema la totalità delle equazioni di cost-share tranne una (nel nostro caso, 2).<sup>2</sup>

La stima econometrica del sistema [6]-[8] può essere effettuata con il metodo SUR (Seemingly Unrelated Regression). Ricavati i parametri della funzione di costo, sarà possibile effettuare il calcolo delle economie di scala (*ES*) per ogni impresa del campione (e per ogni altra combinazione teorica di output e prezzi), calcolando l'inverso della somma delle elasticità del costo rispetto ai diversi output. Per ottenere invece le economie di densità (*ED*), sarà invece sufficiente ipotizzare di variare gli output a parità di superficie servita. Pertanto, in questo caso la formula considera le elasticità di costo soltanto rispetto ai rimanenti output.

$$ES = \frac{1}{\frac{\partial \ln C_{TOT}}{\partial \ln Y_{IND}} + \frac{\partial \ln C_{TOT}}{\partial \ln Y_{DIFF}} + \frac{\partial \ln C_{TOT}}{\partial \ln Y_{AB}} + \frac{\partial \ln C_{TOT}}{\partial \ln Y_{SUP}}} \quad [9]$$

$$ED = \frac{1}{\frac{\partial \ln C_{TOT}}{\partial \ln Y_{IND}} + \frac{\partial \ln C_{TOT}}{\partial \ln Y_{DIFF}} + \frac{\partial \ln C_{TOT}}{\partial \ln Y_{AB}}} \quad [10]$$

---

<sup>2</sup> Siccome la somma delle quote di costo dei vari fattori produttivi deve necessariamente essere pari a 1, i parametri della *cost-share* non inserita nel sistema possono essere ricavati ex-post per differenza.

## 6. RISULTATI

La Tabella 4 presenta i valori di elasticità degli output e le share ottimali sul punto medio del campione (media geometrica). I coefficienti evidenziano potenziali variazioni di costo pari a 0,373% e 0,310% per incrementi di volumi di raccolta differenziata e indifferenziata pari a 1%, rispettivamente. L'incremento atteso di costo per variazioni dell'1% degli abitanti serviti (a parità di altre condizioni) risulta pari a 0,253%. La superficie rappresenta una caratteristica dell'output e coglie l'estensione del territorio servito. Il coefficiente di elasticità associato a tale variabile è negativo e pari a -0,031. Il risultato implica, quindi, che un incremento dell'1% della superficie servita, a parità di altre condizioni, genera un decremento dei costi di lungo periodo pari 0,031%. Tale effetto è connesso al ruolo della densità abitativa: un incremento della superficie, *ceteris paribus*, è associato a una riduzione della densità per km<sup>2</sup> e quindi a minore congestione del territorio servito. I contesti più congestionati paiono, pertanto, svantaggiati rispetto a realtà più vaste con minore concentrazione di popolazione.

Le share ottimali di costo nel punto medio sono pari a 37,8% per il lavoro, 5,7% per gli ammortamenti del capitale tecnico e 56,5% con riferimento ai carburanti (che rappresentano la voce più rilevante dei rimanenti costi operativi). Tali share stimate di costo sono ragionevoli alla luce della tipica composizione dei costi delle imprese del settore.

Tutti i valori di elasticità degli output, della superficie e i coefficienti di share sono statisticamente significativi. L'insieme dei coefficienti stimati della funzione di costo specificata attraverso la forma funzionale translogaritmica sono presentati in Appendice (Tabella A.1). La stima della funzione di costo rispetta le proprietà teoriche: la funzione di costo è non-decrescente negli output (volumi e abitanti) e nei prezzi, è omogenea di grado 1 (data l'applicazione di vincoli nel processo di stima che assicurano il rispetto di tale proprietà) e concava rispetto ai prezzi nel punto medio. Il coefficiente  $R^2$  della funzione di costo è elevato (pari a 90%).

