

# “Simulación de la Aplicación del Tratamiento Mecánico Biológico a los Residuos Urbanos. El Caso de la Ciudad de General Pico”

Doris Y. Rojas, Erica Milin, Adriana L. Michelis

dorisyarinarojas@yahoo.com.ar, ericamilin@yahoo.com, michelis@ing.unlpam.edu.ar

**Abstract.** General Pico city has a stable population around 52,000 inhabitants. The final disposition of the domiciliary solid remaindes is an important problem to be solved in this city. The garbage is accumulated progressively having every time greater difficulty to be taken advantage of and recycled. The investigation presented here allowed to construct a computacional model that simulates the management and the present treatment of the urban remainders, including in he himself the application of Biological Mechanical Treatment (TMB) of different ways, offering the possibility in front of studying the behavior of this system different tie scenes with the population growth, the increase in the generation of remainders, the capacity of the present plant (“Cooperative of Recycled Work of Don Alberto Limitada”), and the incidence in the distribution of key factors like reduction, reusability, recycling and power recovery.

**Key Words:** Simulation – Control Variables – Outcome Variables – Data – Remainers - Reduction – Reusability - Recycling - Biological Mechanical Treatment

## 1. Introducción

La ciudad de General Pico se halla al norte de la Provincia de La Pampa, es cabecera del departamento Maracó. La generación de los residuos de la ciudad se considera que ronda actualmente los 0.819 kg/hab/día y la composición de los mismos se puede ver reflejado con la composición promedio de los residuos a nivel nacional. Estos valores son estimados debido a la falta de estadísticas locales.

La municipalidad de General Pico es la encargada de la recolección de los residuos de la ciudad, que se realiza en el domicilio de cada habitante seis días a la semana (de lunes a sábado). La disposición inicial de los residuos se efectúa en cada hogar sin ningún tipo de clasificación y separación a cargo del generador de la misma.

Para organizar la recolección de residuos domiciliarios, la municipalidad ha dividido a la ciudad en doce zonas, de las cuales seis de ellas son recorridas en horarios diurnos y las restantes en horarios nocturnos. Se realiza de esta manera para poder utilizar los seis camiones compactadores de manera más eficiente.

## 2 Doris Y. Rojas, Erica Milin, Adriana L. Michelis

Además, la ciudad cuenta con un régimen de recolección de residuos especiales (ramas, hojas, cajas y cajones). Este servicio no incluye recolección de tierra, escombros o cualquier otro material de demolición. En este caso la ciudad ha sido dividida en 6 zonas (diferentes de las elegidas para la recolección de residuos domiciliarios).

Para la recolección especial, a los habitantes de la ciudad se les indica qué días del mes deben depositar la basura fuera de su domicilio, para que luego los camiones municipales pasen a retirarla.

Una vez realizada la recolección, se procede a llevar una parte de los residuos domiciliarios a la Planta de Reciclados “Don Alberto Limitada” (RRU<sup>1</sup>). El resto de la basura domiciliaria junto con los residuos especiales, se tiran en un basurero a cielo abierto.

La RRU se encarga de clasificar los residuos que recibe, en Papel y Cartón, Plásticos, Vidrios, Metales, Materia Orgánica, y, a su vez, algunos tipos de materiales como los plásticos, son separados según sus colores o su composición.

Una vez realizada la clasificación, la RRU vende esos materiales. El dinero recibido por la venta forma parte del sueldo mensual de cada empleado de la Cooperativa, aunque gran parte del sueldo es otorgada por la Municipalidad de la ciudad para motivar el trabajo y la unión de los empleados.

La Cooperativa se encarga (con apoyo monetario municipal) del mantenimiento de las herramientas con las que trabaja, como son: cinta transportadora, prensadoras, herramientas de mano, etc.

Una parte de la basura que ingresa al RRU, no logra ser aprovechada, dando así un resto de residuos que es depositado en el basurero a cielo abierto que está ubicado a pocos metros del lugar.

El gran inconveniente con el que se encuentra esta Cooperativa, es que los recursos materiales con los que cuenta son en su gran mayoría obsoletos, y por lo tanto, sufren de averías con mucha frecuencia, logrando así que la planta quede sin funcionar por momentos y que ciertas toneladas de basura no logren ser clasificadas.

Otro de los inconvenientes se debe a que la planta cuenta con un porcentaje de empleados que carecen de responsabilidad y compromiso con el trabajo importantísimo que realizan, y debido a esta situación, la Cooperativa presenta un porcentaje importante de ausentismo laboral, provocando ello menos porcentaje de clasificación de los residuos diarios.

Una vez clasificado lo que se puede, el resto va siendo depositado en un camión y luego, trasladado al basurero. Todos estos desechos, sumados a los de los camiones recolectores municipales que no son clasificados por la Cooperativa y a los de los camiones que recolectan los residuos especiales, se trasladan al basurero.

El basurero a cielo abierto tiene la particularidad de estar asentado a escasos metros de una laguna. Además, no cuenta con ningún tipo de control, produciendo así muchos perjuicios para la sociedad y el medio ambiente.

En repetidas ocasiones, se producen incineraciones no controladas en el basurero (afectando gravemente el ecosistema). Como el mismo se encuentra emplazado cerca de la Cooperativa, es frecuente que se lleguen a dañar parte de las instalaciones o residuos ya clasificados.

---

<sup>1</sup> RRU: Recuperación de Residuos Urbanos

Por el momento la municipalidad no está realizando ningún tipo de acción para evitar el daño que está ocasionando actualmente el basural y tampoco está previendo los inconvenientes que traerá esta práctica sin ningún control.

La ciudad de General Pico tiene la necesidad de aplicar algún tratamiento a los residuos urbanos que beneficie principalmente al medio ambiente y a la sociedad, aprovechando al máximo los recursos disponibles de que se disponen actualmente. Debido a esto, la alternativa de aplicar Tratamiento Mecánico Biológico se considera como viable entre todos los tratamientos analizados.

Para ayudar a los encargados de ejecutar un nuevo proyecto a tomar la decisión, se realizan tres simulaciones que permiten observar tres alternativas diferentes de cómo aplicar el tratamiento a la actual gestión de residuos urbanos en la ciudad.

