

# **ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DEL VOLUMEN Y MASA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DESTINADOS A ENTERRAMIENTO EN LA CIUDAD DE UNQUILLO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO (TMB)**

Antonini S.<sup>1</sup>, Pettigiani E.<sup>2</sup>, Silva F.<sup>3</sup>, Cravero L.<sup>3</sup>, Reynafé L.<sup>3</sup> & Carolina Cuffia C.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Cátedra de procesos y organización industrial (Ingeniería Química/FCEFYN, UNC, Argentina)

<sup>2</sup>INTI (Unidad de Extensión, INTI-Córdoba, Argentina)

<sup>3</sup>Estudiante (Ingeniería Química/FCEFYN, UNC, Argentina)

santonini@efn.uncor.edu

## **1 RESUMEN**

Luego de 20 años de mejoras graduales en la gestión de residuos, comenzando por el cierre del basural en 2002, el Municipio de Unquillo (18.000 habitantes, Provincia de Córdoba) se encuentra con desafíos como disminuir la cantidad de residuos a transferir al relleno sanitario de la ciudad de Córdoba, distante a 55 km. Para reducir los costos de transporte y disposición final de los residuos no captados por la recolección diferenciada, se están implementando medidas para disminuirla generación y aumentar el reciclaje. Aun así, la fracción húmeda contiene una importante cantidad de materiales reciclables.

En el presente trabajo se desarrolla una prueba piloto de tratamiento mecánico biológico (TMB) de esta fracción de residuos sólidos urbanos (RSU). El TMB combina la clasificación y procesamiento mecánico con el tratamiento biológico, con el objetivo de reducir la masa y volumen y estabilizar los RSU. Se realizaron dos pruebas de TMB, en verano y en invierno, que procesaron más de dos toneladas de RSU.

El presente trabajo tiene como objetivo valorar el potencial que (TMB) tiene como alternativa tecnológica de tratamiento de los RSU antes de derivarlos a disposición final.

Los resultados muestran que es posible recuperar un 27% en peso de materiales reciclables y derivar a compostaje un 44% con lo que sólo se debería enviar a disposición menos de 30% de la masa recibida. Además, se estimó que el rendimiento de cada operario en la separación es de unos 70 kg/hora. En términos económicos, el costo del personal adicional 1.117 mil pesos al año, se compensa por los ahorros de

transporte y disposición final, 749 mil pesos y los ingresos por venta de materiales, 789 mil pesos. Se pudo concluir que la aplicación de TMB a los RSU de Unquillo genera beneficios ambientales sin incurrir costos adicionales y generando trabajo en el Municipio.

**Palabras Clave:** Tratamiento Mecánico Biológico, Unquillo, Residuos Orgánicos

## **2 INTRODUCCIÓN**

Unquillo es una ciudad del Gran Córdoba, en el departamento Colón, provincia de Córdoba, Argentina, con 18.086 habitantes (INDEC, 2010) y se encuentra situada a 24 km de la ciudad de Córdoba. La Municipalidad de Unquillo, desde hace ya 20 años, ha generado una serie de acciones para desarrollar una gestión integral de los residuos sólidos urbanos (RSU) con múltiples esfuerzos en términos de reducción y reciclaje promocionando la separación en origen.

El municipio cuenta con un predio de 8 hectáreas en las que se encuentra una planta que cuenta con: una zona de depósito de restos de poda; una zona para chatarra y neumáticos sin uso; una zona de compostaje donde se trabaja la materia orgánica proveniente de verdulerías o establecimientos del rubro alimenticio y un galpón de 100 m<sup>2</sup>, donde se trata el material reciclable de la recolección diferenciada.

Esta planta recibe diariamente más de 8,5 t de RSU de la recolección mixta, 600 kg de residuos reutilizables de recolección diferenciada y unos 60 m<sup>3</sup> de residuos provenientes de la poda. Todos los residuos provenientes de la recolección mixta son cargados en contenedores y trasladados al enterramiento sanitario de la ciudad de Córdoba (Vázquez, 2013).

A pesar de los esfuerzos para fomentar la diferenciación en origen, la corriente de residuos sin diferenciar aún contiene cantidades importantes de materiales potencialmente reciclables que actualmente se está enviando al enterramiento.

Frente a esta situación, una tecnología que permita recuperar parte del material potencialmente reciclable y a la vez reduzca la masa y el volumen a transportar el predio de disposición final podría ser atractiva para el municipio.