*Tabella 4. Elasticità degli output e share dei fattori produttivi*

Variabile		Coefficiente	Std. Err.	Z	P-value
Quantità di rifiuti differenziati	$\mathcal{E}_{CYDIFF}$	<b>0,373</b>	0,053	7,100	0,000
Quantità di rifiuti indifferenziati	$\mathcal{E}_{CYIND}$	<b>0,310</b>	0,040	7,750	0,000
Abitanti serviti	$\mathcal{E}_{CYAB}$	<b>0,253</b>	0,080	3,150	0,002
Superficie servita	$\mathcal{E}_{CYSUP}$	<b>-0,031</b>	0,013	-2,320	0,021
Share lavoro	$ShL$	<b>0,378</b>	0,006	66,280	0,000
Share capitale	$ShK$	<b>0,057</b>	0,002	34,070	0,000
Share carburanti	$ShC$	<b>0,565</b>	0,006	93,990	0,000

*Coefficienti in neretto statisticamente differenti da zero ad un livello di significatività pari almeno al 10%*

I coefficienti della funzione di costo permettono di determinare la misura delle economie di scala. Dal momento che, come osservato in precedenza, la densità del territorio servito rappresenta un aspetto rilevante, si è proceduto anche alla stima delle economie di densità. Mentre le economie di scala, pertanto,

misurano l'elasticità del costo rispetto a variazioni simultanee ed equi-proporzionali dei volumi di raccolta differenziata, indifferenziata, degli abitanti e della superficie (mantenendo inalterati la percentuale di raccolta differenziata ed i rapporti di produzione pro-capite di rifiuti e di densità abitativa), le economie di densità misurano l'elasticità del costo rispetto a variazioni dei volumi di raccolta e degli abitanti mantenendo inalterata la dimensione del territorio, in modo da simulare l'impatto di variazioni della densità abitativa.

La Tabella 5 presenta i valori delle Economie di Scala (*ES*) e di Densità (*ED*) con riferimento ad alcune imprese "virtuali" ottenute riscalando di un coefficiente  $\lambda$ , compreso tra 0,25 a 16, l'impresa media del campione. Nel punto medio ( $\lambda = 1$ ) le *ES* di lungo periodo sono pari a 1,104. Tale valore segnala l'esistenza di significative economie di scala. Ciò implica che un'espansione equi-proporzionale degli output (volumi raccolti e abitanti) e della superficie dell'1% genera un incremento dei costi dello 0,91%. Il test di significatività rigetta ampiamente l'ipotesi di rendimenti di scala costanti ( $p = 0,000$ ).

L'andamento dei coefficienti *ES* lungo l'intero range di variazione di output e superficie medi evidenzia forti economie di scala quando  $\lambda = 0,25$ , pari a 1,263, che si riducono all'aumentare della dimensione globale fino ad un valore pari a 0,883 (quando  $\lambda = 16$ ). La dimensione ottimale è raggiunta nel range compreso tra  $\lambda = 2$  e  $\lambda = 8$ , ovvero quando output e superficie sono compresi tra il doppio e 8 volte i valori medi del campione (la Tabella 5 riporta i valori di output e superficie corrispondenti a ogni coefficiente di *rescaling*). In termini di valori di output, tale situazione si verifica per numerosità di abitanti compresa tra 228.500 e 914.000 e volumi di raccolta compresi tra 109.150 e 436.600 tonnellate di rifiuti complessivi raccolti. Al di là di questo range si manifestano diseconomie di scala statisticamente significative.

Un fattore, importante, come già sottolineato, è rappresentato dalla densità abitativa. Per verificare l'impatto della densità sulla dinamica dei costi sono stati, quindi, stimate misure di economie di densità (*ED*). Nel punto medio, la stima delle economie di densità pari a 1,068. Tale valore implica che un incremento degli output (volumi di raccolta e abitanti) dell'1% a parità di superficie servita genera un incremento dei costi dello 0,94%.