## **2. Desarrollo**

### **2.1. Presentación del Problema**

La gestión integral de los residuos sólidos urbanos es una preocupación en todos los núcleos urbanos, su manejo inadecuado genera un gravísimo impacto en el medio ambiente.

El crecimiento de la población y el nivel de desarrollo e industrialización, genera la producción de grandes volúmenes de residuos urbanos y la incorporación de nuevos materiales, además de la aparición de basura de gran potencial contaminante, en espacios limitados.

La nueva problemática deriva en afecciones ambientales: contaminación de los suelos, producción de malos olores, contaminación de las aguas superficiales, proliferación de plagas, emisión de gases, destrucción de espacios naturales además del desarrollo de una economía marginal, la desvalorización de tierras, entre otros.

El tratamiento adecuado de los residuos, desde el punto de vista medioambiental, permitirá obtener un rendimiento de los residuos como así también su reincorporación a ciclos productivos, minimizando su impacto sobre el medioambiente.

#### **2.1.1. Tratamiento Mecánico Biológico**

El objetivo principal del TMB de residuos sólidos es minimizar el impacto ambiental de la disposición de residuos, mediante una amplia estabilización de los mismos. Además, este tipo de tratamiento puede aprovecharse también, para la separación de materiales reciclables [1]. Por lo tanto, el tratamiento no elimina la necesidad de disponer de un espacio para verter la basura, pero sí reduce tanto la toxicidad como la cantidad de residuos tras el proceso: en el marco de un TMB de residuos sólidos se pueden reducir notablemente, mediante la biodegradación controlada del material orgánico, tanto las emisiones de gas y líquidos que emanarían

posteriormente del material confinado en su disposición final como el propio volumen de los residuos a ser dispuestos.

Para este tratamiento son especialmente adecuados los residuos con gran contenido de material orgánico biodegradable, condición que generalmente se cumple en los residuos procedentes de hogares y comercios. No son apropiados los residuos que contienen sustancias tóxicas (p. ej. residuos peligrosos industriales), los residuos infecciosos (p. ej. residuos hospitalarios y de matadero) ni los residuos del sector de la construcción.

Las plantas de TMB de residuos pueden funcionar convenientemente, desde el punto de vista económico, incluso con bajas cantidades de residuos. Los costos de inversión de una planta de TMB de residuos son, generalmente, muy inferiores a los de una planta incineradora. Además, dentro de ciertos límites, el ejecutor del proyecto puede determinar el nivel de complejidad técnico-operativa y, con ello, el nivel de los costos de inversión, sin que esto provoque obligatoriamente una disminución fundamental en la calidad de los resultados del tratamiento.

Por estas razones, los especialistas consideran el tratamiento mecánico-biológico de residuos como una opción más económica y sencilla en su aspecto técnico que la incineración.

#### 2.1.1.1. Descripción del Tratamiento Mecánico Biológico

El TMB de residuos [2] comprende varias etapas:

**Recolección de Residuos:** Los residuos sólidos se recolectan en el domicilio del generador de los mismos ya sea con algún tipo de clasificación o sin clasificación alguna.

**Control de ingreso:** En esta etapa, todos los vehículos que ingresaran a la planta de TMB deberían ser registrados y documentados en lo referente a su procedencia, características y tipo de residuo ingresado.

**Separación de materiales:** Los residuos que ingresan pueden contener materiales que interfieren con las etapas subsecuentes del tratamiento, como residuos voluminosos y peligrosos, los cuales deben ser removidos, pudiéndose emplear para ello a las personas que trabajan como cirujas en los sitios de disposición final cercanos.

**Acondicionamiento:** En esta etapa es en la que se preparan los residuos para el tratamiento biológico. Aquí es necesario romper las bolsas de plástico que por lo general empaquetan a los residuos domésticos, logrando que los residuos de tipo orgánico se mezclen con el resto y permitan la aceleración de la degradación biológica.

**Tratamiento biológico (Pilas):** Empleando un excavador o retroexcavadora se apilan los residuos, usando como base tarimas de madera que permitan la ventilación de los residuos amontonados. La altura de las pilas será de 2 m, colocando en ellas tubos de PVC en un sistema horizontal-vertical que permitan la circulación de aire. Una pila tarda alrededor de 9 meses en madurar. Esta etapa permitirá ir obteniendo los parámetros de operación exactos para la etapa posterior.

Cada pila nueva deberá ser cubierta con un material filtrante que sirve como filtro para el metano y otros gases que provocan emisión de olores desagradables. Se espera

una reducción del 30% del peso, debido a la descomposición orgánica y a la evaporación de agua.

**Cribado:** El material obtenido en este proceso puede ser empleado como filtro para las pilas, pero primero tendrá que ser cernido para quitar aquellas fracciones que no son adecuadas para esta función (esa fracción no adecuada es menor al 7,5% del total del cribado).

**Disposición final:** El material grueso que fue separado mediante cribado será llevado a disposición final. Mediante el TMB se pueden reducir considerablemente los costos para la disposición final de los residuos. En el mejor de los casos, los ahorros en la disposición final pueden llevar a que el tratamiento se realice con un mínimo o ningún costo adicional respecto a la disposición directa. Las principales causas de este efecto de ahorro son las siguientes:

- Reducción de la masa debido al tratamiento
- Mayor capacidad de compactación de los residuos pre-tratados
- Ahorro en el volumen debido a no requerir de una cobertura intermedia

Adicionalmente, es posible reducir considerablemente las emisiones y riesgos al ambiente debido el pre-tratamiento de los residuos.