Una de las alternativas de tratamiento de RSU, ya probadas en algunos países de Latinoamérica (Aguilera, 2009), que permite importantes reducciones de masa y volumen de los RSU destinados a disposición final, con una fuerte disminución del el

impacto ambiental y con niveles de inversión y costos operativos relativamente bajos es el Tratamiento Mecánico Biológico (TMB).

El TMB es un proceso de conversión de RSU, a través de una combinación de procesos mecánicos y biológicos. El principal objetivo de esta tecnología es estabilizar la materia orgánica contenida en los RSU para reducir la posterior generación de gas metano y lixiviados, al mismo tiempo que se logran reducciones importantes en el volumen y masa que deben ser enterrados.

El proceso comienza con un tratamiento mecánico, para recuperar materiales reciclables o voluminosos y perturbadores para luego pasar a una etapa de tratamiento biológico en la que se produce la descomposición de la materia orgánica llevada a cabo por microorganismos aerobios y/o anaerobios, con lo que se consigue una fracción orgánica microbiológicamente inactiva. Luego las fracciones que no son utilizables son depositadas en un relleno sanitario en capas finas, altamente compactadas, y de esa manera se logra que el relleno sanitario presente un potencial ínfimo de producción de gas.

El objetivo general de este trabajo fue valorar alternativas para reducir el volumen y la masa de RSU destinados a disposición final, mediante distintas operaciones de tratamiento mecánico biológico. Esto implicó los siguientes objetivos particulares: analizar las posibles tasas de recuperación de materiales reciclables y el peso de la fracción compostable en el total de RSU; definir los tiempos requeridos para las distintas operaciones tratamiento mecánico; evaluar y valorar el proceso de compostaje de la fracción compostable; y valorar económicamente un posible escalado del proceso de TMB para la ciudad de Unquillo

### **3 METODOLOGÍA**

#### **3.1 Tratamiento mecánico**

El proceso de tratamiento y separación mecánica constó de la separación de los RSU en siete fracciones: celulósicos; polietileno film (PE film); tereftalato de polietileno y polietileno de alta densidad (PET-PEAD); vidrio; sanitarios (principalmente pañales); fracción húmeda o compostable y resto.

Se procesaron 2090 kg provenientes de dos rutas de recolección, en tres pasadas de aproximadamente una hora cada una. Para realizar las tareas del proceso se contó con el siguiente equipamiento:

- Tolva de alimentación acoplada a cinta transportadora de 7,5 m
- Recipientes contenedores adecuadamente etiquetados para almacenar y pesar cada fracción
- Balanza pilón electrónica con una capacidad de 500 kg
- Tráiler contenedor de 1m<sup>3</sup> para recibir la fracción compostable y
- Y otros equipamientos menores como cuchillas, palas, rastrillos y guantes de seguridad

### **3.1.1 Alimentación**

De forma manual se alimentó la tolva para la carga de los RSU en la cinta transportadora sobre la cual se realizó su selección.

### **3.1.2 Apertura de bolsas**

La apertura de bolsas se hizo de forma manual, con elementos cortantes y luego se esparció el contenido de las bolsas para aumentar la visibilidad de cada material y la posibilidad de detección. Una dificultad importante fue la generada por la cantidad de bolsas “anidadas” una dentro de otra, aproximadamente entre 3 a 5 bolsas por bolsa exterior lo que demoró considerablemente la etapa de apertura.



Figura 1 Apertura de bolsas

### **3.1.3 Separación**

Para la separación de los RSU en las siete fracciones definidas, se ubicaron nueve operadores a cada lado de la cinta tal como se muestra en las Figuras 2 y 3. Una vez puesta en marcha la cinta, se fijó una velocidad de 0,123 metro/s que permitiera a las personas extraer de la cinta todos los residuos de la categoría que tuvieran asignada. En el momento de la recolección, todos los residuos ya clasificados, se juntaron en

bolsones que se hallaban a los lados de la cinta, mientras que la fracción compostable se descargaba directamente sobre el contenedor al final de la cinta.



