

Documentos CEDE

ISSN 1657-5334

Estrategia sobre ubicación y funcionamiento de
estaciones de transferencia para el manejo
de residuos sólidos en Colombia

Jorge Andrés Perdomo Calvo
Juan Andrés Ramírez

31

NOVIEMBRE DE 2010

Serie Documentos Cede, 2010-31
ISSN 1657-5334

Noviembre de 2010

© 2010, Universidad de los Andes–Facultad de Economía–Cede
Calle 19A No. 1 – 37, Bloque W.
Bogotá, D. C., Colombia
Teléfonos: 3394949- 3394999, extensiones 2400, 2049, 3233
infocede@uniandes.edu.co
<http://economia.uniandes.edu.co>

Ediciones Uniandes
Carrera 1ª Este No. 19 – 27, edificio Aulas 6, A. A. 4976
Bogotá, D. C., Colombia
Teléfonos: 3394949- 3394999, extensión 2133, Fax: extensión 2158
infeduni@uniandes.edu.co

Edición, diseño de cubierta, pre prensa y prensa digital:
Proceditor Ltda.
Calle 1ª C No. 27 A – 01
Bogotá, D. C., Colombia
Teléfonos: 2204275, 220 4276, Fax: extensión 102
proceditor@etb.net.co

Impreso en Colombia – *Printed in Colombia*

El contenido de la presente publicación se encuentra protegido por las normas internacionales y nacionales vigentes sobre propiedad intelectual, por tanto su utilización, reproducción, comunicación pública, transformación, distribución, alquiler, préstamo público e importación, total o parcial, en todo o en parte, en formato impreso, digital o en cualquier formato conocido o por conocer, se encuentran prohibidos, y sólo serán lícitos en la medida en que se cuente con la autorización previa y expresa por escrito del autor o titular. Las limitaciones y excepciones al Derecho de Autor, sólo serán aplicables en la medida en que se den dentro de los denominados Usos Honrados (Fair use), estén previa y expresamente establecidas; no causen un grave e injustificado perjuicio a los intereses legítimos del autor o titular, y no atenten contra la normal explotación de la obra.

ESTRATEGIA SOBRE UBICACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE ESTACIONES DE TRANSFERENCIA PARA EL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN COLOMBIA

Jorge Andrés Perdomo Calvo[†],
jor-perd@uniandes.edu.co

Juan Andrés Ramírez^{†*}
Aramirez@cra.gov.co

Resumen

El Artículo 1o del Decreto 1713 de 2002 definió como uno de los componentes y actividades del servicio público domiciliario de aseo, la transferencia de residuos sólidos previo a su disposición final. Entre tanto, a partir de septiembre de 2005 y abril de 2009 comienzan a operar las estaciones de transferencia del Valle de Aburra y Palmaseca, respectivamente; convirtiéndose en las dos únicas alternativas del país para realizar este tipo de práctica. Adicionalmente, en Bogotá fue clausurada una de ellas y actualmente se debate la viabilidad de este proyecto en diferentes zonas del país.

Por consiguiente, teniendo en cuenta la utilidad de este tipo de infraestructura, necesarias para el aprovechamiento de economías de escala asociadas a la prestación del servicio público de aseo, el presente trabajo busca estimar el tamaño de mercado y distancia óptima al relleno sanitario, a partir de la cual es viable contar con estaciones de transferencia (ET) para el manejo de residuos sólidos en Colombia. Estas estimaciones se realizaron mediante la metodología diferencias en diferencias, a través de un modelo de datos panel con efectos aleatorios y análisis estático comparativo de optimización matemática. Esta técnica, permitió comparar el comportamiento de los costos totales de producción durante 2006 a 2008 entre firmas recolectoras de residuos sólidos que cuentan o no con ET.

Entre los principales resultados, se destaca que un mercado capaz de generar un monto mayor o igual a 162 toneladas de residuos sólidos día, debe contar con una o más ET para minimizar los costos variables unitarios de la firmas. Igualmente, las empresas que implementan estaciones de transferencia tienen un incremento representativo en sus costos fijos unitarios anuales, ascendiéndolos a 149.970 pesos (412 pesos día); en comparación con firmas que no llevan a cabo este tipo de proyectos.

Finalmente, en Colombia la distancia óptima de referencia donde debe ubicarse una estación de transferencia es 34,51Km, contados a partir del área centroide donde se presta el servicio; dado que en este punto cruzan los costos unitarios anuales de producción para las firmas con y sin ET.

[†] Facultad de Economía, Universidad de los Andes, Colombia, e-mail: jor-perd@uniandes.edu.co

[†] Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), Colombia, e-mail: Aramirez@cra.gov.co

* Corresponde a los autores: la opinión y resultados de los autores no compromete el pensamiento y estudios técnicos realizados en el tema por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y todo lo plasmado en el presente documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no de la CRA.

Adicionalmente, si el sitio de disposición final para residuos sólidos se encuentra a una distancia mayor de 34,51Km, es indispensable que las compañías prestadoras del servicio construyan ET para que puedan ser costo eficiente. Disminuyendo así, sus gastos unitarios variables mediante el uso de transporte a granel en lugar de camiones recolectores para trasladar directamente los residuos sólidos al relleno sanitario.

Palabras clave: manejo de residuos sólidos, estaciones de transferencia, tamaño óptimo de mercado, distancia óptima del relleno sanitario, datos panel, efectos aleatorios, diferencias en diferencias, análisis estático comparativo de optimización matemática.

Clasificación JEL: Q53, R42, R48, R53, C01, C02.

STRATEGY FOR LOCATION AND OPERATING OF THE SOLID WASTE TRANSFER STATION IN COLOMBIA

Abstract

This paper contributes to the study of solid waste management through transfer stations in Colombia. Using the panel data, differences and differences model, comparative static analysis mathematical optimization and the available data in the Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI, 2006, 2007 and 2008, name and abbreviation in Spanish). Thus, the estimated solid waste quantity is 162 tons/daily and the transfer station localization would be to 34.51km from the departure centroid. Therefore, when the around-trip hauling distances exceeds 34.51 km at landfill and market has 162 tons/daily or more solid waste, the metropolitan areas must to install transfer stations.

Key word: solid waste management, transfer stations, data panel, differences and differences, comparative static analysis mathematical optimization.