#### **2.1.1.2. Ventajas del Tratamiento Mecánico Biológico**

Las ventajas que ofrece este tipo de tratamiento están relacionadas, principalmente, con un impacto a la disposición final ([1], [3]), entre los que se destacan:

- Reducción del espacio necesario para la disposición final o prórroga de vida útil del sitio, debido a la reducción del volumen de los residuos y a un alto grado de compactación
- Reducción de generación de gases que provocan el efecto invernadero
- Reducción de lixiviados
- Reducción de malos olores
- Este tipo de tratamiento puede aprovechar la separación de materiales reciclables
- Alto grado de descomposición de la materia orgánica antes de su disposición
- Material es biológicamente semi-inerte
- El proceso puede ser aplicado para hacer compostaje

#### **2.1.1.3. Limitaciones de Aplicar el Tratamiento Mecánico Biológico a la Ciudad**

La municipalidad de General Pico no dispone de partidas presupuestarias suficientes para la implementación de modificaciones importantes en cuanto a costos en la gestión de los residuos sólidos urbanos, por ello, teniendo en cuenta esas características, se analiza la aplicación del TMB sin modificar o modificando lo mínimo posible el actual sistema de gestión de los residuos sólidos urbanos.

También se tiene en consideración, que el personal del que se dispone, sean los trabajadores municipales en el área de recolección, como los empleados de la RRU son, generalmente, personas que se resisten a los cambios.

Por tales razones se analizan varias alternativas de tratamiento, entre las que se pueden nombrar pirolisis, incineración, composteo, estabilización biológica mecánica, etc., y se llega a la conclusión que el más factible de implementar es el TMB, debido a que no se necesita alto nivel de complejidad técnico-operativa, por lo tanto las personas que actualmente trabajan en esas áreas pueden adaptarse sin inconvenientes a este nuevo proceso.

Las actuales instalaciones pueden ser adaptadas perfectamente al nuevo tratamiento, sin sufrir importantes modificaciones, debido a que se cuenta con un área de clasificación de los residuos en la RRU.

#### **2.1.1.4. Alternativas Estudiadas**

Las diferentes alternativas y posibilidades de aplicar TMB a la actual gestión integral de residuos sólidos urbanos de la ciudad de General Pico, serían:

**Alternativa 1:** Esta es la alternativa que modifica en menor medida la actual gestión de residuos de la ciudad, en la cual se aplicaría el TMB solamente a los residuos que no van a la RRU. Los restos de la aplicación del Tratamiento son depositados en el basurero. Además, los residuos que ingresaron a la Cooperativa y no fueron aprovechados por la misma también van directamente al Basurero a cielo abierto sin ningún tipo de tratamiento, tal cual se realiza actualmente.

**Alternativa 2:** En esta alternativa, se lleva un porcentaje de la totalidad de basura producida por la ciudad, a la RRU, donde clasifican los residuos que luego se venderán. Tanto lo que no se recupera como el resto de los residuos recolectados que no han pasado por el reciclado, son tratados con el TMB. Lo que queda como resto después de aplicar el TMB, es depositado en el basurero a cielo abierto.

**Alternativa 3:** En este caso todos los residuos recolectados se envían a la RRU. En este lugar se recuperan los residuos que sean factibles de vender. Luego, los residuos que no son recuperados por la Cooperativa pasan por el TMB y los restos del tratamiento son enviados al basurero a cielo abierto.

## 2.2. Resolución

### 2.2.1. Análisis Previo

#### 2.2.1.1. Determinación de la Metodología

La metodología a utilizar en la presente simulación es  $\Delta t$  constante con  $\Delta t$  igual a 1 mes, y se realizan tres simulaciones, una para cada alternativa planteada.

#### 2.2.1.2. Clasificación de las variables

Las variables se clasifican en dos grandes grupos, Variables Exógenas y Variables Endógenas, tal como se distingue a continuación:

**Variabes Exógenas:** son aquellas variables cuyos valores se toman de la realidad a estudiar, y dentro de estas variables se encuentran las variables de control y los datos.

*Datos:* son variables que se presentan al modelo a través de funciones de densidad de probabilidad. En la simulación se trabaja con los siguientes datos

- Cantidad de nacimientos en la ciudad, en forma mensual
- Cantidad de defunciones en la ciudad, en forma mensual

*Control:* esta variable es aquella variable que es manipulada por las personas que toman las decisiones sobre el sistema. A partir de esta variable se diseñan lotes de prueba, o sea, se define con qué valores se va a correr la simulación, para poder observar cómo reacciona el modelo frente a distintas situaciones, a este proceso se le llama diseño del experimento. En este caso se utilizan tres variables de control, estas son:

- Basura generada por día por persona en kilos
- Porcentaje de clasificación de la RRU
- Porcentaje de basura que se destina al TMB

**Variabes Endógenas:** son aquellas variables cuyos valores son obtenidos a través del modelo. Dentro de estas variables se encuentran las variables de estado y las variables de resultado:

*Estado:* esta variable indica cuál es la situación del sistema a lo largo de la simulación, en este caso se tiene una variable de estado:

- Basura en pilas

*Resultado:* son las variables cuyos valores se desean conocer a partir de la simulación.

- Duración del Basurero con TMB en Meses
- Duración del Basurero con TMB en Años
- Duración del Basurero sin TMB con los servicios de la RRU en Meses
- Duración del Basurero sin TMB con los servicios de la RRU en Años

- Duración del Basurero sin TMB sin los servicios de la RRU en Meses
- Duración del Basurero sin TMB sin los servicios de la RRU en Años
- Porcentaje de Vida Útil Extra del Basurero por usar TMB con la RRU.
- Vida Útil Extra del Basurero por usar TMB con la RRU en Meses
- Vida Útil Extra del Basurero por usar TMB con la RRU en Años
- Porcentaje de Vida Útil Extra del Basurero por usar TMB sin la RRU.
- Vida Útil Extra del Basurero por usar TMB sin la RRU en Meses
- Vida Útil Extra del Basurero por usar TMB sin la RRU en Años.
- Toneladas recuperados de basura en la RRU por mes en promedio

### 2.2.1.3. Clasificación de los Eventos

En esta simulación se tienen sólo eventos propios del  $\Delta t$  (son los que hacen que las variables de estado varíen a lo largo de la simulación -aumentando o decrementando su valor-). Estos eventos son:

- Se coloca basura acondicionada a las pilas
- Se coloca filtro biológico en las pilas
- Se saca de las pilas basura tratada para colocar en basurero
- Se saca de las pilas basura que se cribará
- Un porcentaje de las pilas se degrada por el tratamiento

Con respecto a Eventos comprometidos en  $\Delta t$  anteriores y Eventos que comprometen para  $\Delta t$  futuros, no hay en la presente simulación.