Una crescita degli output (mantenendo inalterata la produzione pro-capite di rifiuti) a parità di superficie causa una maggiore densità abitativa e quindi maggiore congestione urbana, compensando parzialmente i benefici che si otterrebbero facendo variare equi-proporzionalmente anche la superficie. Per tale ragione, i valori delle economie di densità, per tutti i diversi livelli ipotizzati, appaiono inferiori rispetto alle economie di scala.

In corrispondenza a coefficienti  $\lambda = 4$  e  $\lambda = 8$  si assiste a rendimenti di scala costanti (legati quindi ad un'operatività su scala ottimale) ma a diseconomie di densità. In tali contesti, il condizionamento legato al tasso di urbanizzazione e alla congestione appare evidente ma rappresenta, di fatto, un vincolo ambientale non eliminabile. In corrispondenza a  $\lambda = 2$ , invece, l'operatività è compatibile con il range di scala ottimale con assenza di economie/diseconomie di densità. In questo contesto, quindi, il livello di densità, pari a 360 abitanti per km<sup>2</sup>, appare ottimale.

**Tabella 5. Economie di Scala (ES) e di Densità (ED) per differenti livelli simulati di output e network**

	$\lambda = 0,25$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$	$\lambda = 4$	$\lambda = 8$	$\lambda = 16$
$Y_{DIFF}$ (ton)	6.375	12.750	25.501	51.002	102.004	204.008	408.016
$Y_{IND}$ (ton)	7.268	14.537	29.704	58.148	116.296	232.592	465.184
$Y_{AB}$ (num)	28.562	57.125	114.250	228.500	457.000	914.000	1.828.000
$Y_{SUP}$ (km <sup>2</sup> )	79	158	316	632	1264	2.528	5.056
<b>ES</b>	<b>1,263</b>	<b>1,178</b>	<b>1,104</b>	1,039	0,981	0,930	<b>0,883</b>
Std. Err.	0,056	0,031	0,020	0,026	0,035	0,045	0,052
P value	0,000	0,000	0,000	0,126	0,600	0,114	0,025
<b>ED</b>	<b>1,225</b>	<b>1,141</b>	<b>1,068</b>	1,004	<b>0,947</b>	<b>0,896</b>	<b>0,850</b>
Std. Err.	0,055	0,033	0,020	0,020	0,026	0,033	0,039
P value	0,000	0,000	0,001	0,848	0,039	0,001	0,000

*Coefficienti in neretto statisticamente differenti da zero ad un livello di significatività pari almeno al 10%*

*I prezzi sono mantenuti uguali ai valori del punto medio*

La descrizione delle stime puntuali delle economie di scala e di densità, calcolate utilizzando i livelli e le combinazioni di output osservate nel campione, sono presentate in Tabella 6. La media delle economie di scala e di densità puntuali sono pari a 1,121 e 1,085 e quindi sono ampiamente coerenti con le stime ottenute a livello di impresa media del campione. La Tabella 6 presenta anche la standard deviation e i valori minimi e massimi stimati. Ancora una volta si osserva come le economie di densità siano tendenzialmente più basse delle economie di scala. Inoltre sono riportati i valori di output e di superficie per le osservazioni che raggiungono i valori massimi e minimi di *ES* e di *ED*. Come si può notare, l'osservazione che presenta il valore minimo in termini di economie di scala e di densità appare caratterizzata da volumi, abitanti e superficie molto grandi mentre quella che presenta il valore massimo in termini di economie di scala e densità si caratterizza per valori di output e superficie assai contenuti, coerentemente con le aspettative.