JEL Classification: Q53, R42, R48, R53, C01, C02.

I. Introducción

Actualmente la Resolución 351 de 2005, expedida por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), “*establece los regímenes de regulación tarifaria a los que deben someterse las personas prestadoras del servicio público de aseo y la metodología que deben utilizar para el cálculo de las tarifas del servicio de aseo de residuos ordinarios y se dictan otras disposiciones*”. Esta resolución contiene señales que promueven la regionalización e incentivos para la implementación de soluciones que utilicen como tecnología de referencia para el transporte excedente la transferencia y transporte a granel de residuos sólidos.

Lo anterior, teniendo en cuenta que el Artículo 1o del Decreto 1713 de 2002 definió como uno de los componentes y actividades del servicio público domiciliario de aseo, la transferencia de residuos sólidos previo a su disposición final. Entre tanto, a partir de septiembre de 2005 y abril de 2009 inicia la operación de las estaciones de transferencia¹ del Valle de Aburra y Palmaseca, respectivamente; convirtiéndose en las dos únicas alternativas del país para realizar este tipo de práctica. Adicionalmente, en Bogotá fue clausurada una de ellas y actualmente se debate la viabilidad de este proyecto en diferentes zonas del país.

Ante esto, y con el fin de evaluar las actividades de transferencia para residuos sólidos en Colombia, mediante la construcción y operación de estaciones de transferencia, el presente estudio tiene como objetivo principal estimar el tamaño de mercado y distancia óptima al relleno sanitario, a partir del cual es viable contar con estaciones de transferencia para el manejo de residuos sólidos en Colombia. Lo anterior, mediante la metodología diferencias en diferencias, a través de un modelo de datos panel con efectos aleatorios y análisis estático comparativo de optimización matemática.

Igualmente, para el desarrollo de este documento se llevó a cabo una revisión de fuentes de información y estudios nacionales e internacionales entre los que se destacan: i) guías para establecer estaciones de transferencia a nivel municipal y rural, ii) literatura evidenciando sus principales ventajas y desventajas, iii) el documento “Metodologías de costos y tarifas para el servicio público de aseo, 2005” presentado y realizado por la consultoría de la firma Econometría, iv) el análisis de información suministrada a la CRA dentro del desarrollo de actuaciones particulares, y v) la información reportada en Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI).

Con el fin de cumplir el objetivo del estudio, el documento se encuentra dividido en seis secciones: la primera presenta el aspecto introductorio. La segunda corresponde al marco teórico y revisión de literatura. En la tercera, se presenta la metodología analítica llevada a cabo; la cuarta sección corresponde al proceso de recolección de datos, en la quinta se encuentra la evidencia empírica o

¹ Entendiéndose como el conjunto de equipo e instalaciones donde se realiza el transbordo de residuos sólidos, desde camiones recolectores a otros con mayor capacidad de carga para llevarlos al sitio destino o relleno sanitario. Estos sitios pretenden incrementar la eficiencia en los servicios de manejo de residuos sólidos, a través de la reducción en sus tiempos de transporte (Sánchez y Estrada, 1996, 7).

resultados e interpretación de las estimaciones. La sección seis contiene las conclusiones y finalmente en la siete se encuentran las referencias empleadas.

II. Perspectiva desde la economía de transporte, estudios relacionados y estaciones de transferencia para residuos sólidos

Según la guía para establecer estaciones de transferencia de residuos sólidos municipales (Guidelines for Establishing Transfer Stations for Municipal Solid Waste, *nombre en inglés*), éstas son concebidas como una solución costo eficiente al manejo, recolección y transporte de residuos sólidos cuando se generan grandes cantidades en áreas urbanas y el tramo para trasladarlos, entre el sitio origen y destino, es extenso. Desde una perspectiva conceptual, la construcción de estaciones de transferencia puede justificarse en las siguientes razones:

- **Económica:** si existe una distancia relativamente amplia entre el lugar origen (sitio de recolección) y destino (rellenos sanitarios), puede ser económicamente viable construir estaciones de transferencia que permitan transbordar residuos sólidos entre vehículos de menor (recolectores) a mayor capacidad (tractomulas, trenes o barcos). De esta forma, los costos incurridos para transportarlos disminuyen por evitar que los camiones recolectores los trasladen directamente al relleno; como consecuencia del ahorro en tiempo de viaje e incremento de la vida útil de los vehículos recolectores.
- **Servicio:** específicamente este concepto va dirigido a zonas rurales donde no cuenten con servicio de recolección y transporte de residuos sólidos por: limitaciones geográficas, área de difícil acceso, ausencia de vías adecuadas a estos sitios, entre otros. De esta forma, las estaciones de transferencia proveen el servicio a sus residentes rurales locales con dichas condiciones; evitando que ellos utilicen otros medios de transporte inadecuados para conducirlos al relleno o manipularlos indebidamente para su disposición final.

No obstante, la consideración económica prevalece en el momento de decidir la existencia de una o más estaciones de transferencia (ET) para una determinada zona o municipio. Asimismo, lo ideal es ubicar este tipo de proyectos relativamente cerca al centroide² de la población servida o sobre la ruta que conduce al relleno sanitario, para minimizar costos de recolección y transporte; asumiendo, que es situado en un lugar con las condiciones ambientales requeridas, evitando riesgos sobre la salud humana e incomodidades a la sociedad. A continuación se esquematiza el comportamiento de los costos bajo un escenario sin y con ET.

A. Evolución de los costos de transporte de residuos sólidos al relleno sanitario con y sin estaciones de transferencia (ET)³ y estudios relacionados

La razón económica es la principal causa para que existan estaciones de transferencia (ET), especialmente por la propensión hacia las economías crecientes de escala (menores costos de transporte desde el origen hasta el destino) que ellas generan en la prestación del servicio. Por consiguiente, el análisis de costos unitarios para el transporte de residuos sólidos ayuda a

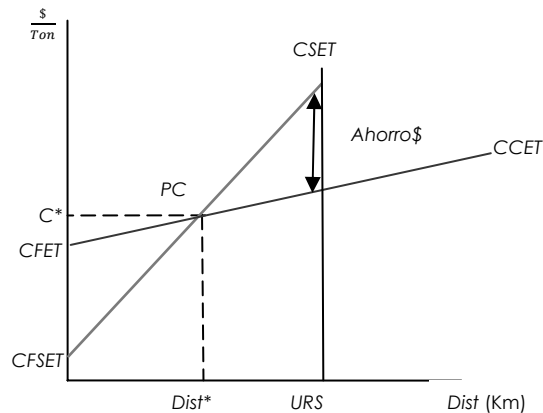
² Entendiéndose como el punto de partida donde el vehículo recolector totalmente cargado de residuos sólidos, emprende su viaje hacia su destino final (rellenos sanitario o estación de transferencia).

