

**Proyecto Integral de la Gestión Ambiental de los Residuos Sólidos de  
Desaguadero (Bolivia y Perú)**

*Proyecto Piloto de Compostaje*

**Ing. J.P. Zandvliet  
New York, Marzo 2009**

# Índice del Contenido

Índice del Contenido .....	2
1 Justificación del Proyecto Piloto de Compostaje .....	4
1.1 Ventajas del Proceso de Compostaje .....	4
1.1.1 Disminuir los Volúmenes de la Disposición Final de los RSU .....	4
1.1.2 Generar Ingresos y Empleo .....	4
1.1.3 Aprender de la Naturaleza .....	4
1.1.4 Cerrar un Ciclo Natural de Nutrientes .....	4
1.2 Exigencias del Proceso de Compostaje .....	4
1.3 Condiciones Altiplánicas Adversas .....	5
1.4 Solución Innovadora .....	5
1.5 Proyecto Piloto de Compostaje .....	6
1.6 Alcance para la Zona Andina .....	6
2 Proceso de Compostaje .....	7
2.1 Pretratamiento .....	7
2.2 Primera Fase de Fermentación Termófila .....	7
2.3 Segunda Fase de Fermentación Mesófila .....	7
2.4 Tercera Fase de Maduración .....	7
3 Diseño Técnico de la Nave de Compostaje .....	9
3.1 Tamaño de la Urbanización para el Proyecto Piloto .....	9
3.2 Frecuencia de Volcar el Compost .....	9
3.3 Número de Pozos de Compostaje .....	10
3.4 Horario de Manejo de los Pozos de Compostaje .....	10
3.5 Tamaños de los Pozos de Fermentación .....	10
3.6 Almacén del Compost Maduro .....	10
3.7 Exigencias de Ventilación de los Pozos de Compostaje .....	11
3.7.1 Experiencias Empíricas de la Ventilación Artificial .....	11
3.7.2 Ventilación Artificial por Molinos de Ventilación .....	11
3.7.3 Ventilación Artificial por Ventiladores Eléctricos .....	12
3.8 Exigencia de Riego de los Pozos de Compostaje .....	12
3.9 Abastecimiento de Agua .....	13
3.9.1 Condensar el Vapor de Agua de la Ventilación Artificial .....	13
3.9.2 Cosecha de Lluvia del Techo de la Nave .....	13
3.10 Consideraciones Constructivas del Proyecto Piloto .....	13
3.10.1 Terreno .....	13
3.10.2 Nave de Compostaje .....	14
3.10.3 Servicios Básicos .....	14
4 Manual de Operación .....	15
4.1 Preparar Materia Orgánica Nueva .....	15
4.2 Agregar Materia Orgánica Nueva en el Primero Pozo .....	15
4.3 Volcar Compost de Uno Pozo al Próximo .....	16
4.4 Manejar el Sistema de Ventilación Artificial .....	16
4.5 Almacenar Compost Maduro .....	16
5 Programa de Estudio .....	17
5.1 Datos y Muestras para Conseguir .....	17
5.1.1 Características Meteorológicas .....	17
5.1.2 Características de la Materia Orgánica Entrando .....	17
5.1.3 Características del Compost de Cada Pozo .....	17
5.1.4 Condiciones del Compostaje Dentro de los Pozos .....	18
5.2 Métodos y Herramientas para las Mediciones .....	18
5.2.1 Mediciones Meteorológicas .....	18

5.2.2	Mediciones del Compost.....	18
5.2.3	Mediciones de los Gases .....	19
5.3	Análisis de las Muestras.....	19
5.3.1	Muestras de Compost .....	19
5.3.2	Muestras de Gases .....	19
5.4	Estudio del Proceso de Compostaje .....	20
5.4.1	Optimación del Proceso de Compostaje .....	20
5.4.2	Optimación de la Construcción de la Nave .....	20
5.5	Plazo de los Estudios.....	20
5.5.1	Período de Arranque y Adaptación .....	20
5.5.2	Plazo Típico de un Experimento.....	21
5.5.3	Plazo Total de los Estudios.....	21
	Conclusiones .....	22
	Anexos .....	23
	Dibujos .....	25