**Tabella 6. Statistiche descrittive delle Economie di Scala (ES) e di Densità (ED) puntuali**

	Media	Sta. Dev.	Min	Max
<b>ES</b>	<b>1,121</b>	<b>0,145</b>	<b>0,812</b>	<b>2,001</b>
			$Y_{DIFF} = 545.637$ (ton)	$Y_{DIFF} = 1.864$ (ton)
			$Y_{IND} = 1.210.119$ (ton)	$Y_{IND} = 466$ (ton)
			$Y_{AB} = 2.638.842$	$Y_{AB} = 8.521$
			$Y_{SUP} = 1.287$ (Km <sup>2</sup> )	$Y_{SUP} = 58$ (Km <sup>2</sup> )
<b>ED</b>	<b>1,085</b>	<b>0,141</b>	<b>0,762</b>	<b>1,744</b>
			$Y_{DIFF} = 343.493$ (ton)	$Y_{DIFF} = 1.864$ (ton)
			$Y_{IND} = 1.417.238$ (ton)	$Y_{IND} = 466$ (ton)
			$Y_{AB} = 2.782.391$	$Y_{AB} = 8.521$
			$Y_{SUP} = 1.287$ (km <sup>2</sup> )	$Y_{SUP} = 58$ (Km <sup>2</sup> )

*I prezzi sono mantenuti uguali ai valori del punto medio*

La Tabella 7 rappresenta la caratterizzazione in termini di output e superficie per diversi cluster ottenuti a partire dai valori puntuali delle misure di economie di scala e di densità. Le osservazioni sono classificate in base al livello delle economie di scala/densità e i cluster risultanti indicano la presenza di forti/deboli economie di scala/densità o assenza di economie o diseconomie.

Le osservazioni si concentrano nei cluster che presentano economie di scala/densità. Inoltre, come è possibile osservare, passando a cluster caratterizzati da crescenti coefficienti di economie di scala e di densità le

dimensioni medie delle imprese di riducono, secondo le aspettative. La Tabella 7, inoltre, riporta i valori di significatività media per ogni gruppo. All'interno del cluster con *ES* e *ED* compresi tra 0,95 e 1,05 l'ipotesi di rendimenti di scala costanti e di assenza di economie di densità non sono rigettate ( $p$  pari a 0,521 e 0,572, rispettivamente).

*Tabella 7. Economie di Scala (ES) e di Densità (ED) puntuali*

	<i>Forti Economie di Scala</i> $ES \geq 1,15$	<i>Moderate Economie di Scala</i> $1,05 \leq ES < 1,15$	<i>Assenza di Econ./Disecon.</i> $0,95 \leq ES < 1,05$	<i>Moderate Disecon. di Scala</i> $0,85 \leq ES < 0,95$	<i>Forti Diseconomie di Scala</i> $ES < 0,85$
$Y_{DIFF}$ (ton)	9568	25.680	48.406	167.038	496.553
$Y_{IND}$ (ton)	10494	25.680	55.978	208.773	1.230.669
$Y_{AB}$ (num)	50793	109.067	183.887	700.231	2.784.205
$Y_{SUP}$ (km <sup>2</sup> )	166	406	459	537	1.287
Num. Oss.	237	205	169	51	9
P value	<b>0,001</b>	<b>0,041</b>	0,521	<b>0,089</b>	<b>0,000</b>
	<i>Forti Economie di Densità</i> $ED \geq 1,15$	<i>Deboli Economie di Densità</i> $1,05 \leq ED < 1,15$	<i>Assenza di Econ./Disecon.</i> $0,95 \leq ED < 1,05$	<i>Deboli Diseconomie di Densità</i> $0,85 \leq ED < 0,95$	<i>Forti Diseconomie di Densità</i> $ED < 0,85$
$Y_{DIFF}$ (ton)	12.504	22.484	28.382	93.808	234.615
$Y_{IND}$ (ton)	6.966	23.676	48.158	190.624	645.768
$Y_{AB}$ (num)	43.723	89.087	154.659	572.453	1.576.254
$Y_{SUP}$ (km <sup>2</sup> )	144	397	389	490	565
Num. Oss.	165	217	209	60	20
P value	<b>0,006</b>	<b>0,061</b>	0,572	<b>0,021</b>	<b>0,000</b>

*Coefficienti in neretto statisticamente differenti da zero ad un livello di significatività pari almeno al 10%*

*I valori di volumi, abitanti e superficie per ogni cluster sono espressi come medie geometriche*

La Tabella 8 presenta i valori stimati delle economie di scala e di densità per diverse configurazioni output e di superficie.