³ Véase más detalles en EPA (*siglas en inglés*), United States Environmental Protection Agency (2001).

determinar cuál es la distancia óptima donde debe ubicarse una ET, dado el trayecto a recorrer entre el centroide de origen (en la cabecera municipal) y el relleno sanitario, de manera que las compañías prestadoras del servicio incurran en menores costos de producción, logren mayor eficiencia económica y obtengan un nivel más alto en sus ganancias. De esta manera, se aprecian las economías crecientes a escala que generan las ET por: i) disminuir el tiempo de viaje (incluido el improductivo), ii) menores costos de operación y mantenimiento para los vehículos recolectores, iii) aumento en la vida útil de ellos y iv) requerir menos mano de obra.

Por tanto, la distancia adecuada ($Dist^*$) para establecer una ET, entre el centroide origen y el relleno sanitario, puede obtenerse estimando el punto de corte (PC) entre las curvas de costos con ET ($CCET$) y transporte directo al sitio de disposición final (ubicación del relleno sanitario, URS , véase gráfica uno) con vehículos de recolección ($CSET$, costos sin ET). Así, la gráfica uno describe el comportamiento hipotético de los costos cuando se cuenta o no con el proyecto. Donde, el eje Y representa el valor monetario total incurrido por tonelada (Ton) o costo unitario de producción de prestar el servicio y el eje X la variable independiente distancia ($Dist$ en Kilómetros). Sin embargo, otros autores reemplazan esta última por tiempo de viaje (en minutos), de tal forma que el cruce de las dos curvas indica la duración máxima (generalmente 30 minutos) requerido para llegar a una ET, como otro indicador para situar el proyecto.

Gráfica 1. Análisis de costos para ET a lo largo del recorrido entre el centroide de recolección y relleno sanitario.



Fuente: Ouano (1983,2).

Los costos unitarios totales ($\$/Ton$) para estimar ambas curvas son definidos mediante la ecuación uno; donde α (intercepto) se refiere a los costos fijos unitarios ($\$/Ton$) para cada caso, β_1 la constante que acompaña la distancia recorrida entre el centroide de origen y relleno sanitario ($Dist$) y ε el término aleatorio o error del modelo. La expresión uno corresponde a una función lineal para ejemplificar el ahorro obtenido por ET.

$$\frac{\$}{Ton} = \alpha + \beta_1 Dist + \varepsilon \quad (1)$$

La expresión uno, puede estimarse econométricamente mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y a partir del resultado es posible encontrar la distancia óptima ($Dist^*$) donde debe ubicarse

la estación de transferencia. Además de la distancia adecuada para ubicar una ET, es necesario tener en cuenta otros factores técnicamente relevantes como: ambientales, económicos, sociales y políticos; basados en los criterios de exclusión, técnicos y específicos de la comunidad potencialmente afectada por la construcción de una ET. En Colombia, se presentan generalmente otros factores que deben ser considerados como adicionales a los descritos, entre los cuales se destacan las condiciones viales y presencia de peajes, razones a incluir en las funciones de costos expuestas en las ecuaciones ocho y nueve.

Finalmente, y a manera de referencia, la evidencia señala que rellenos ubicados por encima de los 20 a 40 Km (Malarin y Vaughan, 1997, 11) o entre 30 y 60 minutos de recorrido (en Melbourne-Australia, véase Victorian Government Department of Sustainability and Environmental, 2009, 8, parte 3, nombre en inglés) necesitan apoyarse en una ET para disminuir los costos de recolección y transporte de residuos sólidos; distancia y tiempo determinado a partir del cruce señalado en la gráfica uno, el cual diagnostica la viabilidad de ET.

Por otra parte, y de acuerdo con estimaciones realizadas por United States Environmental Protection Agency (2001, 9), 100 toneladas diarias de residuos sólidos es el monto mínimo requerido para operar una estación de transferencia tipo descarga directa con aumento en capacidad; teniendo en cuenta el crecimiento poblacional, agrícola e industrial de una zona, dado que esta clase de ET, son las más económicas de implementar.

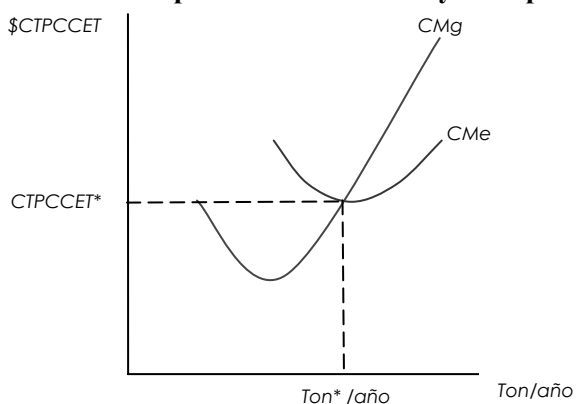
Asimilando estos mismos criterios, la Guidelines for Establishing Transfer Stations for Municipal Solid Waste (2005) describe el comportamiento desagregado de costos para estaciones de transferencia que tienen capacidad de recibir hasta 10.000 toneladas/año, 192 toneladas/semana (10.000/52 semanas) o 38,5 toneladas/día (192/5 días). No obstante este valor puede variar de acuerdo con las condiciones del mercado atendido, siempre que garantice la ocupación de los vehículos de transferencia disponibles.

En el mismo sentido, según UNEP (*United Nations Environment Programme*, 2005, 94-108, siglas *en inglés*), antes de tomar la decisión de realizar una estación de transferencia es importante y esencial realizar cuidadosamente un análisis beneficio costo económico y financiero; y con los resultados del mismo determinar la viabilidad del proyecto. Así, la ET debe ser únicamente implementada cuando los costos de transporte directo hasta el relleno sanitario en los vehículos de recolección supera representativamente a los incurridos con transporte a granel apoyado en una ET y sus ahorros de implementación resulten significativos.