### 2.2.1.4. Desarrollo de las Funciones con @Risk

Para el desarrollo de las funciones a partir de los valores obtenidos de varios meses se utilizó el software @Risk [4], a continuación se muestran las funciones de densidad de probabilidad obtenidas

#### Nacimientos en la ciudad, en forma mensual

En el Anexo I se pueden observar los datos que se obtuvieron de los nacimientos desde el mes de Enero del 2000 a Julio del 2009 para la ciudad de General Pico. Estos datos fueron procesados por la herramienta @Risk y se obtuvo el siguiente resultado:

La distribución que se ajusta a los valores de los nacimientos es:

$$\text{Weibull}(1.4533, 27.361) \text{ Shift}=+81.279 \quad (1)$$

#### Defunciones en la ciudad, en forma mensual

Al igual que con los nacimientos, los datos procesados fueron obtenidos de las defunciones de la ciudad de General Pico (Ver Anexo I). La distribución que más se ajusta a los valores de las defunciones es:

$$\text{Normal}(50.8710, 8.6207) \quad (2)$$



### 2.2.2. Desarrollo de la Simulación

La simulación se realizó con el software Stella [5] en su versión 8.0 y a partir de éste se desarrolló un diagrama de bloques por cada alternativa (ver FIGURA 1, para la alternativa 2), y las correspondientes ecuaciones I Think que se pueden observar en la FIGURA 2 (para la alternativa 2), para su posterior configuración y ejecución de manera de obtener los resultados que se desean conocer.

#### 2.2.2.1. Configuración de la Simulación

Dado que el valor  $\Delta t$  del problema es equivalente a 1 mes, cada corrida estará representando esta unidad de tiempo. Para que se cumpla la probabilidad de las funciones de densidad de probabilidad, se simulará con un tiempo final igual a 14400 meses (To 1, From 14400).

#### 2.2.3. Corridos Realizadas

El propósito de esta simulación es aplicar el TMB en distintas instancias de la actual gestión de residuos sólidos urbanos y observar los resultados obtenidos. Se pretende analizar:

- Duración del basurero a cielo abierto aplicando o no el TMB y con la combinación de utilizar o no los servicios ofrecidos por la RRU.
- Porcentaje extra de vida útil del basural que se obtiene al aplicar el TMB.
- Porcentaje extra de vida útil del basural usando TMB con la RRU con respecto a no utilizar ni tratamiento ni la clasificación realizada por la cooperativa.
- Toneladas recuperadas por la RRU por mes
- Cómo varían los ítems anteriores al modificar variables como el peso de basura generada por persona por día, o el porcentaje que clasifica la RRU.

Para explotar el modelo se diseñaron diferentes experimentos para cada alternativa planteada. Tanto para la alternativa 1 como para la alternativa 2 se plantearon los mismos escenarios, variando las variables de control A\_TRATAMIENTO% y CLASIFICA%, en cambio para la tercer alternativa sólo se realizan variaciones en la variable CLASIFICA%.

### 2.3. Resultados

El análisis de las corridas realizadas permite plantear diferentes propuestas, dando recomendaciones acerca de cada alternativa diseñada.

La aplicación de la primer alternativa es la que menos se recomienda, debido a que tiene falta de sentido común la implementación del tratamiento y no utilizarlo también con lo que la RRU no clasifica. Pero se puede notar claramente que a medida que aumenta la capacidad de clasificación crece notablemente la vida útil del

basurero, y al mismo porcentaje de clasificación por parte de la RRU es conveniente aumentar el porcentaje de basura destinada a tratamiento (Figura 1).

También se puede destacar la importancia de la RRU para la recuperación de materiales que se pueden destinar a la venta.

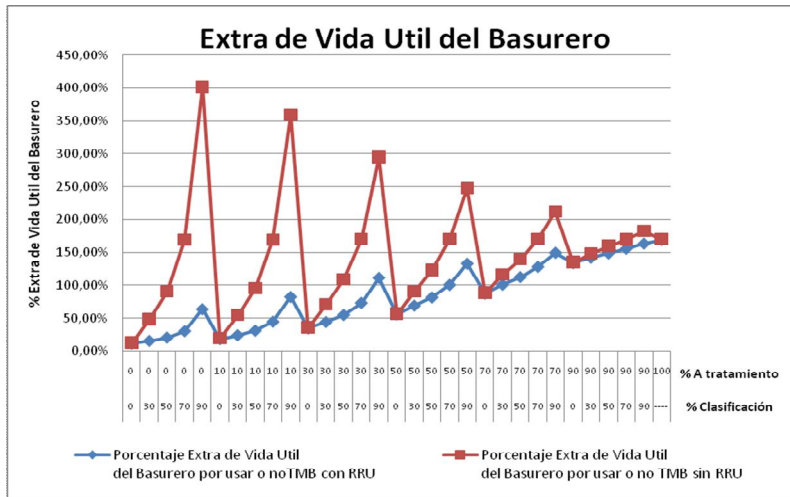


Fig. 1. Porcentaje de Vida Útil Extra por usar o no TMB con o sin RRU para la alternativa 1

La aplicación de la tercer alternativa sería lo ideal, ya que de esta forma se aprovecharían los residuos de toda la ciudad, gracias al RRU, y luego lo que no clasificara la misma, se reduciría en densidad y en toxicidad con ayuda del TMB aplicado. En esta alternativa, a medida que se clasifica más basura, mayor vida útil tendrá el basurero de la ciudad y más cantidad de basura será recuperada para la posterior venta. Desde ya que esta alternativa sería una de las más difícil de aplicar, debido a que se tiene que implementar el TMB (con el costo de implementación más el del personal que se necesita para llevar a cabo el proceso) y poner en condiciones la RRU (con el acondicionamiento de las máquinas e instrumentos necesarios para la clasificación y el aumento de la cantidad de empleados o aumento de la jornada laboral de los empleados actuales, como para alcanzar la clasificación del volumen de basura generada por toda la ciudad).