Per quanto concerne la simulazione di differenti percentuali di raccolta differenziata (dati i volumi complessivi di raccolta, gli abitanti e la superficie pari al loro valore medio) si osserva in particolare un andamento crescente delle economie di densità al crescere della percentuale suddetta. In genere, percentuali superiori di raccolta differenziata sono ottenute attraverso l'applicazione di sistemi di raccolta capillare ed *environmentally friendly* come la raccolta porta-a-porta che beneficiano, più di altri, di contesti caratterizzati da maggiore densità abitativa.

La simulazione prende, poi, in considerazione l'aumento della produzione pro-capite di rifiuti dati la superficie e gli abitanti (e mantenendo inalterata, rispetto al dato medio, la percentuale di raccolta differenziata). Come si osserva, al crescere della densità dell'output, ovvero del livello di produzione individuale (per esempio come conseguenza di una maggiore vocazione turistica del territorio e quindi delle maggiori presenze di non residenti), si riducono le economie di scala. Tale effetto è legato alla dimensione dei volumi di raccolta.

Infine, vengono prese in considerazione le variazioni delle economie di scala e di densità al crescere della densità abitativa (fissati la superficie, il rapporto di produzione pro-capite e la percentuale di differenziata al

valore medio). Al crescere del rapporto di densità si riducono sia le economie di scala che di densità (passando a evidenziare forti diseconomie). Le condizioni migliori si assestano intorno ai 1.000 abitanti per km<sup>2</sup> per l'effetto di scala e a 500 abitanti per km<sup>2</sup> per l'effetto di densità.

**Tabella 8. Economie di Scala (ES) e di Densità (ED) per alcune particolari configurazioni di output**

	ES	P value	ED	P value
<i>Percentuale di differenziata <sup>a</sup>:</i>				
Y <sub>TOT</sub> = 59.214 (ton); abitanti = 114.250 (num.); superficie = 316 (Km <sup>2</sup> )				
30 (%)	<b>1,110</b>	0,000	1,014	0,566
50 (%)	<b>1,078</b>	0,000	<b>1,075</b>	0,001
70 (%)	<b>1,099</b>	0,000	<b>1,152</b>	0,000
<i>Rifiuti pro capite (Kg/Abitanti) <sup>b</sup>:</i>				
Abitanti = 114.250 (num.); superficie = 316 (km <sup>2</sup> ); quota differenz. = 43%				
400 (Kg/ab.)	<b>1,165</b>	0,000	<b>1,064</b>	0,013
500 (Kg/ab.)	<b>1,094</b>	0,000	<b>1,055</b>	0,008
600 (Kg/ab.)	<b>1,041</b>	0,095	1,048	0,112
<i>Densità abitativa (Abitanti/Superficie) <sup>c</sup>:</i>				
Superficie = 316 (Km <sup>2</sup> ); quantità pro capite = 518 (Kg/ab.); quota differenz. = 43%				
250 (ab./km <sup>2</sup> )	<b>1,121</b>	0,000	<b>1,092</b>	0,001
500 (ab./km <sup>2</sup> )	<b>1,051</b>	0,089	1,021	0,268
1.000 (ab./km <sup>2</sup> )	0,989	0,619	<b>0,960</b>	0,069
2.000 (ab./km <sup>2</sup> )	<b>0,933</b>	0,026	<b>0,905</b>	0,001
4.000 (ab./km <sup>2</sup> )	<b>0,884</b>	0,001	<b>0,856</b>	0,000
8.000 (ab./km <sup>2</sup> )	<b>0,839</b>	0,000	<b>0,812</b>	0,000

a) Valori di rifiuti totali, abitanti serviti e superficie pari ai valori medi (media geometrica)

b) Valori di abitanti serviti, superficie e percentuale di differenziata pari ai valori medi (media geometrica)

c) Valori di superficie, percentuale di differenziata e quantità di rifiuti pro capite pari ai valori medi (media geometrica)