# 1 Justificación del Proyecto Piloto de Compostaje

## 1.1 Ventajas del Proceso de Compostaje

### 1.1.1 Disminuir los Volúmenes de la Disposición Final de los RSU

La ambición de compostar los RSU (Residuos Sólidos Urbanos) orgánicos proviene del deseo de disminuir los volúmenes de los RSU que deben ser vertidos. Los RSU orgánicos constituyen una parte considerable de los RSU. En Desaguadero los RSU orgánicos forman casi los 40% de los RSU. Convertir estos 40% de RSU orgánicos en compost es una medida importante para no dejar a expandir desfrenadamente al RSRS (Relleno Sanitario de Residuos Sólidos).

### 1.1.2 Generar Ingresos y Empleo

Una buena calidad de compost exige un proceso de compostaje bien manejado, para lo cual se necesita empleados:

- Seleccionar los RSU orgánicos y quitar los RSU que no pertenecen al compost.
- Voltrear los montones de materia orgánica con frecuencia.
- Monitorear, entre otros, la temperatura y la humedad de la materia orgánica.
- Almacenar, pesar y vender el compost.

Así el manejo de basura que solo cuesta dinero, se convierte en un proceso productivo que genera empleo e ingresos.

### 1.1.3 Aprender de la Naturaleza

La naturaleza nos enseña que la basura no existe realmente. En la naturaleza todo nace, crece, florece y muere en un ciclo eterno. Todo lo que muere sirve como alimentación para la vida nueva que nace en un ciclo de reciclaje igualmente eterno.

Podemos aprender de la naturaleza por aplicar sus principios. Con el proceso de compostaje se puede convertir casi los 40% de los RSU en un producto valioso.

### 1.1.4 Cerrar un Ciclo Natural de Nutrientes

Más allá de esas razones se puede considerar la importancia de cerrar un ciclo de nutrientes de las tierras de las cuales se depende por la alimentación. Según la situación actual (hablando generalmente) se está extrayendo los nutrientes de las tierras por los cultivos que se cosecha. Los cultivos se venden en las ciudades, pero los nutrientes de los mismos no vuelven de las ciudades a las tierras de cultivo.

Por el compostaje de los RSU orgánicos se puede cerrar este ciclo quebrado de nutrientes y devolver esos nutrientes a las tierras de cultivo de donde provienen.

## 1.2 Exigencias del Proceso de Compostaje

El proceso de compostaje es un proceso microbiológico bajo condiciones aeróbicas y termófilas (45°C – 80°C). En otras palabras, es un proceso microbiológico de oxidación. Entonces, contrario a los procesos anaeróbicos y mesófilos (30°C – 40°C) no salen los gases metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido carbónico (CO<sub>2</sub>), sino agua (H<sub>2</sub>O) y dióxido carbónico (CO<sub>2</sub>). Además el proceso de compostaje, siendo un proceso de oxidación, necesita el abastecimiento de oxígeno (O<sub>2</sub>).

Las bacterias termófilas consumen alrededor de la mitad de la materia orgánica y producen su propio ambiente caliente. Si no hay suficiente ventilación (es decir oxigenación) el proceso termófilo no puede desarrollarse libremente y se convierte hacia un proceso anaeróbico y mesófilo. Este proceso se caracteriza por las temperaturas más bajas y los malos olores por la producción del hidrógeno sulfúrico (H<sub>2</sub>S).

Para garantizar la oxigenación del proceso, es costumbre amontar los RSU orgánicos al aire libre. Además se vuelcan los montones de compost frecuentemente.

Por las temperaturas elevadas hay bastante evaporación de humedad, aunque el proceso necesita un ambiente con 40% – 60% de humedad. Entonces se debe agregar agua adicional cuando se vuelcan los montones de compost.