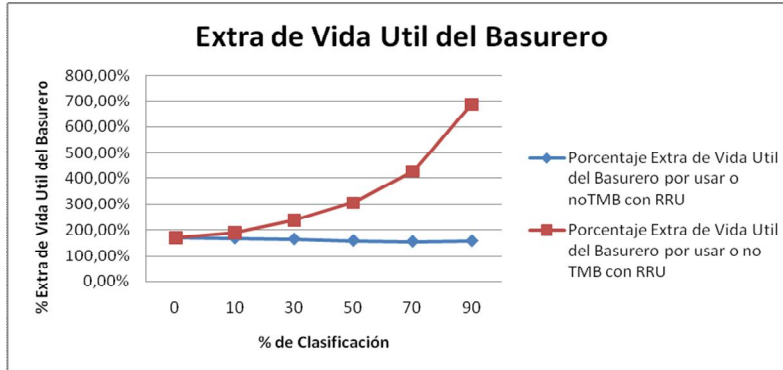


Fig. 2. Porcentaje de Vida Útil Extra por usar o no TMB con o sin RRU para la alternativa 3

La segunda alternativa sería la más fácil de implementar ya que la RRU podría no verse afectada, manteniendo el nivel actual de clasificación. Igualmente, a más clasificación del RRU, más duración tendrá el basurero, pero de todas maneras con la segunda alternativa se logra un beneficio importante con respecto a aplicar o no el TMB.

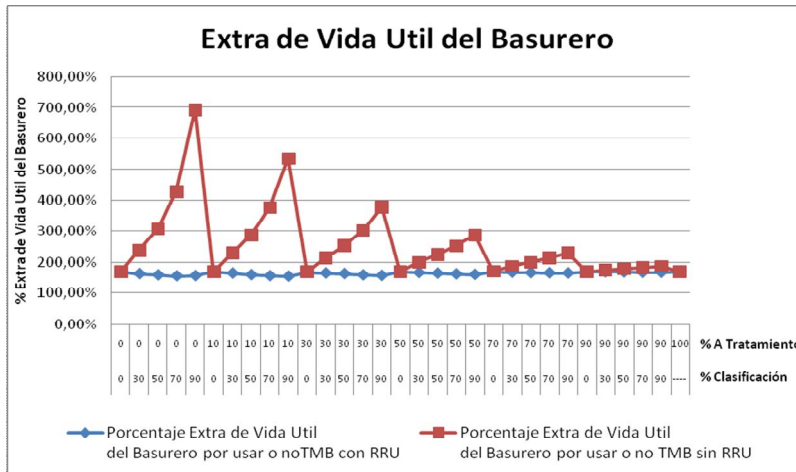
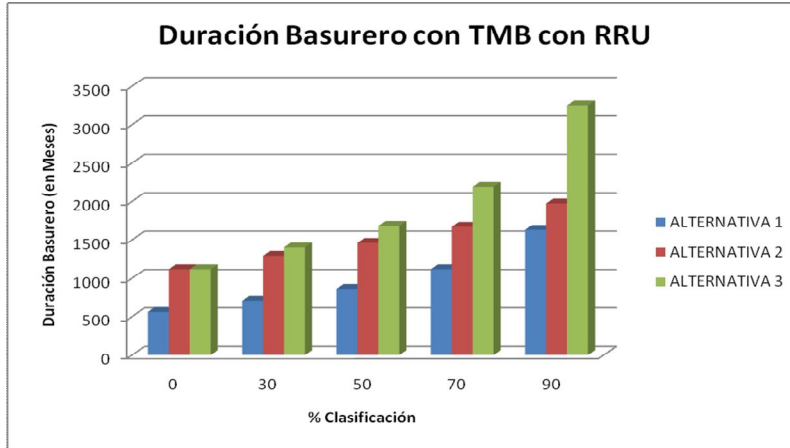
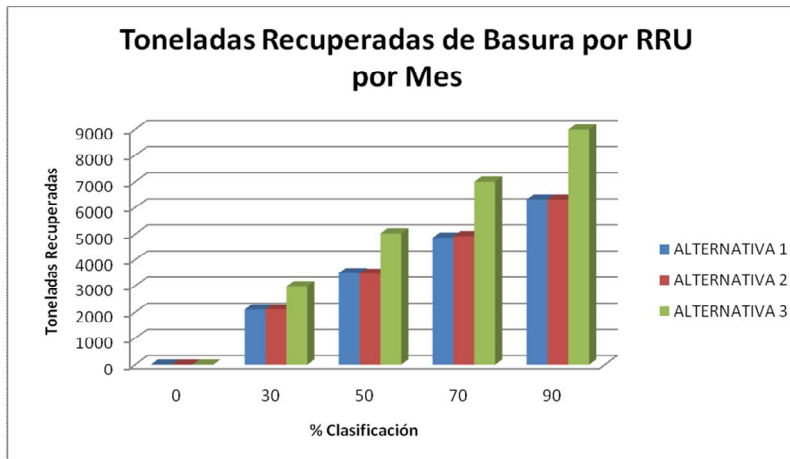


Fig. 3. Porcentaje de Vida Útil Extra por usar o no TMB con o sin RRU para la alternativa 2.



**Fig. 4.** Comparación de las tres alternativas de la duración del basurero aplicando tratamiento y utilizando la RRU. Para alternativas 1 y 2 se considera % a tratamiento igual a 30



**Fig. 5.** Comparación de las tres alternativas de la basura recuperada por mes aplicando tratamiento y utilizando la RRU. Para alternativas 1 y 2 se considera % a tratamiento igual a 30

En las Figuras 4 y 5 se puede observar la ventaja de aplicar la alternativa 3 frente a las otras alternativas planteadas, en ambas Figuras se utiliza % a Tratamiento igual a 30 para poder realizar la comparación. Pero, teniendo en cuenta las necesidades y las características actuales de la ciudad, tratando de maximizar la duración del basurero modificando lo mínimo posible la gestión actual de los residuos, se pueden proponer varias sugerencias.