Coefficienti in neretto statisticamente differenti da zero ad un livello di significatività pari almeno al 10%

## 7. CONCLUSIONI

In questo studio è stato applicato un modello econometrico di stima di una funzione di costo di lungo periodo al fine di misurare le economie di scala e di densità nel settore dei servizi di raccolta rifiuti in Italia. I risultati possono rappresentare utili indicazioni ai fini delle scelte in merito alla più efficiente organizzazione del settore.

Usando un panel non bilanciato di 86 imprese osservate lungo il periodo 2008-2016 sono stati stimati i coefficienti di una funzione di costo di lungo periodo con specificazione translogaritmica.

Le variabili di output utilizzate sono rappresentate, coerentemente con la letteratura, dai volumi di raccolta (distinta in differenziata e indifferenziata) e dagli abitanti serviti. Una ulteriore caratteristica dell'output, rappresentata dalla superficie del territorio servito, è stata inclusa nella stima. I fattori produttivi sono rappresentati da lavoro, capitale e carburanti (che rappresentano la voce più rilevante e significativa dei costi residuali).

Le elasticità di costo rispetto agli output sono positivi e significativi, indicando un incremento del costo nel punto medio del campione al crescere di ogni singolo output, a parità di altre condizioni. Il coefficiente relativo alla superficie è, invece, negativo e significativo. Ciò significa che il fattore di congestione agisce avvantaggiando le aree vaste con minore concentrazione della popolazione.

Si osserva come ci sia evidenza di significative economie di scala in corrispondenza al punto medio del campione, caratterizzato da 114.250 abitanti serviti su una superficie di 316 chilometri quadrati, con una produzione di rifiuti pro-capite di circa 0,5 tonnellate e una percentuale di raccolta differenziata pari a circa il 46%.

La dimensione ottimale si può dire compresa tra 228.550 e 914.000 abitanti e tra 109.150 e 436.600 tonnellate di raccolta su una superficie compresa tra 632 e 2.528 chilometri quadrati (mantenendo inalterati i rapporti tra output che caratterizzano il punto medio).

Le economie di densità sono in generale inferiori rispetto alle economie di scala. Ciò è spiegabile dall'effetto di congestione che si viene a creare in corrispondenza a situazioni territoriali caratterizzate da maggiore densità. La percentuale di raccolta differenziata, a parità di altre condizioni, incide sulle economie di densità. Si osserva, quindi, come l'adozione di sistemi di raccolta più capillari beneficino di contesti caratterizzati da maggiori densità abitativa.

La simulazione sull'impatto della densità abitativa segnala un esaurimento delle economie di densità in corrispondenza a 500 abitanti per chilometro quadrato ed un esaurimento delle economie di scala intorno ai 1.000 abitanti per chilometro quadrato. Questa differenza è ancora una volta attribuibile alle difficoltà operative legate alla congestione, che, tuttavia, rappresentano dei vincoli ambientali, specie per le imprese che offrono il servizio in aree urbanizzate.

Infine, si osserva come le economie/diseconomie di scala e di densità calcolate in corrispondenza ad alcuni valori soglia in termini di output e di superficie siano ampiamente coerenti con i valori stimati puntuali, i quali forniscono indicazioni specifiche circa l'effettiva economicità delle organizzazioni.