### 1.3 Condiciones Altiplánicas Adversas

A pesar de las ventajas, el proceso de compostaje es casi desconocido en el Altiplano todavía. Hasta la fecha resultó casi imposible hacer funcionar este proceso, por el clima altiplánico adverso. La oxigenación de los montones de materia orgánica funciona sin problemas en los climas moderados o más calientes, pero el clima altiplánico es bastante frío como demuestran los datos indicativos siguientes:

Clima Altiplánico Indicativo		
Característica	Verano (Enero)	Invierno (Julio)
Temperatura Promedia Diurna:	+15°C	+15°C
Temperatura Promedia Nocturna:	+3°C	-7°C
Precipitación Promedia:	150 mm/mes	5 mm/mes
Humedad Relativa Promedia:	60%	40%

Se nota las temperaturas nocturnas bastante bajas, sobre todo en el invierno. Al igual es bastante baja la humedad relativa del aire y la precipitación. Estas son condiciones adversas al proceso de compostaje:

Las bacterias termófilas necesitan aire caliente y humedad para mantener su ambiente favorito, pero cuando se ventila el compost con aire glacial, esas bacterias mueren de frío. Por eso resultó casi imposible hasta la fecha de aplicar exitosamente el proceso de compostaje en el Altiplano.

### 1.4 Solución Innovadora

Aunque ya existen varios sistemas de compostaje mecanizados, con riego y ventilación artificial de alta tecnología, todavía no existe semejante sistema de compostaje manual o semi-mecanizado con ventilación artificial de baja tecnología<sup>1</sup>.

El sistema de compostaje presente es un sistema de funcionamiento sencillo y hecho de materiales locales. En principio se lo puede operar manualmente, aunque se puede añadir un cucharón-grúa para volcar el compost de un pozo al próximo.

Es una solución innovadora en el sentido de que presenta un sistema de compostaje de baja tecnología, al alcance de las ciudades altiplánicas medianas y menores, para superar las condiciones climáticas adversas del Altiplano:

- El proceso de compostaje sucede dentro de unos pozos cerrados que están ubicados dentro de una nave. Así el aire nocturno frío ya no puede afectar directamente al proceso de compostaje.

<sup>1</sup> Usando las tecnologías sencillas es una mejor manera de garantizar el funcionamiento sostenible, porque son más fáciles de entender y operar y son más baratas de mantener y reparar por la gente local de bajos recursos y formación.

- Los pozos cerrados están provistos de un sistema de ventilación artificial y el compost está puesto encima de una reja dentro de los pozos cerrados. Molinos de ventilación encima de las chimeneas de salida succionan el aire servido que sea remplazado por aire fresco.
- El aire fresco viene desde debajo del techo de la nave y entra por debajo de la reja del compost por una chimenea de ventilación.
- El techo de la nave está orientado hacia el sol (es decir hacia el norte). Por la radiación del sol el techo calienta el aire debajo del mismo y así el aire fresco succionado por el compost será precalentado por la radiación solar al techo de la nave.
- A noche se cierre el sistema de ventilación para no ventilar con el aire glacial nocturno. Este paro temporal de la ventilación no afecta significativamente al proceso de compostaje, puesto que hay reservas de oxígeno dentro de los pozos y del compost mismo.

## **1.5 Proyecto Piloto de Compostaje**

Sin embargo, es un sistema nuevo sin precedentes. No existen experiencias con tal sistema todavía, entonces es desconocido si funcionará tal como indica la teoría.

Por eso es necesario hacer un proyecto piloto para testar este método de compostaje, antes de diseñar las naves de compostaje para Desaguadero Bolivia y Perú.

## **1.6 Alcance para la Zona Andina**

Un proyecto piloto de compostaje para hacer posible el compostaje en la ciudad binacional de Desaguadero no es un incidente aislado. En principio el problema del clima adversa altiplánica toca a toda la Zona Andina desde Colombia hasta Argentina, mientras que las soluciones de alta tecnología existentes no son muy deseables.