### 3. Conclusiones

Debido a que se deben plantear alternativas que sean fáciles de implementar y con el menor costo posible, se recomienda efectuar la alternativa 2. Dentro de esta alternativa, se destacan las variantes que se observan en la Tabla 1, teniendo en cuenta que en el TMB se traten entre el 30% y 70% de la basura (actualmente, del total de basura generada en la ciudad, el porcentaje que se lleva a la RRU es el 30%, por eso no se considera un porcentaje mayor de basura a la que se aplica el TMB, sólo se evaluó hasta el 70%). También se debe considerar que de toda la basura que recibe la RRU, ésta debería al menos clasificar el 30%.

Las situaciones más recomendables son que se lleve a la RRU el mayor porcentaje posible, por eso, en la Tabla 1 se destacan cuatro opciones, donde se recomienda que a la Cooperativa se le envíe el 70% de la basura de la ciudad (a tratamiento el 30%) y que clasifique la mayor cantidad que les sea posible. Se puede observar que si clasificaran sólo el 30% el basurero tendría una vida útil de 1293 meses (107,75 años) y a medida que este porcentaje es mayor, este tiempo se ve incrementado, llegando incluso a 1972 meses (164,33 años) si se clasificara el 90%.

**Table 1.** Propuestas recomendables para la alternativa 2

<b>ALTERNATIVA 2</b>		<b>0,819 kg basura/pers/dia</b>			
Clasifican %	A tratamiento % (TMB%)	Duración Basurero con TMB (meses)	% Extra de Vida útil del Basurero por usar o no TMB con RRU	% Extra de Vida útil del Basurero por usar o no TMB sin RRU	Toneladas de Basura Recuperada por RRU por mes
<b>30</b>	30	1293	165,50%	213,83%	2107,0
<b>50</b>	30	1460	163,54%	253,51%	3481,4
<b>70</b>	30	1671	159,07%	302,65%	4923,1
<b>90</b>	30	1972	157,44%	378,64%	6311,0
<b>30</b>	50	1237	167,17%	200,24%	1498,7
<b>50</b>	50	1335	164,88%	224,03%	2503,4
<b>70</b>	50	1444	162,55%	252,20%	3506,8
<b>90</b>	50	1599	160,85%	287,17%	4495,9
<b>30</b>	70	1184	168,48%	187,38%	897,1
<b>50</b>	70	1235	166,74%	199,76%	1502,8
<b>70</b>	70	1307	166,19%	214,18%	2087,4
<b>90</b>	70	1370	165,50%	230,12%	2689,2

### Referencias

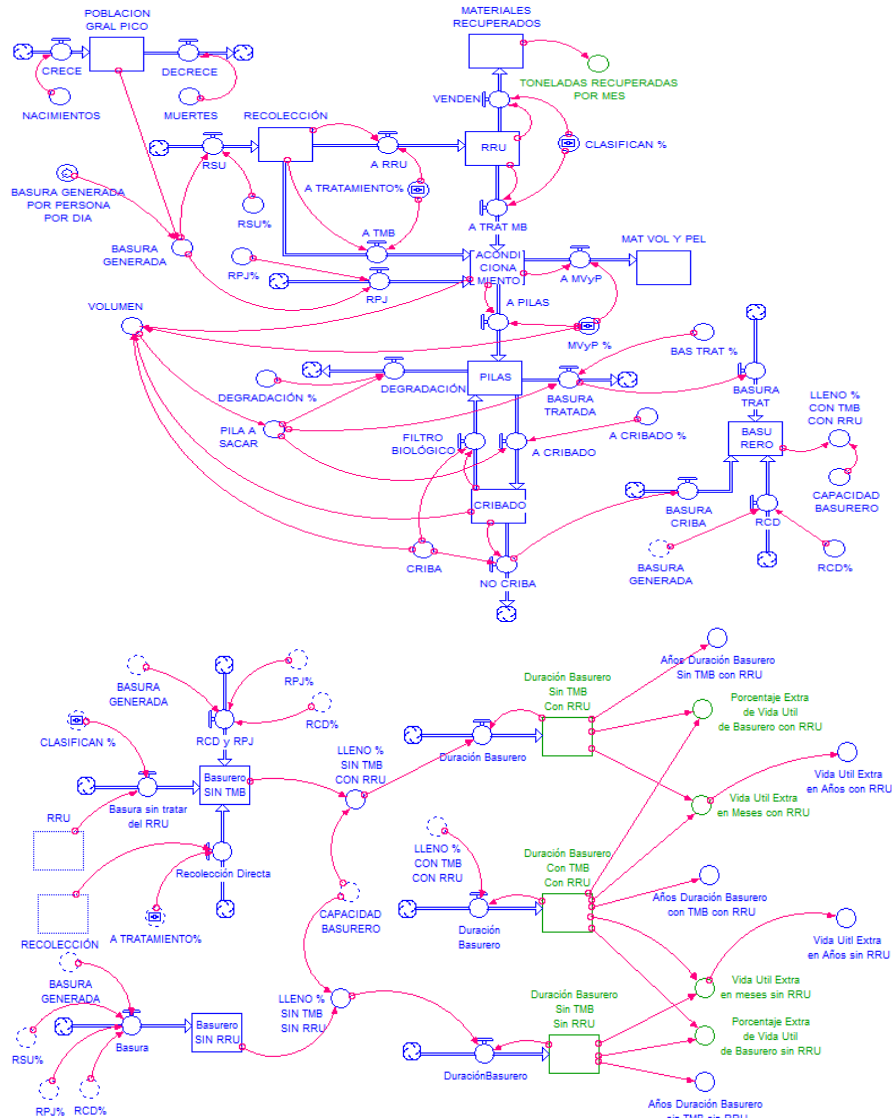
1. GTZ, División 44 - Medio ambiente y infraestructura “Proyecto sectorial Tratamiento mecánico-biológico de residuos sólidos” (2003)
2. Gobierno del Estado de México, Secretaría de Ecología “Proyecto de apoyo a la gestión de residuos sólidos” (2002)