B. Análisis de costos de producción de transporte y tamaño del mercado a partir del cual es viable contar con estaciones de transferencia

Aunque marcos teóricos y guías desarrolladas en el ámbito internacional, para establecer estaciones de transferencia, enfatizan sobre la importancia de la distancia desde el centroide hasta el relleno sanitario como la principal variable que determina la existencia o no de una ET; también es primordial calcular previamente el tamaño del mercado óptimo (*Ton*/año*) a partir del cual es viable contar con una ET.

Gráfica 2. Cantidad óptima de recolección y transporte de residuos sólidos.



Fuente: los autores.

Así, la cantidad apropiada de residuos sólidos a recolectar puede obtenerse mediante un análisis de costos total de producción de transporte con ET (*CTPCCET*, véase gráfica dos), a través del cruce entre el costo marginal (*CMg*) y medio (*CMe*). En este punto, se establece la carga mínima (*Ton*/año*) generadora del menor costo que garantiza la viabilidad de una ET para el oferente del servicio de transporte y recolección de residuos sólidos; con cantidades inferiores a este valor, el *CMe* superaría el *CMg* generando pérdidas para los transportadores.

$$CTPCCET = f(Ton) \quad (2)$$

$$CTPCCET = \beta_0 + \beta_1 Ton \quad (3)$$

$$CTPCCET = \beta_0 + \beta_1 Ton - \beta_2 Ton^2 \quad (4)$$

$$CTPCCET = \beta_0 + \beta_1 Ton - \beta_2 Ton^2 + \beta_3 Ton^3 \quad (5)$$

La ecuación dos, exhibe la función de costo total (*CTPCCET*) determinada por el monto (*Ton*), la cual puede obtenerse mediante una aproximación lineal, cuadrática o cúbica como se encuentran en las ecuaciones tres, cuatro y cinco, respectivamente. Donde, β_0 es el intercepto de modelo y representa los costos fijos de producción con ET, β_1 , β_2 y β_3 los parámetros que acompañan a *Ton* en su forma lineal, cuadrática y cúbica para cada modelo.

$$CMg = \beta_1 - 2\beta_2 Ton + 3\beta_3 Ton^2 \quad (6)$$

$$CMe = \frac{\beta_0}{Ton} + \beta_1 - \beta_2 Ton + \beta_3 Ton^2 \quad (7)$$

Las ecuaciones seis y siete describen los costos marginales (*CMg*) y medios (*CMe*) obtenidos de la función cúbica de costos total en la ecuación cinco. Igualando estas dos, se obtiene el valor de *Ton** que indica el tamaño de mercado a partir del cual es viable contar con una estación de transferencia. Finalmente, como conclusión de lo anterior, existen estudios en el ámbito internacional con aplicaciones lineales (mediante MCO) para determinar la distancia óptima donde debería ubicarse un relleno sanitario con el fin de instalar o no ET, en Colombia aún no se ha realizado este ejercicio.

En cuanto a la cantidad de residuos sólidos adecuada que debería generar un área servida, con el fin de determinar la viabilidad económica para operar ET, no existen estudios teóricos o empíricos (nacionales e internacionales) aplicando la metodología propuesta en este estudio a partir del análisis de *CMg* y *CMe*; en Colombia se convierte en la primera propuesta metodológica y primer estudio empírico sobre el tema.

III. Metodología analítica

A continuación se describe la metodología, con el objetivo de estimar la distancia óptima al relleno sanitario y tamaño de mercado, a partir de la cual es viable contar con estaciones de transferencia para el manejo de residuos sólidos en Colombia. Para esto, se utiliza la información disponible en el Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI), donde se encuentra disponible datos de las variables descritas en la sección anterior para 260 empresas; en distintos momentos del tiempo (2006, 2007 y 2008). Dadas las características de la información, y con el fin de estimar los costos totales y unitarios con y sin ET, la aproximación se realizará mediante datos panel y análisis de diferencias en diferencias, descritas a continuación.

A. Modelos con datos panel

Datos panel es un método generalmente utilizado en econometría cuando se cuenta con información de corte transversal a través del tiempo. En otras palabras, teniendo observaciones de los mismos individuos (empresas) en distintos periodos. Las 260 empresas equivalen al corte transversal y los años de muestra (2006, 2007 y 2008) para las mismas, corresponden a las series de tiempo en el modelo de datos panel propuesto en la ecuación ocho.

$$Y_{it}(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{X}_{it}, \varepsilon_{it}) = f(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{X}_{it}, \varepsilon_{it}) \quad (8)$$

$i = \text{empresa 1, empresa 2, ..., empresa 260}$, según SUI.

$t = 2006, 2007, \text{ y } 2008$. Periodos de análisis para los individuos (empresas, según SUI) anteriores i .

Esta expresión corresponde a la representación general de la estructura panel, donde Y_{it} distingue la variable dependiente (costos de producción totales y unitarios), \mathbf{X}_{it} (distancia, *Ton*, variables cualitativas dicótomas) las independientes, $\boldsymbol{\beta}$ los parámetros y ε_{it} el término del error del modelo. Por otra parte, los modelos panel se caracterizan por ser: no balanceados, cuando las observaciones individuales difieren al tamaño de la muestra establecidas en el tiempo (información incompleta) o balanceados, a cada individuo le corresponde una unidad de tiempo (información completa); esta última, corresponde a los datos del estudio por contar con información completa. Además de las características anteriores, se distinguen tres procedimientos fundamentales, en este tipo de modelos, método agrupado (pooled data, palabras en inglés), efectos fijos y aleatorios. Es importante señalar a que categoría se ajustan los datos empleados, para obtener estimadores insesgados y eficientes. Con ellos determinar el verdadero impacto de las estaciones de transferencia sobre los costos de producción y así tomar decisiones de política correctas, de acuerdo a los resultados.

Debido a las diferencias en tamaños entre empresas, de acuerdo a la cantidad de toneladas de residuos generadas en el mercado servido, y que dos de ellas cuentan con estaciones de transferencia (Palmaseca y Valle de Aburra, a partir de abril de 2009 y septiembre de 2005, en los municipios de Cali y Medellín) los estimadores deben ser obtenidos a través de efectos fijos (EF) o aleatorios (EA)⁴. Adicionalmente, es importante comprender los modelos de datos panel con el fin de realizar análisis mediante diferencias en diferencias; y así, validar el impacto sobre los costos obtenidos con ET y el tamaño de mercado para el cual es viable contar con este proyecto.