Por eso vale invertir en este estudio del proceso de compostaje de baja tecnología para superar las condiciones climáticas adversas del Altiplano, porque es de importancia para todos los municipios andinos.

## 2 Proceso de Compostaje

### 2.1 Pretratamiento

Para asegurar un buen procedimiento del proceso de compostaje, debe ser preparado una buena mezcla de materia orgánica que cumple las exigencias del proceso:

- No debe contener materias inorgánicas como plásticos, vidrios, metálicos u otros.
- La materia orgánica debe consistir de pedazos de 2-5 cm.
- La humedad de la mezcla debe ser 40% – 60%
- La relación de carbono/nitrógeno (C/N) debe ser entre 20:1 y 40:1. Por mezclar distintos materias orgánicas se puede ajustar la relación C/N.

Para plantas de compostaje pequeñas y manuales, puede ser difícil cumplir perfectamente con todas esas exigencias. Pero cuanto más grande la planta de compostaje, más atención se lo puede dar. Además, una vez estar al tanto del proceso de compostaje, los operadores pueden aumentar su experiencia por experimentar con la composición de la materia orgánica.

### 2.2 Primera Fase de Fermentación Termófila

La primera fase es un proceso termófilo y aeróbico en que la temperatura debe superar los 60°C y puede subir hasta 80°C. Estas temperaturas más altas convienen porque eliminan los patógenos muy eficientemente. Por eso es necesario analizar la causa y ajustar el proceso, si la temperatura no sube suficientemente.

Por las temperaturas altas y la ventilación, la evaporación será más alta también. Por eso es necesario cuidar la humedad con mayor atención y mantenerla a 40% – 60%.

Esta fase tarda unas 3 semanas<sup>2</sup> y la materia debe ser volteada cada 4 – 6 días. Durante esas 3 semanas ocurre una pérdida de unos 25% de la masa orgánica<sup>3</sup> por los procesos de metabolismo y oxidación.

### 2.3 Segunda Fase de Fermentación Mesófila<sup>4</sup>

Después de la fase de fermentación termófila, las bacterias termófilas serán reemplazadas gradualmente por las mesófilas: la temperatura disminuye hasta 40°C – 60°C, pero el proceso sigue a ser un proceso principalmente aeróbico.

Los parámetros más importantes para monitorear siguen a ser la oxigenación, la humedad y la temperatura.

El proceso tarda unas 6 semanas y la materia debe ser volteada cada 6 – 12 días. En esta fase la pérdida de masa orgánica es más o menos 15%.

### 2.4 Tercera Fase de Maduración

Las temperaturas disminuyen hasta menos que 40°C y cuando el compost ha madurado bien la temperatura baja hasta menos que 30°C.

---

<sup>2</sup> Alvaro Cantanhede (1993): "Compostificación de Residuos de Mercados"; CEPIS/OPS/OMS/ESMLL

<sup>3</sup> José Sahagún Gallego: "Planta de Compostaje de Residuos Vegetales (Villa Nueva de la Cañada, Madrid)"; INIMA, Servicios Europeos de Medio Ambiente S.A.

<sup>4</sup> En realidad las bacterias termófilas se define como las que prefieren las temperaturas entre 45°C y 80°C y las bacterias mesófilas prefieren las temperaturas entre 15°C y 45°C. Sin embargo aquí se usa esos términos para distinguir entre las dos fases de fermentación de mayor calor.

La exigencia de oxigenación y la evaporación de humedad disminuyen igualmente. De todos modos la humedad del compost puede bajar sin problemas hasta 25% – 35% y el pH del compost maduro se estabiliza a 6 – 8.

El proceso tarda unas 4 semanas, pero ya no es necesario volcar el compost. La pérdida de masa orgánica es alrededor de 10%. Por las pérdidas de masa orgánica a lo largo de las tres fases del proceso, la relación de C/N del compost maduro baja hasta 16 – 20.