APPENDICE

Tabella A1. Coefficienti del modello stimato

Variabile	Parametro	Coefficiente	Std. Err.	z	P-value
$\ln(y_{diff})$	$\beta_{diff}$	<b>0,373</b>	0,053	7,100	0,000
$\ln(y_{ind})$	$\beta_{ind}$	<b>0,310</b>	0,040	7,750	0,000
$\ln(y_{ab})$	$\beta_{ab}$	<b>0,253</b>	0,080	3,150	0,002
$\ln(y_{sup})$	$\beta_{sup}$	<b>-0,031</b>	0,013	-2,320	0,021
$\ln(p_i)$	$\beta_L$	<b>0,378</b>	0,006	66,280	0,000
$\ln(p_k)$	$\beta_K$	<b>0,057</b>	0,002	34,070	0,000
$\ln(p_c)$	$\beta_C$	<b>0,565</b>	0,006	93,990	0,000
$(\ln y_{diff})^2$	$\beta_{diff2}$	<b>0,726</b>	0,107	6,780	0,000
$(\ln y_{ind})^2$	$\beta_{ind2}$	0,046	0,117	0,390	0,697
$(\ln y_{ab})^2$	$\beta_{ab2}$	<b>1,425</b>	0,438	3,250	0,001
$(\ln y_{sup})^2$	$\beta_{sup2}$	0,000	0,018	0,000	0,998
$(\ln p_i)^2$	$\beta_{L2}$	<b>-0,080</b>	0,028	-2,820	0,005
$(\ln p_k)^2$	$\beta_{K2}$	<b>0,010</b>	0,003	3,160	0,002
$(\ln p_c)^2$	$\beta_{C2}$	-0,050	0,031	-1,620	0,105
$\ln(y_{diff}) \times \ln(y_{ind})$	$\beta_{diff,ind}$	<b>0,317</b>	0,119	2,660	0,008
$\ln(y_{diff}) \times \ln(y_{ab})$	$\beta_{diff,ab}$	<b>-1,095</b>	0,218	-5,020	0,000
$\ln(y_{diff}) \times \ln(y_{sup})$	$\beta_{diff,sup}$	<b>0,183</b>	0,031	5,990	0,000
$\ln(y_{ind}) \times \ln(y_{ab})$	$\beta_{ind,ab}$	-0,275	0,208	-1,320	0,187
$\ln(y_{ind}) \times \ln(y_{sup})$	$\beta_{ind,sup}$	0,033	0,032	1,040	0,299
$\ln(y_{ab}) \times \ln(y_{sup})$	$\beta_{ab,sup}$	<b>-0,222</b>	0,051	-4,320	0,000
$\ln(p_i) \times \ln(p_k)$	$\beta_{L,K}$	0,011	0,007	1,620	0,106
$\ln(p_i) \times \ln(p_c)$	$\beta_{L,C}$	<b>0,070</b>	0,029	2,430	0,015
$\ln(p_k) \times \ln(p_c)$	$\beta_{K,C}$	<b>-0,020</b>	0,007	-2,910	0,004
$\ln(y_{diff}) \times \ln(p_i)$	$\beta_{diff,L}$	<b>-0,068</b>	0,014	-4,850	0,000
$\ln(y_{diff}) \times \ln(p_k)$	$\beta_{diff,K}$	0,006	0,004	1,510	0,130
$\ln(y_{diff}) \times \ln(p_c)$	$\beta_{diff,C}$	<b>0,062</b>	0,015	4,190	0,000
$\ln(y_{ind}) \times \ln(p_i)$	$\beta_{ind,L}$	0,016	0,013	1,220	0,221
$\ln(y_{ind}) \times \ln(p_k)$	$\beta_{ind,K}$	0,005	0,004	1,200	0,229
$\ln(y_{ind}) \times \ln(p_c)$	$\beta_{ind,C}$	-0,021	0,014	-1,500	0,135
$\ln(y_{ab}) \times \ln(p_i)$	$\beta_{ab,L}$	<b>0,072</b>	0,024	2,970	0,003
$\ln(y_{ab}) \times \ln(p_k)$	$\beta_{ab,K}$	-0,008	0,007	-1,190	0,232
$\ln(y_{ab}) \times \ln(p_c)$	$\beta_{ab,C}$	<b>-0,063</b>	0,026	-2,490	0,013
$\ln(y_{sup}) \times \ln(p_i)$	$\beta_{sup,L}$	<b>-0,027</b>	0,005	-5,740	0,000
$\ln(y_{sup}) \times \ln(p_k)$	$\beta_{sup,K}$	<b>0,005</b>	0,001	3,890	0,000
$\ln(y_{sup}) \times \ln(p_c)$	$\beta_{sup,C}$	<b>0,022</b>	0,005	4,380	0,000
Incen	$\beta_{INC}$	<b>0,227</b>	0,050	4,560	0,000
Disc	$\beta_{DISC}$	<b>0,172</b>	0,032	5,410	0,000
Costante	$\beta_0$	<b>-0,198</b>	0,031	-6,390	0,000