⁴ Ver más detalles en Rosales, Perdomo, Morales y Urrego, (2010) y Greene (1999).

B. Diferencias en diferencias

La metodología diferencias en diferencias busca evaluar el impacto de una política o suceso sobre la variables dependiente (costos de producción totales o unitarios) por empresa. Este enfoque, ayuda a comprender en el estudio como han cambiado los costos de producción totales en las firmas por contar con ET; en Colombia entre 2006 y 2008. La variable (binaria) de política la determina el año para cada fase implementada (2006, 2007 y 2008 para el Valle de Aburra y 2008 Palmaseca), tomando valor de cero durante el 2006, 2007 y 2008 en firmas que no han implementado el proyecto (situación sin proyecto, sp) y señalado con uno en el 2008 (D_t) para la empresa en Cali (D_{cp}) con ET, igualmente este valor durante el 2006, 2007 y 2008 (D_t) en Medellín (D_{cp}) que también cuenta con proyecto (CP).

$$Y_{it} = \alpha_0 + \beta_1 x_{it} + \beta_2 D_{cp} x_{it} + \alpha_1 D_{cp} + \alpha_2 D_t + \gamma D_{cp} D_t + w_{it} \quad (9)$$

$$\gamma = (\bar{c}p_{t,cp} - \bar{c}p_{t,sp}) - (\bar{c}p_{t-1,cp} - \bar{c}p_{t-1,sp})$$

De esta forma, la ecuación nueve representa el modelo lineal general para el estimador (γ) diferencias en diferencias en un modelo de datos panel con efectos aleatorios. Donde γ evidencia si el cambio en los costos fijos de producción (totales o unitarios, α_0) es significativo o no con el proyecto ET y en cuanto posiblemente se incrementaron, a partir del mismo. Mostrando la diferencia en costos de producción promedio ($\bar{c}p$) con proyecto (p) y sin este (sp), $(\bar{c}p_{it,p} - \bar{c}p_{it,sp}) - (\bar{c}p_{it-1,p} - \bar{c}p_{it-1,sp})$ ⁵. Aunque la forma funcional lineal se expone de manera general, la función de costos puede estar asociada a una cuadrática o cúbica como las expuestas en las ecuaciones cuatro y cinco.

$$\frac{\partial y_{it}}{\partial x_{it}} = \beta_1 + \beta_2 D_{cp} \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 y_{it}}{\partial x_{it}^2} = -2\beta_2 \quad (11a) \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 y_{it}}{\partial x_{it}^2} = -2\beta_2 + 6\beta_3 x_{it} \quad (11b)$$

Asimismo, el cambio marginal en los costos totales -o unitarios- (y_{it}) ocasionado por la variable independiente (Ton o distancia, x_{it}), según el caso, puede diferir entre empresas con proyecto y sin ET. Así, en la ecuación 10 son establecidos dichos efectos marginales (condiciones de primer orden) para la expresión nueve y con ellos, es posible determinar la cantidad óptima de la variable independiente que minimiza los costos. De esta forma, β_1 es la contribución marginal de x_{it} en y_{it} para firmas sin ET y $\beta_1 + \beta_2$ la de las compañías con proyecto.

Por otra parte, esta diferencia también ayuda a determinar el ahorro que ocasiona una ET en los costos totales de producción cuando se evalúa la distancia óptima donde debe ubicarse la misma o el relleno sanitario cuando no requiere establecer una ET. Igualmente bajo una forma funcional cuadrática o cúbica (véase ecuaciones cuatro y cinco) puede determinarse, mediante condiciones de

⁵ Ver más detalles Wooldrige (2001) y Rosales, Perdomo, Morales y Urrego, (2010).

segundo orden, el punto de convexidad donde se obtiene el mínimo costo (véase ecuación 11a y 11b).

IV. Proceso de recolección de los datos

En esta sección se detalla la recolección de información, su tratamiento y relación entre las variables costos totales (con ET y sin ET) y producción de transporte de residuos sólidos en Colombia. A partir de lo anterior y acorde con la información obtenida, se evidencia con la metodología analítica anterior (datos panel con EA y análisis diferencias en diferencias) la distancia óptima entre el centroide y relleno sanitario que genera el mínimo costo de producción; igualmente el tamaño de mercado a partir del cual es viable contar con estaciones de transferencia.

Los datos para este estudio fueron conseguidos de la información secundaria reportada por las empresas de aseo en Colombia al Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI). Donde se encuentran los aspectos financieros y balances más destacados de las empresas, mediante el cual se determinaron y agregaron los costos fijos y variables de producción de transporte y recolección de residuos; con el fin de conformar los costos totales de producción, en pesos, a partir del Plan Único de Cuentas (PUC). Implícitamente esta información, contiene los aspectos sobre el valor incurrido por el pago de peajes acorde con la cantidad de ejes del camión, consumo de combustibles, mantenimiento y depreciación de los vehículos (recolectores y a granel); rubro que refleja las condiciones viales y tiempos en el recorrido enfrentados por cada firma.

Igualmente, en el SUI se establece la distancia en kilómetros recorrido entre el centroide o cabecera municipal y el relleno sanitario, distancia en kilómetros recorrido en la actividad de recolección de residuos al interior del municipio o área servida. También, es discriminada periódicamente (mensual y anualmente) por empresa las toneladas de residuos sólidos recolectadas y depositadas, el tamaño de la empresa dado el número de usuarios por municipio.

La información específicamente de cada empresa dedicada al transporte y recolección es detallada sobre 2.111 firmas, pero sólo se cuenta con datos completos para los años 2006, 2007 y 2008; no obstante, unificando cada uno de los módulos correspondientes en el SUI se obtuvo una muestra de 776 bajo información completa, en las variables mencionadas, resultados de agruparlas en datos panel; para los años 2006, 2007 y 2008 de 260 empresas.