## 3 Diseño Técnico de la Nave de Compostaje

### 3.1 Tamaño de la Urbanización para el Proyecto Piloto

Para posibilitar un proyecto piloto de compostaje manual, la cantidad de materia orgánica debe ser limitada. Por razones prácticas de funcionamiento y operación, el volumen mínimo de compostaje resultó a ser 1,23 m<sup>3</sup>/sem.

La densidad típica de compost es alrededor de 500 Kg/m<sup>3</sup>.

Se toma como punto de partido la producción de RSU per cápita, como demuestran los resultados de los análisis de Desaguadero:

$$M_{orgánico} = 37,3\% * 0,238 \text{ Kg/hab/día} = 0,0888 \text{ Kg/hab/día}$$

Con estos datos se puede calcular la población que produce 1,23 m<sup>3</sup> de materia orgánica por semana:

$$P = \frac{1,23 \text{ m}^3/\text{sem} * 500 \text{ Kg/m}^3}{0,0888 \text{ Kg/hab/día} * 7 \text{ día/sem}} = 990 \text{ hab} \approx 1000 \text{ hab}$$

Pero no se puede esperar que toda la población participe cien por ciento. Muchos seguirán alimentando su ganado menor (gallinas, chanchos, perros) con sus desechos orgánicos y parte de la población no colaborará en absoluto.

Estimando que se puede recoger entre 1/2 y 2/3 de los residuos sólidos de una comunidad para el proyecto piloto, significa que se necesita una comunidad entre 3/2 y 2/1 veces más grande que calculado. Así se concluye que el proyecto piloto de compostaje debe ser implementado en una pequeña urbanización altiplánica de entre 1500 y 2000 habitantes.

Además es mejor elegir una urbanización con un clima notoriamente frío (por ejemplo alrededor del Salar de Coipasa), para testar el funcionamiento de la nave de compostaje bajo las peores condiciones posibles.

### 3.2 Frecuencia de Volcar el Compost

Como descrito en el capítulo 2, el proceso de compostaje debe durar unas 13 semanas:

- Fermentación termófila: 3 semanas, volcar cada 4 – 6 días
- Fermentación mesófila: 6 semanas, volcar cada 6 – 12 días
- Maduración: 4 semanas, sin volcar

Las frecuencias de volcar son basadas a un sistema de procesamiento de montones de compost puesto en una plataforma de hormigón. Por esta manera los montones de compost tienen una forma de ventilación natural. Sin embargo semejante sistema de ventilación natural no es suficiente, entonces para aumentar la ventilación de los montones, el compost debe ser volteado: cuanto más joven y caliente el proceso, más frecuentemente debe ser volteado. Además los volteos del compost sirven para conseguir una homogenización del compost.

Pero en este proyecto piloto el compost estará encima de una reja de ventilación, dentro de una serie de pozos cerrados con un sistema de ventilación artificial. Este sistema disminuye la necesidad de volcar el compost tan frecuentemente. Lo que conviene, porque resultará menos trabajoso. Además sería más favorable hacer coincidir la frecuencia de los volteos con múltiplos de semanas, para lograr a un horario regular de volteos diarios y semanales. Así fue tomado como punto de partido para el régimen de volteos siguiente:

- Fase termófila: Volcar cada 7 días, entonces 3 volteos por 3 semanas
- Fase mesófila: Volcar cada 14 días, entonces 3 volteos por 6 semanas
- Fase maduración: No volcar durante las 4 semanas

### 3.3 Número de Pozos de Compostaje

Entonces para poder volcar 3 veces el compost de la primera fase de fermentación termófila se necesita tener 3 pozos, al igual se necesita 3 pozos para volcar 3 veces la segunda fase de fermentación mesófila y uno solo pozo para la tercera fase de maduración. Así la composición de pozos de compostaje debe ser:

- Fermentación termófila: 3 pozos para volcar cada semana
- Fermentación mesófila: 3 pozos para volcar cada 2 semanas
- Maduración: 1 pozo sin volcar durante 4 semanas