3. Femisca, "Opciones Tecnológicas para el Tratamiento y Eliminación de los Residuos Sólidos"
4. <http://www.palisade-lta.com/>
5. <http://www.iseesystems.com/>

### **Anexo I: Nacimientos y defunciones mensuales en la ciudad de General Pico**

Mes Año	Nacimientos	Defunciones
enero 2007	106	49
febrero 2007	92	31
marzo 2007	112	62
abril 2007	116	37
mayo 2007	100	54
junio 2007	102	53
julio 2007	94	64
agosto 2007	88	67
septiembre 2007	89	49
octubre 2007	108	57
noviembre 2007	114	51
diciembre 2007	98	60
enero 2008	130	62
febrero 2008	82	45
marzo 2008	87	48
abril 2008	113	53
mayo 2008	103	58
junio 2008	87	52
julio 2008	98	49
agosto 2008	110	37
septiembre 2008	105	55
octubre 2008	97	45
noviembre 2008	92	45
diciembre 2008	111	59
enero 2009	94	48
febrero 2009	89	38
marzo 2009	110	46
abril 2009	126	46
mayo 2009	136	46
junio 2009	144	49
julio 2009	156	62

**Anexo II: Implementación del sistema estudiado en Stella (alternativa 2)**



**Fig. 6.** Diagrama de Bloques de la Simulación, Alternativa 2

```

ACONDI_CIONA_MIENTO(t) = ACONDI_CIONA_MIENTO(t - dt) + (RPJ + A_TRAT_MB + A_TMB - A_PILAS - A_MVyP) * dt
INIT ACONDI_CIONA_MIENTO = 0
INFLOWS:
  RPJ = BASURA_GENERADA*RPJ%
  A_TRAT_MB = RRU*(100-CLASIFICAN_%)/100
  A_TMB = RECOLECCIÓN*A_TRATAMIENTO%/100
OUTFLOWS:
  A_PILAS = ACONDI_CIONA_MIENTO*(100-MVyP_%)/100
  A_MVyP = ACONDI_CIONA_MIENTO*MVyP_%/100
Basurero_SIN_RRU(t) = Basurero_SIN_RRU(t - dt) + (Basura) * dt
INIT Basurero_SIN_RRU = 0
INFLOWS:
  Basura =
    ((BASURA_GENERADA*RSU%/0.6)+(BASURA_GENERADA*RPJ%)0.3+(BASURA_GENERADA*RCD%))/1000
Basurero_SIN_TMB(t) = Basurero_SIN_TMB(t - dt) + (Basura_sin_tratar_del_RRU + RCD_y_RPJ + Recolección_Directa) * dt
INIT Basurero_SIN_TMB = 0
INFLOWS:
  Basura_sin_tratar_del_RRU = RRU*(100-CLASIFICAN_%)/100/0.6/1000
  RCD_y_RPJ = ((BASURA_GENERADA*RPJ%)0.3+(BASURA_GENERADA*RCD%))/1000
  Recolección_Directa = RECOLECCIÓN*A_TRATAMIENTO%/100/0.6/1000
BASU_RERO(t) = BASU_RERO(t - dt) + (RCD + BASURA_TRAT + BASURA_CRIBA) * dt
INIT BASU_RERO = 0
INFLOWS:
  RCD = BASURA_GENERADA*RCD%/1000
  BASURA_TRAT = BASURA_TRATADA/1.4/1000
  BASURA_CRIBA = NO_CRIBA/1.4/1000
CRIBADO(t) = CRIBADO(t - dt) + (A_CRIBADO - FILTRO_BIOLÓGICO - NO_CRIBA) * dt
INIT CRIBADO = 0
INFLOWS:
  A_CRIBADO = PILA_A_SACAR*A_CRIBADO_%/100
OUTFLOWS:
  FILTRO_BIOLÓGICO = CRIBADO*CRIBA/100
  NO_CRIBA = (CRIBADO*(100-CRIBA)/100)
Duración_Basurero_Con_TMB_Con_RRU(t) = Duración_Basurero_Con_TMB_Con_RRU(t - dt) + (Duración_Basurero) * dt
INIT Duración_Basurero_Con_TMB_Con_RRU = 0
INFLOWS:
  Duración_Basurero = if (Duración_Basurero_Con_TMB_Con_RRU=0 AND LLENO_%_CON_TMB_CON_RRU>=100)
    then TIME else 0
Duración_Basurero_Sin_TMB_Con_RRU(t) = Duración_Basurero_Sin_TMB_Con_RRU(t - dt) + (Duración_Basurero) * dt
INIT Duración_Basurero_Sin_TMB_Con_RRU = 0
INFLOWS:
  Duración_Basurero = if (Duración_Basurero_Sin_TMB_Con_RRU=0 AND LLENO_%_SIN_TMB_CON_RRU>=100)
    THEN TIME ELSE 0
Duración_Basurero_Sin_TMB_Sin_RRU(t) = Duración_Basurero_Sin_TMB_Sin_RRU(t - dt) + (DuraciónBasurero) * dt
INIT Duración_Basurero_Sin_TMB_Sin_RRU = 0
INFLOWS:
  DuraciónBasurero = if (Duración_Basurero_Sin_TMB_Sin_RRU=0 AND LLENO_%_SIN_TMB_SIN_RRU>=100) THEN
    TIME ELSE 0

```



**“Simulación de la Aplicación del Tratamiento Mecánico Biológico a los Residuos Urbanos. El Caso de la Ciudad de General Pico” 17**