Figura 2: Separación

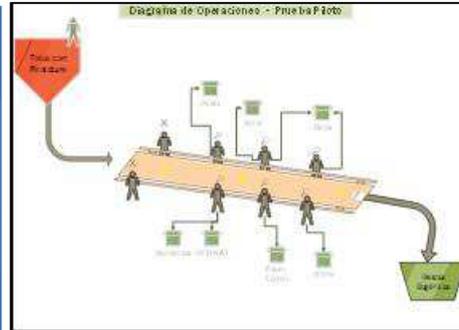


Figura 3 Disposición de los operadores de separación



Figura 4 Descarga de material compostable

### 3.1.4 Actividades y tiempos de operación

Respecto a los tiempos requeridos para realizar las operaciones del tratamiento mecánico, se analizaron los kilogramos procesados por hora y por persona según la siguiente fórmula:

$$R = m_t / (N_p \times N_h)$$

Donde R es el rendimiento del tratamiento mecánico [ $\text{kg h}^{-1} \text{ persona}^{-1}$ ],  $m_t$  se refiere a la masa total tratada en la prueba piloto [kg],  $N_p$  indica el número de personas involucradas [personas] y  $N_h$  indica la cantidad de horas transcurridas en la prueba piloto [horas].

### **3.1.5 Productos del tratamiento mecánico**

Se realizó un balance de masa de las distintas fracciones procesadas en la separación mecánica y se estimó la tasa de recuperación de cada material reciclable y la cantidad de material a compostar.

### **3.2 Tratamiento biológico**

El tratamiento biológico, consta de una serie de procesos que producen la reducción de masa y volumen de la fracción compostable por acción de microorganismos.

Para el tratamiento biológico se decidió armar dos pilas: una de ellas con material compostable, como base y chips de madera como biofiltro (pila 1), y otra con base de material compostable mezclado con los chips de madera (pila 2).

El equipamiento utilizado en la prueba piloto:

- Trailer de 1 m<sup>3</sup> de volumen para el transporte material compostable
- Chipeadora Deisa CH 600
- Plástico de alta densidad de 20 m<sup>2</sup> captar los lixiviados
- 12 tarimas de 1,2 m<sup>2</sup> para soporte de camas de compostaje.
- Malla plástica de 20 mm<sup>2</sup> de luz para la etapa de armado de camas
- Criba de 10 mm<sup>2</sup> de luz y 60 mm<sup>2</sup> de luz
- Balanza pilón electrónica con una capacidad de 500 kg
- Termocupla para la medición de temperaturas de las pilas
- Estufa de hasta 120 °C y mufla de hasta 800°C
- Balanza Ohaus con capacidad de 150 g hasta 5000 g con sensibilidad de 0,01 g a 1g
- Balanza System con capacidad de 15 kg con una precisión de 0,5 g
- Y otras herramientas menores como: palas, rastrillos, horquillas y material de vidrio

#### **3.2.1 Actividades de soporte para el tratamiento biológico (chipiado y armado de camas)**

Se prepararon chips de madera, para aumentar la porosidad de la pila, provocando una mayor eficiencia en la respiración de la pila y así mejorar los tiempos de reducción de la materia orgánica. También se utilizó parte de los chips como biofiltro, colocándolo en la parte superior de la pila, para evitar la acción directa de insectos y animales y contribuir

a mantener la humedad interior por más tiempo. Los chips de madera se obtuvieron de los restos de poda depositados en el predio.

Para el armado de las camas de compostaje, fue necesario: un espacio abierto, que permitió una buena circulación de aire y el suelo tuvo una leve inclinación, que facilitó el escurrimiento de los lixiviados. Para confeccionar las bases de las pilas, se estiró un plástico de alta densidad sobre el suelo. Sobre el plástico se colocaron las tarimas de madera, con un ordenamiento de 3x2 tarimas por cama. Se obtuvieron así camas con una superficie de aproximadamente 9 m<sup>2</sup> cada una y por último, sobre estos se colocó la malla plástica para evitar la pérdida de material.



Figura 5 Chipeado de restos de poda Figura 6 Bases de pila de compostaje



Figura 7 Detalle de base de pila de compostaje

### 3.2.2 Proceso de tratamiento Biológico (compostaje, volteado y cribado)

A los 40 días se procedió a un mezclado o “volteo” de la pila 2 para homogeneizar y airear la pila. Esto provocó un aumento en la oxigenación, permitiendo una reactivación de la actividad de los microorganismos y aumentando la velocidad de descomposición. Transcurrido los 120 días de compostaje y verificando que todos los indicadores de seguimiento resultaron con valores cercanos a lo esperado, se procedió al corte o separación de las pilas. Una vez realizado el corte, se tamizó todo el material compostado y se lo separó en fracciones con partículas de tamaño menor a 10 mm<sup>2</sup> de luz, entre 10 mm<sup>2</sup> y 60 mm<sup>2</sup> y otra de partículas mayores a 60 mm<sup>2</sup>.