### 3.4 Horario de Manejo de los Pozos de Compostaje

Para poder volcar el compost del primer pozo al segundo, hubiera volcar el compost del segundo pozo al tercer el día de ayer. Al igual del pozo 3 al pozo 4 anteayer. Entonces esos volteos exigen un horario de volteos en que se vuelcan un pozo por día. Para el mejor entendimiento de los horarios de volcar los pozos y las consecuencias laborales para los empleados, fueron elaborados los esquemas de manejo de los volteos (véase los dibujos 7-8 y 8-8). Se puede elegir entre dos tipos de semanas laborales: de 5 días por semana (dibujo 7-8) y de 6 días por semana (dibujo 8-8).

Contando los días exactos de compostaje según esos horarios, se nota que no resultan exactamente 13 semanas (91 días, sino algunos menos. Resulta del régimen de los volteos de los pozos en que siempre se queda un pozo vacío entre sí para poder volcar el próximo pozo al día siguiente. Sin embargo no es una diferencia significativa para tomar en cuenta.

### 3.5 Tamaños de los Pozos de Fermentación

Como ya indicado en el §3.1 el primero pozo de fermentación termófila debe tener un volumen de compost de  $1,23 \text{ m}^3$ , lo que será cargada gradualmente en el transcurso de la semana. Cada semana, cuando se llenó el primero pozo de fermentación termófila, el contenido será volteado al segundo pozo de fermentación termófila del mismo tamaño y cada semana el contenido del segundo pozo será volteado al tercer.

Luego de los tres pozos de fermentación termófila la materia orgánica ya habrá perdido unos 25% de su peso y su volumen. Entonces, aunque los pozos de la fermentación mesófila deben tener una capacidad de 2 semanas de compost, se puede reducirlos por el 25% de pérdida de la fermentación termófila:

$$V_{meso} = 2 * 1,23 \text{ m}^3 * (100\% - 25\%) = 1,84 \text{ m}^3$$

Al igual habrá una pérdida de materia de 15% en los 3 pozos de fermentación mesófila, por lo cual se puede reducir el volumen del pozo de maduración de 4 semanas:

$$V_{maduro} = 4 * 1,23 \text{ m}^3 * (100\% - 25\% - 15\%) = 2,95 \text{ m}^3$$

### 3.6 Almacén del Compost Maduro

La pérdida de masa y volumen en el último pozo de maduración será unos 10%, entonces la cantidad de compost maduro que sale de la nave será unos 50% de la materia orgánica que entró al inicio del proceso:

$$V_{compost} = 4 * 1,23 \text{ m}^3 / \text{sem} * (100\% - 25\% - 15\% - 10\%)$$

$$V_{compost} = 2,46 \text{ m}^3 / 4 \text{ sem} = 32,0 \text{ m}^3 / \text{año}$$

Puesto que los campesinos altiplánicos solo aran y siembran sus cultivos una vez al año (septiembre – octubre), es previsible que no se pueda vender el compost cada día del año. Por eso se necesitará un almacén de compost.

Se supone los tamaños siguientes para un manejo práctico:

- Una altura de 1,50 m, para un almacenamiento manual liviano.
- Una anchura de 3,00 m, para ajustar a un camión para cargar y venderlo.

Así la longitud del almacén de compost debe ser:

$$L = \frac{V}{H * B} = \frac{32,0 \text{ m}^3}{1,50 \text{ m} * 3,00 \text{ m}} = 7,10 \text{ m}$$

## 3.7 Exigencias de Ventilación de los Pozos de Compostaje

### 3.7.1 Experiencias Empíricas de la Ventilación Artificial

El proceso de compostaje exige oxigenación. Según las experiencias empíricas la cantidad de aire para un sistema de ventilación artificial debe ser 5,9 – 7,9 li/h/Kg<sub>Materia Seca</sub><sup>5</sup>. Compensando por la presión menor del Altiplano (645 HPa = 63,7% \* 1013 HPa), sería 9,3 – 12,4 li/h/Kg<sub>MS</sub>.