- MATERIALES\_RECUPERADOS(t) = MATERIALES\_RECUPERADOS(t - dt) + (VENDEN) \* dt  
INIT MATERIALES\_RECUPERADOS = 0  
INFLOWS:  
    ❖ VENDEN = RRU\*CLASIFICAN\_%/100
- MAT\_VOL\_Y\_PEL(t) = MAT\_VOL\_Y\_PEL(t - dt) + (A\_MVyP) \* dt  
INIT MAT\_VOL\_Y\_PEL = 0  
INFLOWS:  
    ❖ A\_MVyP = ACONDICIONAMIENTO\*MVyP\_%/100
- PILAS(t) = PILAS(t - dt) + (A\_PILAS + FILTRO\_BIOLÓGICO - A\_CRIBADO - DEGRADACIÓN - BASURA\_TRATADA) \* dt  
INIT PILAS = 0  
INFLOWS:  
    ❖ A\_PILAS = ACONDICIONAMIENTO\*(100-MVyP\_%)/100  
    ❖ FILTRO\_BIOLÓGICO = CRIBADO\*CRIBA/100  
OUTFLOWS:  
    ❖ A\_CRIBADO = PILA\_A\_\_SACAR\*A\_CRIBADO\_%/100  
    ❖ DEGRADACIÓN = PILA\_A\_\_SACAR\*DEGRADACIÓN\_%/100  
    ❖ BASURA\_TRATADA = (PILA\_A\_\_SACAR\*BAS\_TRAT\_%/100)
- POBLACION\_GRAL\_PICO(t) = POBLACION\_GRAL\_PICO(t - dt) + (CRECE - DECRECE) \* dt  
INIT POBLACION\_GRAL\_PICO = 52475  
INFLOWS:  
    ❖ CRECE = NACIMIENTOS  
OUTFLOWS:  
    ❖ DECRECE = MUERTES
- RECOLECCIÓN(t) = RECOLECCIÓN(t - dt) + (RSU - A\_RRU - A\_TMB) \* dt  
INIT RECOLECCIÓN = 0  
INFLOWS:  
    ❖ RSU = BASURA\_GENERADA\*RSU%  
OUTFLOWS:  
    ❖ A\_RRU = RECOLECCIÓN\*(100-A\_TRATAMIENTO%)/100  
    ❖ A\_TMB = RECOLECCIÓN\*A\_TRATAMIENTO%/100
- RRU(t) = RRU(t - dt) + (A\_RRU - A\_TRAT\_MB - VENDEN) \* dt  
INIT RRU = 0  
INFLOWS:  
    ❖ A\_RRU = RECOLECCIÓN\*(100-A\_TRATAMIENTO%)/100  
OUTFLOWS:  
    ❖ A\_TRAT\_MB = RRU\*(100-CLASIFICAN\_%)/100  
    ❖ VENDEN = RRU\*CLASIFICAN\_%/100
- Años\_Duración\_Basurero\_con\_TMB\_con\_RRU = Duración\_Basurero\_Con\_TMB\_Con\_RRU/12
- Años\_Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_con\_RRU = Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Con\_RRU/12
- Años\_Duración\_Basurero\_sin\_TMB\_sin\_RRU = Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Sin\_RRU/12
- A\_CRIBADO\_% = 18.8
- A\_TRATAMIENTO% = 10
- BASURA\_GENERADA = POBLACION\_GRAL\_PICO\*BASURA\_GENERADA\_POR\_PERSONA\_POR\_DIA\*30
- BASURA\_GENERADA\_POR\_PERSONA\_POR\_DIA = 0.819
- BAS\_TRAT\_% = 56.4
- CAPACIDAD\_BASURERO = 38.48\*10000\*3
- CLASIFICAN\_% = 30
- CRIBA = 92.36
- DEGRADACIÓN\_% = 24.8
- LLENO\_%\_CON\_TMB\_CON\_RRU = BASURERO\*100/CAPACIDAD\_BASURERO

18 Doris Y. Rojas, Erica Milin, Adriana L. Michelis

○  $LLENO\_ \%\_SIN\_TMB\_SIN\_RRU = Basurero\_SIN\_RRU * 100 / CAPACIDAD\_BASURERO$   
○  $LLENO\_ \%\_SIN\_TMB\_CON\_RRU = Basurero\_SIN\_TMB * 100 / CAPACIDAD\_BASURERO$   
○  $MUERTES = INT(Normal(50.8710, 8.6207))$   
○  $MVyP\_ \% = 0.1$   
○  $NACIMIENTOS = INT(27.361 * (-LOGN(1 - RANDOM(0,1)))^{1/1.4533}) + 81.279$   
○  $PILA\_A\_SACAR = PULSE(VOLUMEN, 9, 1)$   
○  $Porcentaje\_Extra\_de\_Vida\_Util\_de\_Basurero\_con\_RRU = if (Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Con\_RRU <> 0) then ((Duración\_Basurero\_Con\_TMB\_Con\_RRU - Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Con\_RRU) * 100 / Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Con\_RRU) ELSE 0$   
○  $Porcentaje\_Extra\_de\_Vida\_Util\_de\_Basurero\_sin\_RRU = if (Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Sin\_RRU <> 0) then ((Duración\_Basurero\_Con\_TMB\_Con\_RRU - Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Sin\_RRU) * 100 / Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Sin\_RRU) ELSE 0$   
○  $RCD\_ \% = 0.0181$   
○  $RPJ\_ \% = 0.0769$   
○  $RSU\_ \% = 0.905$   
○  $TONELADAS\_RECUPERADAS\_POR\_MES = IF (TIME <> 0) THEN MATERIALES\_RECUPERADOS / TIME / 1000 ELSE 0$   
○  $Vida\_Util\_Extra\_en\_Años\_sin\_RRU = Vida\_Util\_Extra\_en\_meses\_sin\_RRU / 12$   
○  $Vida\_Util\_Extra\_en\_Meses\_con\_RRU = if (Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Con\_RRU <> 0) then (Duración\_Basurero\_Con\_TMB\_Con\_RRU - Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Con\_RRU) ELSE 0$   
○  $Vida\_Util\_Extra\_en\_meses\_sin\_RRU = if (Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Sin\_RRU <> 0) then (Duración\_Basurero\_Con\_TMB\_Con\_RRU - Duración\_Basurero\_Sin\_TMB\_Sin\_RRU) ELSE 0$   
○  $Vida\_Util\_Extra\_en\_Años\_con\_RRU = Vida\_Util\_Extra\_en\_Meses\_con\_RRU / 12$   
○  $VOLUMEN = (ACONDICIONAMIENTO * (100 - MVyP\_ \%)) / 100 + (CRIBADO * CRIBA / 100)$

**Fig. 7.** Ecuaciones I Think de la simulación, Alternativa 2