#### 3.2.2.1 Parámetros de control de proceso de compostaje y producto

Para el control y seguimiento del proceso de compostaje, se monitorearon una serie de indicadores, que permitieron obtener información sobre el estado de degradación de la pila y el momento de realización del corte del proceso (Capitelli, 2010).

Los resultados fueron comparados con la legislación chilena (Nch 2280/04), ya que ésta es la única en los países de la región que trata sobre parámetros de control de un compost a base de residuos sólidos urbanos sin previo tratamiento.

## **4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Tratamiento mecánico**

#### **4.1.1 Balance de masa del tratamiento mecánico**

Se observa en la Figura 5 que del total ingresado sólo el 30% en masa no sería aprovechable y/o compostable, mientras que el 26 % es transferido a acondicionamiento de materiales reciclables y un 44% a tratamiento biológico. En relación al volumen, la mayor parte corresponde a la fracción reutilizable seguida de la no reutilizable.

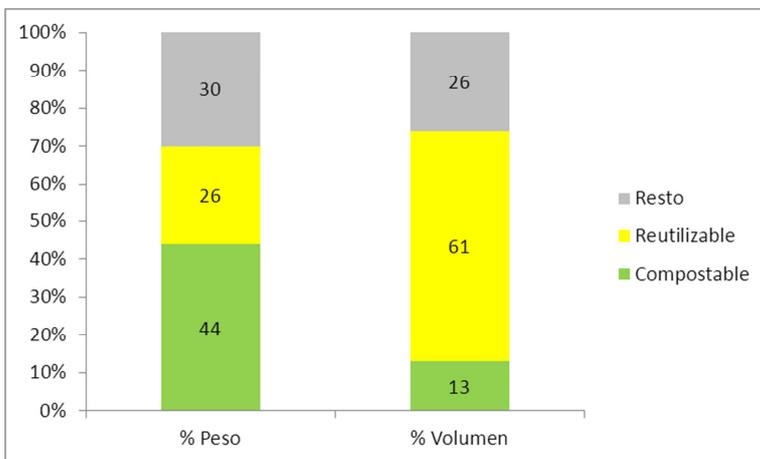
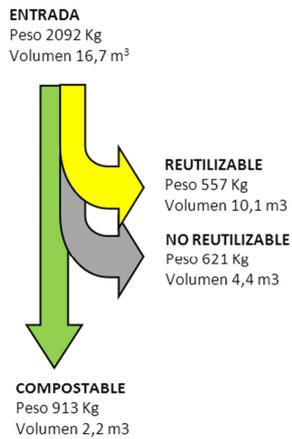


Figura 8: Balance de masa y % en masa y volumen de los productos del proceso de separación Fuente: elaboración propia

La figura 9 muestra que dentro del material reutilizable, los materiales plásticos son los que más abundan seguidos del material celulósico.

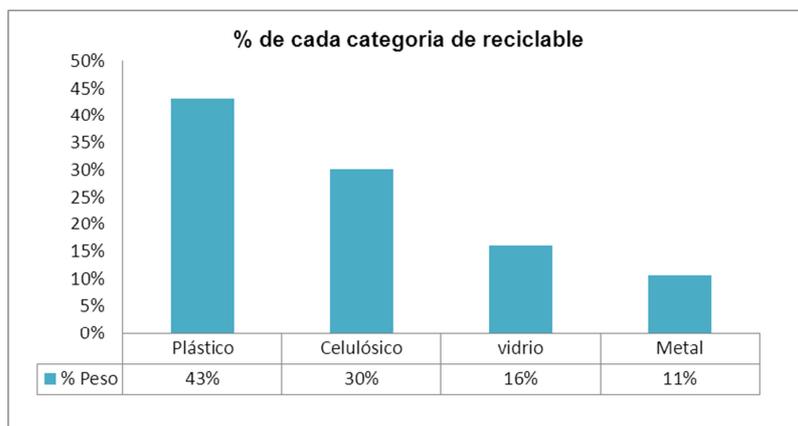


Figura 9: % de cada material dentro de la fracción recuperable

Por lo expuesto, se observa que la primera fase de la prueba piloto, la etapa de tratamiento mecánico, mostró resultados positivos en cuanto al potencial de recuperación de materiales demostrando que más de un cuarto de la masa recibida corresponde a materiales potencialmente reciclables y que el 45% en masa es compostable.