Según un cálculo propio (véase anexo 1), basado en un análisis del proceso químico de oxidación e igualmente tomando en cuenta la presión atmosférica menor del Altiplano, la exigencia de ventilación sería 9,84 – 15,2 li/h/Kg<sub>MS</sub><sup>6</sup>:

$$Q_{\text{aire entrada}} = \frac{(143 + 131 + 119 + 64 + 60 + 56 + 103 \text{ m}^3/\text{día}) * 1000 \text{ li}/\text{m}^3}{24 \text{ h}/\text{día}} = 28.200 \text{ li}/\text{h}$$

Los volúmenes de aire saliendo son más grandes que los entrando por la expansión térmica de los gases servidos y por la generación de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> por el proceso de oxidación:

$$Q_{\text{aire salida}} = \frac{(212 + 252 + 229 + 95 + 77 + 65 + 114 \text{ m}^3/\text{día}) * 1000 \text{ li}/\text{m}^3}{24 \text{ h}/\text{día}} = 43.600 \text{ li}/\text{h}$$

Suponiendo 50% de humedad, la materia seca es 50%. El volumen de compost de los pozos fue calculado conforme las disminuciones de materia por pozo:

$$M_{MS} = 50\% \text{ MS} * 500 \text{ Kg}/\text{m}^3 * (1,23 + 1,13 + 1,02 + 1,84 + 1,72 + 1,60 + 2,95 \text{ m}^3) = 2870 \text{ Kg}_{MS}$$

Tomando la ventilación entrando como mínimo:

$$Vent_{\text{min}} = \frac{Q_{\text{aire entrada}}}{M_{MS}} = \frac{28.200 \text{ li}/\text{h}}{2870 \text{ Kg}_{MS}} = 9,84 \text{ li}/\text{h}/\text{Kg}_{MS}$$

Y la ventilación saliendo como máximo:

$$Vent_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{aire salida}}}{M_{MS}} = \frac{43.500 \text{ li}/\text{h}}{2870 \text{ Kg}_{MS}} = 15,2 \text{ li}/\text{h}/\text{Kg}_{MS}$$

Entonces parece un cálculo coherente con las experiencias empíricas.

### 3.7.2 Ventilación Artificial por Molinos de Ventilación

Fue diseñado un sistema de ventilación artificial de succión por molinos de ventilación encima de las chimeneas. Para calcular los diámetros mínimos de las chimeneas de ventilación se tomaba en cuenta los parámetros siguientes:

- Los cálculos de los volúmenes de aire saliendo de los pozos según el anexo 1.
- Un tiempo de ventilación de 12 horas por día (a noche se lo cierre por el frío).
- Una velocidad máxima del flujo de aire por las chimeneas de 0,50 m/s.

<sup>5</sup> Eva Röben (Loja, Ecuador, 2002): "Manual de Compostaje para Municipios" Está disponible: [http://ecuador.ded.de/cipp/ded/lib/all/lob/return\\_download.ticket.g\\_u\\_e\\_s\\_t/bid,575/check\\_table,all/~/roeben\\_2002\\_manual.pdf](http://ecuador.ded.de/cipp/ded/lib/all/lob/return_download.ticket.g_u_e_s_t/bid,575/check_table,all/~/roeben_2002_manual.pdf)

<sup>6</sup> Los datos de los cálculos siguientes provienen del anexo 1.