Por otra parte, los costos totales fueron deflactados a precios de 2008 y discriminados mediante variables cualitativas dicótomas por empresa, municipio y año con valores de cero (sin ET) y uno (con ET)⁶; aprovechando la presencia y experiencia de las estaciones de transferencia ubicadas en Palmaseca y Valle de Aburra (a partir de abril de 2009 y septiembre de 2005, en los municipios de Cali y Medellín). Permitiendo así, determinar mediante el método diferencias en diferencias el impacto del proyecto ET sobre los costos de producción de recolección y transporte (CTP) para residuos sólidos en Colombia; efectuado a través de un modelo de datos panel con efectos aleatorios.

⁶ Para más detalles de este tratamiento véase sección cinco (análisis resultados).

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas para CTP y Ton.

Variable	Nº de Observaciones	Promedio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Costos total de producción/año	776	3.070'000.000	11.900'000.000	92.936.45	33.000'000.000
Costos unitario (\$/Ton_año)	774	263.112.20	1.540.128.00	82.42	35.000.000.00
Distancia desde el centroide de partida hasta el relleno sanitario en Km	776	32.26	42.68	0	250.00
Toneladas transportadas (Ton/año) entre el centroide de partida hasta el relleno sanitario	776	43.376.89	306.627.70	0	6.412.812.00

Fuente: cálculo de los autores con la información del SUI.

Una vez agrupada la información, el cuadro uno contiene las estadísticas descriptivas para CTP, distancia y Ton empleadas en el estudio. Los costos totales de producción promedio incurridos por cada firma anualmente ascendieron a 3.070 millones de pesos, los valores unitario de este rubro alcanzó un promedio de 263.112 pesos en el mismo periodo, con una distancia de 32,26 Km promedio y 43.377 toneladas año.

V. Resultados obtenidos

Con el fin de cuantificar la distancia óptima al relleno sanitario y tamaño de mercado a partir del cual es viable contar con estaciones de transferencia, que genera el mínimo costo de producción en el servicio de transporte y recolección de residuos sólidos en Colombia, las estimaciones fueron realizadas mediante modelos de datos panel con efectos aleatorios, de acuerdo a la relación especificada en la ecuación uno. Así, en el cuadro dos y las ecuaciones 11 y 12 pueden apreciarse la relación entre los costos unitarios totales de producción sin y con estaciones de transferencia y la distancia recorrida (centroide y relleno sanitario).

$$CU_{itce} = (176007 + 149970) - (512 + 4346)Km_{it} \quad (11)$$

$$CU_{itset} = 176007 - 512Km_{it} \quad (12)$$

Cuadro 2. Modelo de costos unitarios por tonelada con (CU_{cet}) y sin estaciones de transferencia (CU_{set}).

Modelo de costos unitarios a precios constantes de 2008			
Variable dependiente	Costos unitario (\$/Ton-año)		
	Coefficiente	Efecto Marginal sin ET	Efecto Marginal con ET
Distancia desde el centroide de partida hasta el relleno sanitario en Km	(-511.7417)*	-511.74	-4857.92
Variable empresa con ET (cualitativa binaria con valor de uno si la empresa tiene ET y cero sin ET)	149969.8***		
Variable empresa con ET combinada con Km	(-4346.183)***		
Empresa grande (cualitativa binaria con valor de uno si es grande y cero mediana o pequeña)	(-129946.9)***	-	-
Empresa mediana (cualitativa binaria con valor de uno si es mediana y cero grande o pequeña)	(-120469.4)**		
Costo unitario rezagado un periodo (t-1)	0.5217257***		
Intercepto	176007.3***	-	-
Coefficiente de determinación R2		0.8458	
Número de observaciones		500	
Distancia óptima que minimiza los costos unitarios con ET/Km		34.51	
Ahorro unitario con ET por Km adicional a 34.51 Km		\$ 4.346.18	

Variable estadísticamente significativa a (*) 10%, (**) 5% y (***) 1%; estimación en Stata.

Fuente: cálculo de los autores con la información del SUI.

Continuando la interpretación, y conforme con lo presentado en la metodología sobre diferencias en diferencias, las empresas que implementan ET tienen un impacto representativo en sus costos fijos unitario anuales de 149.970⁷ pesos aproximadamente; valor superior para el mismo rubro en firmas que no llevan a cabo este tipo de proyectos. Por otra parte, igualando las ecuaciones 9 y 10 se obtiene la cantidad óptima de Km (Km^*) que minimiza los costos totales unitarios anuales de producción, correspondiente a 34,51Km. Con este valor, puede determinarse como la distancia óptima de referencia donde debe ubicarse una estación de transferencia en Colombia.

⁷ Corresponde al valor del parámetro γ (diferencias en diferencias) exhibido en la ecuación siete.

Igualmente, corresponde al punto común o cruce entre los costos unitarios anuales de producción para las firmas con y sin ET. Adicionalmente, si el sitio de disposición final para residuos sólidos se encuentra a una distancia mayor de 34,51Km, es indispensable que las compañías prestadoras del servicio construyan ET para que puedan ser costo eficiente; disminuyendo sus gastos unitarios variables, mediante el uso de transporte a granel y no utilizando los camiones recolectores para trasladar directamente los residuos sólidos al relleno sanitario. Generando, un ahorro de 4.346 pesos Km aproximadamente, por tonelada transportada a distancias superiores de 34,51Km.

También, los resultados de Km* con ET señalan que ellas pueden ser ubicadas a distancias menores de 34,51Km; lo más cercana al centroide de origen, en lo posible antes de un peaje. Con el fin que la empresas minimicen aun más el costo de traslado al relleno, aprovechando un trayecto mas prologando en transporte a granel y no en vehículos recolectores. Una vez obtenida la distancia óptima, sobre el cuadro tres puede apreciarse la relación entre los costos totales de producción (CTP) y las toneladas transportadas anualmente. A partir de los resultados se encontró que la función cúbica en la ecuación 13 es correctamente especificada, dado la consistencia de los signos esperados en los parámetros y la representatividad estadística de los términos lineal, cuadrático y cúbico de las toneladas -Ton- (véase cuadro tres).

$$CTP_{it} = 48'600.000 + 12.799Ton_{it} - 0,012Ton_{it}^2 + 0,00000000193Ton_{it}^3 + 431'000.000D_{cp} - 134.802D_{cp}Ton - 0,337D_{cp}Ton_{it}^2 + 0,00000116D_{cp}Ton_{it}^3 \quad (13)$$

$$CMg_{cet} = \frac{\partial CTP}{\partial Ton} = 12.799 - 134.802 - 2 * (0,012Ton) + 3 * (0,00000000193 + 0,00000116)Ton^2 = 0 \quad (14)$$

$$CMe_{cet} = \frac{CTP}{Ton} = \frac{431'000.000}{Ton} + 12.799 - 134.802 - 0,012Ton + (0,00000000193 + 0,00000116)Ton^2 \quad (15)$$

Cuadro 3. Modelo costo total de producción de transporte para residuos sólidos con y sin estaciones de transferencia a precios constantes de 2008 (CTP).