#### **4.1.2 Actividades y tiempos de operación**

Respecto a los tiempos operativos, se estimó que la productividad mínima que se puede considerar a la hora de realizar el escalado en la etapa de separación es de 69 kg/hora por operador. Este valor se obtuvo sabiendo que la masa total tratada es de 2.092kg y que nueve personas trabajaron un lapso de 3,5 horas.

### **4.2 Tratamiento biológico**

#### **4.2.1 Reducción de masa y volumen**

En el primer día la pila de compostaje contaba con una masa de 1136 kg y un volumen de 5,1 m<sup>3</sup> (Figura 10), mientras que en el día 120, luego de alrededor de cuatro meses, las pilas presentaron una masa de 587 kg y un volumen de 1 m<sup>3</sup> (Figura 11). La reducción de masa en ese lapso de tiempo fue de un 48% (549 kg), mientras que la de volumen fue de un 77% (4 m<sup>3</sup>). Esta disminución de masa se debe a la degradación del material orgánico a CO<sup>2</sup> y vapor de agua.



Figura 10: Pilas de compostaje en el día 1  
día 120

Figura 11: Pilas de compostaje en el

#### **4.2.2 Parámetros de control de proceso y producto**

En la fase de compostaje, se observa en base a la evolución de los distintos parámetros de control que tuvo lugar una importante actividad microbiana que permitió reducir un 48% la masa y un 77% el volumen de la fracción compostable.

#### **4.2.3 Temperatura**

La temperatura llega en los primeros días de descomposición a 70°C aproximadamente, temperatura ideal para la degradación de la materia orgánica. Con el transcurrir de los días, la temperatura disminuye indicando un bajo nivel de actividad microbiana. A los 40 días, se le realizó un volteo a la pila 2, donde subió su temperatura de 20 hasta 40 °C, ayudando a reactivar la descomposición de la pila. Por lo tanto, es perceptible una diferencia de temperaturas entre pilas a partir del día 40.

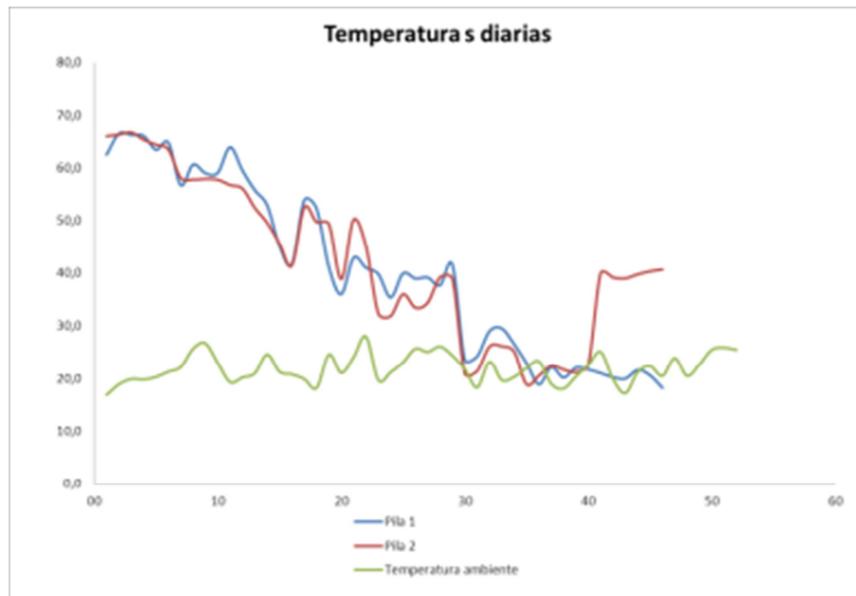


Figura 12 Evolución de la temperatura diaria

#### 4.2.4 Granulometría

Se tomaron dos muestras, una a los 44 días y otra a los 120 días. Se observó que la fracción mayor a 60 mm se mantiene en el tiempo y esto se debe a que la mayoría es material no compostable remanente de la separación de residuos (PE film y PEAD). La fracción intermedia disminuye con el tiempo y esto es debido a la acción de los microorganismos dejando como consecuencia un aumento en la fracción menor a 10 mm<sup>2</sup>.

Se observa además que existe una gran diferencia en la cantidad de fracción mayor a 10 mm (reducida en la pila 2), ya que en la primera pila se reduce alrededor de un 15% en peso y en la segunda se reduce un 45% en peso. Esto se puede atribuir a que a la pila 2 se le agregó el chipiado y se le realizó el volteo, lo que facilitó la acción microbiana y la descomposición de esta fracción.