Coefficienti in neretto statisticamente differenti da zero ad un livello di significatività pari almeno al 10%

## BIBLIOGRAFIA

- Abrate, G., Erbetta, F., Fraquelli, G., & Vannoni, D. (2014a). The costs of disposal and recycling: an application to Italian municipal solid waste services. *Regional Studies*, 48(5), 896-909.
- Abrate, G., Erbetta, F., Fraquelli, G., & Vannoni, D. (2014b). Size and density economies in refuse collection. *Handbook on Waste Management*, 416.
- Antonioli, B., & Filippini, M. (2002). Optimal size in the waste collection sector. *Review of Industrial Organization*, 20(3), 239-252.
- Bel, G., & Fageda, X. (2010). Empirical analysis of solid management waste costs: Some evidence from Galicia, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(3), 187-193.
- Bohm, R. A., Folz, D. H., Kinnaman, T. C., & Podolsky, M. J. (2010). The costs of municipal waste and recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 864-871.
- Byrnes, J., Dollery, B., & Webber, A. (2002). Measuring economies of scale in Australian local government: The case of domestic waste collection in NSW. *Australasian Journal of Regional Studies*, 8(2), 201-217.
- Callan, S. J., & Thomas, J. M. (2001). Economies of scale and scope: A cost analysis of municipal solid waste services. *Land economics*, 77(4), 548-560.
- Carvalho, P., & Marques, R. C. (2014). Economies of size and density in municipal solid waste recycling in Portugal. *Waste management*, 34(1), 12-20.
- Carvalho, P., Marques, R. C., & Dollery, B. (2015). Is bigger better? An empirical analysis of waste management in New South Wales. *Waste management*, 39, 277-286.
- Christensen, L.R., Jorgenson, D.W, & Lau, L.J. (1971). "Conjugate duality and the transcendental logarithmic production function". *Econometrica*, 39(4), 225-256
- Diewert, W. E. (1974). Applications of Duality Theory, in M. D. Intriligator and D.A. Kendrick (eds.), *Frontiers in Quantitative Economics*, Vol II, 106-71, Amsterdam: North-Holland.
- Greene, W. (2005). Reconsidering heterogeneity in panel data estimators of the stochastic frontier model. *Journal of econometrics*, 126(2), 269-303.
- Guerrini, A., Carvalho, P., Romano, G., Marques, R. C., & Leardini, C. (2017). Assessing efficiency drivers in municipal solid waste collection services through a non-parametric method. *Journal of Cleaner Production*, 147, 431-441.
- Hirsch, W. Z. (1965). Cost functions of an urban government service: refuse collection. *The Review of Economics and statistics*, 87-92.
- Kmenta, J., & Rafailzadeh, B. (1997). *Elements of econometrics*. University of Michigan Press.
- Morse, W. F. (1908). *The collection and disposal of municipal waste*. Municipal Journal and Engineer, New York.

Simões, P., De Witte, K., & Marques, R. C. (2010). Regulatory structures and operational environment in the Portuguese waste sector. *Waste management*, 30(6), 1130-1137.

Simões, P., & Marques, R. C. (2012). On the economic performance of the waste sector. A literature review. *Journal of environmental management*, 106, 40-47.

Zellner, A. (1962). An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. *Journal of the American statistical Association*, 57(298), 348-368.