Modelo costo total de producción de transporte para residuos sólidos a precios constantes de 2008 (CTP)	
VARIABLES INDEPENDIENTES	COEFICIENTE
Toneladas (Ton/año) entre el centroide de partida hasta el relleno sanitario	12799.37**
Toneladas (Ton/año) entre el centroide de partida hasta el relleno sanitario- al cuadrado	(-0.012023)*
Toneladas (Ton/año) entre el centroide de partida hasta el relleno sanitario- al cúbico	0.00000000193*
Variable empresa con ET (cualitativa binaria con valor de uno si la empresa tiene ET y cero sin ET)	431000000**
Variable empresa con ET combinada con Ton/año	(-134802.4)*
Variable empresa con ET combinada con Ton/año al cuadrado	-0.3369187
Variable empresa con ET combinada con el Ton/año al cúbico	(0.00000116)***
Costo total rezagado un periodo (t-1)	1.08113***
Intercepto	48600000
Coefficiente de determinación R2	0.9924
Número de observaciones	517
Ton* anual óptimo donde se cruzan los CMg y CMe con ET	58805.90
Ton* diario óptimo donde se cruzan los CMg y CMe con ET	161.55
Variable estadísticamente significativa a (*) 10%, (**) 5% y (***) 1%; estimación en Stata.	

Fuente: cálculo de los autores con la información del SUI.

Igualando y resolviendo, CMg y CMe con ET, de las ecuaciones 14 y 15 se obtiene la cantidad óptima de Ton^* al año para una firma que minimiza CTP con proyecto. Que equivale a 58.506 toneladas/año o 161,55 toneladas/día. Monto, que permite establecer la viabilidad de contar con estaciones de transferencia. En otras palabras, rellenos ubicados a más de 34,51Km y un mercado capaz de generar un monto mayor o igual a 162 toneladas día, debe contar con una o más ET para minimizar los costos variables unitarios de la firmas. Por consiguiente, aumentar su eficiencia económica y por ende el valor para las ganancias percibidas de la actividad. Esta cifra es superior a las 100 toneladas diarias de residuos sólidos sugeridas por EPA, aunque no es comparable debido al tipo de basura generada y tamaños de las empresas que operan en Estados Unidos, dado que con esta condición manejan mejor las economías a escala.

VI. Conclusiones

Partiendo del propósito principal, revisión literaria y resultados obtenidos anteriormente, con la metodología diferencias en diferencias (a través de un modelos de datos panel con efectos aleatorios, y análisis estático comparativo de optimización matemática), indican que un mercado que genera un monto mayor o igual a 162 toneladas de residuos sólidos día, puede contar con una o más ET para minimizar los costos variables unitarios de la firmas, una vez realice su análisis costo beneficio económico y financiero.

Igualmente, es el tamaño del mercado a partir del cual es viable contar con estaciones de transferencia. 162 toneladas/día garantizan el cubrimiento de los costos variables en el corto plazo para los productores de transporte que cuentan con estaciones de transferencia; esta cantidad, les permitiría percibir un precio techo donde al menos sus beneficios son nulos, sin incurrir en pérdidas económicas.

Por otra parte, las estaciones de transferencia son concebidas como una solución costo eficiente al manejo, recolección y transporte de residuos sólidos cuando se generan grandes cantidades en áreas urbanas y el tramo para trasladarlos, entre el sitio origen y destino, es extenso; dado que, ocasionan reducciones en tiempos de viajes, prolongan la vida útil de los vehículos recolectores y disminuyen la cantidad de mano de obra empleada.

Las dos principales razones para que existan estaciones de transferencia en una determinada zona son de índole económica y prestación del servicio de recolección en áreas rurales que carecen del mismo. Sin embargo, el factor económico es la principal la razón, dada la propensión hacia las economías crecientes de escala que ellas generan en la prestación del servicio de recolección y transporte de residuos sólidos.

La ubicación ideal de este tipo de proyectos debe ser relativamente cerca al centroide de la población servida, para minimizar costos de recolección y transporte, o sobre la ruta que conduce al relleno. Asumiendo, que es situado en un lugar con las condiciones ambientales requeridas, evitando riesgos sobre la salud humana e incomodidades a la sociedad. No obstante, bajo la consideración económica y comparando el comportamiento de los costos bajo un escenario sin y con estaciones de transferencia (ET), es posible obtener la distancia o tiempo adecuado donde preferiblemente debe realizarse el proyecto.

De acuerdo con EPA (2001, 9), 100 toneladas diarias de residuos sólidos es el monto mínimo requerido para operar una estación de transferencia tipo descarga directa con aumento en capacidad; teniendo en cuenta el crecimiento poblacional, agrícola e industrial de la zona, dado que esta clase de ET, son las más económicas de implementar. Asimilando estos mismos criterios, la Guidelines for Establishing Transfer Stations for Municipal Solid Waste (2005) describe el comportamiento

desagregado de costos para estaciones de transferencia que tienen capacidad de recibir hasta 10.000 toneladas/año o 38,5 toneladas/día; y resalta que las cantidades de residuos sólidos anticipadas para una ET deben ser estimada acorde con el área servida, con el fin de obtener un monto que garantice cargar toda la capacidad de los vehículos de transferencia disponibles.

La evidencia internacional señala que rellenos ubicados por encima de los 20 a 40 Km (Malarin y Vaughan, 1997, 11) o entre 30 y 60 minutos de recorrido (en Melbourne-Australia, véase Victorian Government Department of Sustainability and Environment, 2009, 8, parte 3, nombre en inglés) necesitan apoyarse en una ET para disminuir los costos de recolección y transporte de residuos sólidos; distancia y tiempo determinado a partir del punto de quiebre en la gráfica uno, el cual diagnostica la viabilidad de la ET.