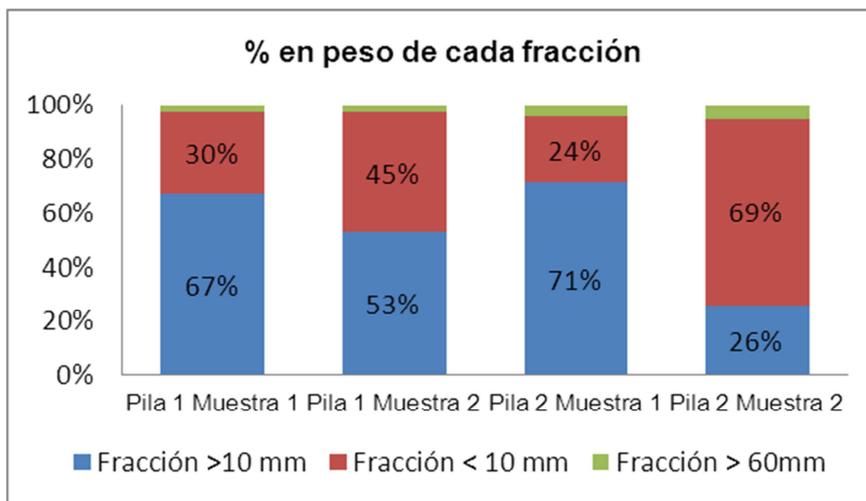


Figura: 13 Evolución en el tiempo del peso de cada fracción según su granulometría

#### 4.2.5 Humedad

La humedad final en las pilas es un factor variable que depende de las situaciones climáticas, como lluvias y días con elevadas temperatura. La humedad de los dos primeros meses fue la correcta, 64% y 53% para la pila 1 y 56% y 54% para la pila 2, según la legislación chilena Nch 2280/04 y se estima que la humedad del tercer mes disminuye más de lo aconsejable, 44% para la pila 1 y 18% para la pila 2, debido a que la mayor parte de la descomposición ya fue realizada y que no hubo precipitaciones importantes como en los dos primeros meses.

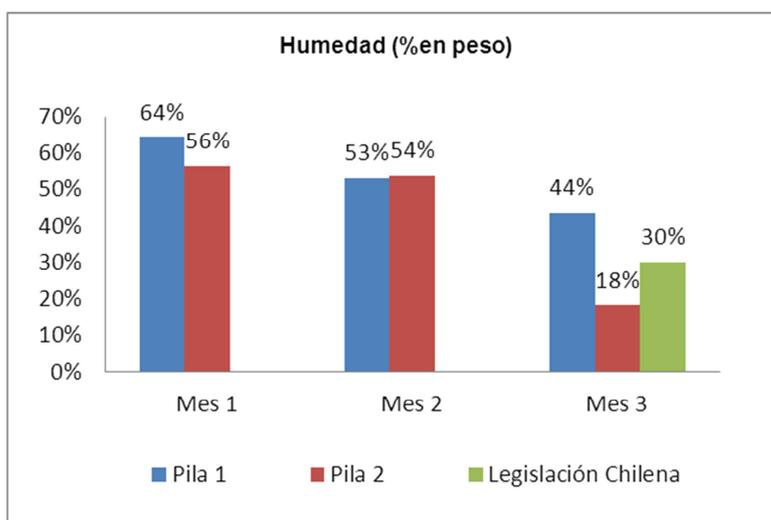


Figura 13: Evolución de la humedad a lo largo del tiempo

#### 4.2.6 Carbono orgánico total

En la prueba piloto, las tres primeras mediciones dieron valores relativamente cercanos, manteniéndose entre los 60-70% y en el último mes cercano al corte, bajó a un 50%. Se

estima que estos valores no se han reducido al límite mencionado por la legislación chilena, debido a la alta cantidad de material de biofiltro que se agregó. Este material tiene un alto porcentaje de material orgánico difícil de degradar en los 4 meses de descomposición de la pila.

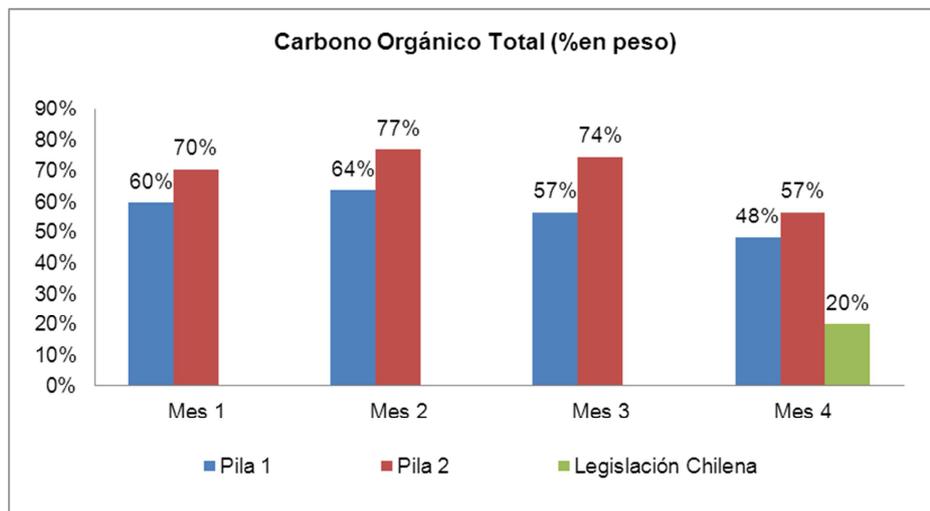


Fig. 14 Evolución del Carbono Orgánico total T a lo largo del tiempo comparado con los valores estipulados en la legislación chilena Nch 2280/04

#### 4.2.7 Relación carbono/nitrógeno

Se obtuvo como valor final 23,9 para la pila 1 y 26,8 para la pila 2. Como este compost no será utilizado como enmienda y se encuentra la relación carbono/nitrógeno se encuentra por debajo de 30, que es el umbral permitido por la normativa, los resultados de ambas pilas son aceptables para un proceso de compostaje que tiene como objetivo reducir y estabilizar la masa destinada a enterramiento sanitario.

#### 4.2.8 pH y conductividad eléctrica

El pH obtenido fue de 8,72 para la pila 1 y de 8,41 para la pila 2 (dentro del rango). Si bien la pila 2 cumple con la legislación de referencia (menor a 8,5) es probable que ambos valores sean elevados debido a un exceso de sales, producido por la gran variedad de residuos que se encuentra en la etapa previa a la separación.

Con respecto a la conductividad, ésta fue 1,91 dS/m en la pila 1 y 2,22dS/m en la pila 2. Ambos valores se encuentran dentro de lo que establece la norma Nch 2280/04.

### 4.3 Propuesta de escalado para la ciudad de Unquillo

Teniendo en cuenta los resultados del tratamiento mecánico, y biológico, se estimó un balance de masa anual para los RSU generados en la ciudad de Unquillo.

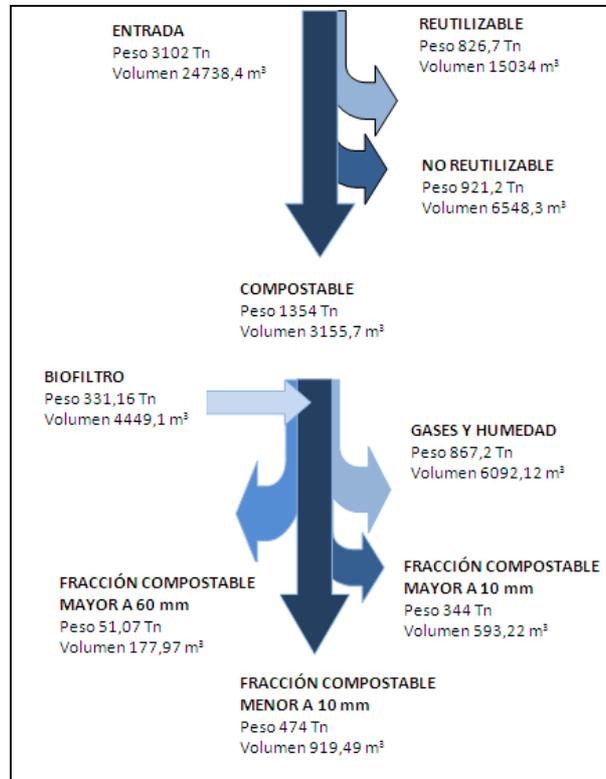


Figura 15 Balance de masa total para un año

Fuente: Elaboración propia

En base a la ingeniería básica desarrollada con los datos de las pruebas pilotos, se estimó la inversión necesaria en equipamientos.