Conforme con lo presentado en la metodología sobre diferencias en diferencias, las empresas que implementan estaciones de transferencia tienen un impacto representativo en sus costos fijos unitarios anuales de 149.970 pesos (412 pesos día) aproximadamente; valor superior para el mismo rubro en firmas que no llevan a cabo este tipo de proyectos.

No obstante, en Colombia la distancia óptima de referencia donde debe ubicarse una estación de transferencia es 34,51Km; dado que indica los puntos comunes o donde se cruzan los costos unitarios anuales de producción para las firmas con y sin ET. Adicionalmente, si el sitio de disposición final para residuos sólidos se encuentra a una distancia mayor de 34,51Km, es indispensable que las compañías prestadoras del servicio construyan ET para que puedan ser costo eficiente; disminuyendo sus gastos unitarios variables, mediante el uso de transporte a granel y no utilizando los camiones recolectores para trasladar directamente los residuos sólidos al relleno sanitario.

Aunque el impacto de implementar una ET es representativo y genera mayores costos fijos unitarios anuales, el efecto marginal de un Km adicional a recorrer entre el centroide origen y el relleno por encima de los 34,51Km, implica una reducción en el costo unitario anual de 4.346 pesos aproximadamente para firmas con ET. Este valor se convierte en el ahorro por tonelada transportada cuando se cuenta con una ET, por cada Km adicional a 34,51Km en el recorrido hasta el relleno sanitario.

Una vez determinada la distancia apropiada para una ET, mediante el resultado del punto de cruce entre las curvas de costos, identificar el área adecuada de prestación para utilización de estaciones de transferencia también depende de otros factores técnicamente relevantes como: ambientales, económicos, sociales y políticos; basados en los criterios de exclusión, técnicos y específicos de la comunidad potencialmente afectada por la construcción de una ET.

En el mismo sentido, según UNEP (*United Nations Environment Programme*, 2005, 94-108, siglas en inglés), antes de tomar la decisión de realizar una estación de transferencia es importante y esencial realizar cuidadosamente un análisis beneficio costo económico y financiero; y con los resultados del mismo determinar la viabilidad del proyecto. Así, la ET debe ser únicamente implementada cuando los costos de transporte directo hasta el relleno sanitario en los vehículos de recolección supera representativamente a los incurridos con transporte a granel apoyado en una ET y sus ahorros de implementación resulten significativos.

Las estaciones de transferencia preferiblemente deben ubicarse antes de los peajes o donde potencialmente puedan existir. Así la variabilidad del cobro, dadas la características propias de los vehículos, puede homogeneizarse sólo pagando el rubro máximo correspondiente a las tractomulas

de mayor capacidad, evitando de esta forma la heterogeneidad en el pago de peajes que pueden causar los camiones recolectores y de transferencia; si ambos, se ven en la necesidad de pasar por ellos. Por otra parte, el mal estado de las vías impactaría directamente los costos fijos; incrementando los gastos en mantenimiento y depreciación (vida útil) de los vehículos de transferencia o tractomulas. Razón por la cual, deben considerarse dentro de la función de costos como se detalló en la ecuación uno.

VII. Referencias

- Chiang, A. (1988), Métodos Fundamentales de Economía Matemática, Tercera edición, USA: McGRAW-HILL.
- De Rus, G. Campos, J y Nombela, G. (2004), Economía del Transporte, Gran Canaria: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Antoni Bosh Editor.
- Documento de trabajo (2005) Metodologías de costos y tarifas para el servicio público de aseo, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico – CRA.
- Greene, William. (1999), Análisis Econométrico, Tercera edición, Madrid: Prentice Hall.
- Guidelines for Establishing Transfer Stations for Municipal Solid Waste (2005), <http://www.env.gov.bc.ca/epd/epdpa/mpp/gfetsfms.html>.
- Gujarati, Damodar N. (2003), *Econometría Básica*. 4ª edición. México D.F. Editorial Mc Graw-Hill.
- Malarin, H. y Vaughan, W. (1997), An Approach to the Economic Analysis of Solid Waste Disposal Alternatives, United States, Washington D.C.
- McCharty, Patrick. (2001), *Transportation Economics Theory and Practice: An Case Study Approach*, First Edition, Oxford: Blackwell Publishers.
- Mendianta, Juan Carlos y Perdomo, Jorge Andrés (2008), Fundamentos de economía del transporte: teoría, metodología y análisis de política, primera edición, Bogotá-Colombia, ediciones Uniandes.
- Mendieta, J. C. y Perdomo, J. A. (Octubre de 2007), “Especificación y estimación de un modelo de precios hedónico espacial para evaluar el impacto de Transmilenio sobre el valor de la propiedad en Bogotá” Documento CEDE (Centro de Estudios Sobre Desarrollo Económico), Facultad de Economía, Universidad de los Andes, **22**, 1-44.
- Ouano, E. (1983), Hauling Distance and Transfer Station Location, *Journal of Environmental Engineering*, **109**, 6, 1429-1433.
- Pindyck, Robert S. & Rubinfeld, Daniel L (2000), *Econometría Modelos y Pronósticos*, Cuarta Edición, McGraw-Hill.
- Resolución 351 de 2005, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico – CRA.
- Rosales, R. Perdomo, J.A., Morales, C. y Urrego, A. (2010), Fundamentos de econometría intermedia: teoría y aplicaciones. CEDE (Centro de Estudios Sobre Desarrollo Económico), Facultad de Economía, Universidad de los Andes.
- Sánchez, J. y Estrada, R. (1996), Estaciones de transferencia de residuos sólidos en áreas urbanas, Instituto Nacional de Ecología, México, D.F.
- United Nations Environment Programme, UNEP. (2005), Solid Waste Management (Volume I), CalRecovery Incorporated.

United States Environmental Protection Agency, EPA. (2001), *Waste Transfers Stations: a Manual for decision-Making*.

Varian, Hal R. (1993), *Intermediate Microeconomics a Modern Approach*, third Edition, New York: W.W Norton & Company.

Victorian Government Department of Sustainability and Environment (2009), *Metropolitan Waste and Resource Recovery Strategic Plan, Metropolitan landfill Schedule, part 3*, Melbourne-Australia.