Tabla 1 Inversión requerida para la implementación de TMB

Equipamiento	Inversión (miles de pesos)
<b>Prensa</b>	\$212,5
<b>Chipeadora</b>	\$334,7
<b>Bentonita (Tn)</b>	\$49
<b>Tamiz vibratorio</b>	\$250
<b>Tolva con cinta</b>	\$100
<b>Rompedor de bolsa</b>	\$309,3
<b>Trommel</b>	\$350
<b>Separador magnético</b>	\$90
<b>Trituradora de vidrio</b>	\$237,5
<b>Maquina volteadora</b>	\$236,4
<b>Total</b>	<b>\$2.169</b>

Los costos operativos considerados fueron aquellos relacionados a los costos de las 15 personas adicionales requeridas para realizar el proceso de separación, acondicionamiento de materiales y compostaje.

Tabla 2 Costos adicionales de personal para la implementación de TMB

<b>Puesto de trabajo</b>	<b>Cantidad de personas</b>	<b>Costo unitario anual</b>	<b>Costo total anual</b>
Operario de trat. mecánico	5	\$ 79.040	\$ 395.200
Operario en acondicionamiento de reutilizables	5	\$ 79.040	\$ 395.200
Operario en trat biológico	2	\$ 79.040	\$ 158.080
Operario reemplazante	1	\$ 79.040	\$ 79.040
Supervisor de turno	2	\$97.500	\$ 97.500
<b>Total</b>	<b>15</b>		<b>\$ 1.125.020</b>

Los ingresos potenciales, estimados en base a la composición del material recuperable y los precios pagados por la industria del reciclaje de cada material, se estimaron en \$ 788.851.

Considerando estos ingresos, los costos adicionales y los potenciales ahorros se puede prever que el municipio de Unquillo podría implementar el TMB sin incurrir en costos adicionales.

Tabla 3 Variación total de costos con la implementación de TMB

<b>Concepto</b>	<b>Importe</b>
Ingresos previstos	\$ 788.851
Costos adicionales de personal	- \$1.117.116
Potenciales ahorros	\$749.070
<b>Variación total</b>	<b>\$420.805</b>

## 5 CONCLUSIONES

La aplicación del TMB a los residuos generados en el municipio de Unquillo implica una importante reducción de masa y volumen en la cantidad de residuos que son enviados a disposición final. A esto se suma el consecuente ahorro de costos, junto con los potenciales ingresos derivados de las ventas de material reciclable. Por ello se propone la implementación del TMB sobre las 3.500 toneladas recibidas por año sin incurrir en sobrecostos considerables, generando trabajo de formal local y disminuyendo el impacto ambiental ocasionado por los residuos de la ciudad.

Al analizar la composición de los residuos, se obtuvo que el porcentaje de material compostable y de material reciclable son suficientemente elevados para que sea factible la implementación del TMB. El proceso de tratamiento mecánico mostró que se puede

recuperar un volumen importante de material reciclable con una productividad de 70 kg/hora por operario, mientras que el tratamiento biológico demostró que es posible una reducción del orden del 50% de la masa compostable destinando menos de 30% del total a disposición final. Las alternativas que se llevaron a cabo fueron intensivas en mano de obra por lo que se recomienda realizar pruebas piloto a mayor escala con la incorporación de equipamiento como rompedora de bolsas y volteadoras de bolsas para ajustar los tiempos operativos y la productividad esperada.

## **6 REFERENCIAS**

AGUILERA, K. 2009. Primera experiencia chilena de tratamiento mecánico biológico para la gestión integral de residuos sólidos urbanos. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Barranquilla, Colombia.

CAMPITELLI, P. 2010. Selección de indicadores para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. Ciencia del suelo 28 (2): 223-231.

Censo Nacional de Población 2010, Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, Argentina. Consultado el 12-03-2013. Disponible en <http://www.censo2010.indec.gov.ar/>

RODRIGUEZ SALINA, M. y CORDOVA y VAZQUEZ, A. 2006. Manual de compostaje municipal. México.

Sistema nacional de información ambiental, Ministerio de medio ambiente, Chile. Consultado el 12-02-2013. Disponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-32296\\_Norma.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-32296_Norma.pdf)

VAZQUEZ, J. I. 2013. Responsable de Higiene Urbana de Unquillo. Entrevista personal. Unquillo.2013.