Los resultados están presentados en la tabla siguiente:

Cálculo de los Diámetros Mínimos de las Chimeneas de Ventilación							
Pozo: (No)	Ventilación de Succión Necesaria				v-max (m/s)	A-min (m <sup>2</sup> )	D-min (mm)
	(m <sup>3</sup> /día)	(h/día)	(m <sup>3</sup> /h)	(li/s)			
1	212	12	17.7	4.91	0.50	0.0098	88
2	252	12	21.0	5.84	0.50	0.0117	96
3	229	12	19.1	5.31	0.50	0.0106	91
4	95.4	12	7.95	2.21	0.50	0.0044	59
5	76.9	12	6.41	1.78	0.50	0.0036	53
6	65.3	12	5.45	1.51	0.50	0.0030	49
7	114	12	9.53	2.65	0.50	0.0053	64

Se nota que un diámetro de las chimeneas de Ø100 mm es suficiente para todos los pozos. Sin embargo las chimeneas de los primeros 3 pozos fueron diseñadas a Ø150 mm para tener algo más capacidad de reserva. Las chimeneas de los pozos demás ya tienen esta capacidad de reserva, puesto que Ø100 mm ya es casi el doble de lo necesario.

### 3.7.3 Ventilación Artificial por Ventiladores Eléctricos

Sin embargo puede ser que el sistema de ventilación con molinos de viento encima de las chimeneas no resulta suficiente. Por ejemplo: si no hay viento, los molinos de ventilación no sirven y el proceso de ventilación se queda parada. En este caso se debe agregar los ventiladores eléctricos en las chimeneas de salida, para fortalecer la succión de los molinos de ventilación en el techo. Aunque son indispensables en ciertos casos, es de preferencia minimizar el uso por economizar el consumo eléctrico.

## 3.8 Exigencia de Riego de los Pozos de Compostaje

El objetivo más importante del cálculo del anexo 1 no fue la exigencia de aire, sino el balance de agua. Puesto que el cálculo de aire resultó bastante coherente con las experiencias empíricas, parece plausible que el cálculo del balance de agua no se desvíe mucho tampoco. Este balance de agua consiste de los componentes siguientes:

- La entrada de agua por:
- La humedad del aire entrando por la ventilación.
- La humedad generado por el proceso de oxidación (genera CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O).
- La adición de agua para compensar la pérdida de agua por la evaporación.
- La salida de agua por:
- La evaporación por el sistema de ventilación y las temperaturas elevadas.

Resumen del Balance de Agua (li/día)								
Fuente de H <sub>2</sub> O:	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4	Pozo 5	Pozo 6	Pozo 7	Total
H <sub>2</sub> O Atmósfera:	0.66	0.60	0.55	0.30	0.28	0.26	0.47	3.10
H <sub>2</sub> O Generación:	9.39	8.60	7.82	4.22	3.94	3.66	6.76	44.4
H <sub>2</sub> O Evaporación:	-27.1	-49.2	-44.7	-12.2	-6.30	-3.30	-3.44	-146
H <sub>2</sub> O Adición:	17.1	40.0	36.4	7.69	2.08	-0.61	-3.79	98.8
H <sub>2</sub> O Balance:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Se nota que la pérdida de agua por la evaporación es de importancia determinante y que la adición de agua para equilibrar esta pérdida forma una cantidad significativa.

Aunque no será un gran problema para un proyecto piloto de pequeña escala, sí podría ser un gran problema de abastecimiento de agua para un proyecto de compostaje a escala grande.

### **3.9 Abastecimiento de Agua**

Puesto que normalmente un RSRS con una nave de compostaje está ubicado a una buena distancia de las urbanizaciones y de las ampliaciones futuras de las mismas, no suele posible realizar una conexión al sistema de agua potable municipal. Al igual, normalmente no hay vertientes o ríos en la cercanía de un RSRS, porque pertenecen a las características de las tierras más fértiles y preciosas que no se vende para construir un RSRS. Entonces normalmente el auto-abastecimiento de agua de una nave de compostaje resulta un problema serio: una demanda grande, sin fuentes cercanas y disponibles.

Por eso se considera dos fuentes de abastecimiento de agua propia.

#### **3.9.1 Condensar el Vapor de Agua de la Ventilación Artificial**

Por hacer condensar el vapor de agua que sale por las chimeneas de la ventilación artificial, se puede recuperar casi toda el agua necesaria para el proceso de compostaje.

Aunque el proceso puede ser algo más complicado técnicamente, tiene una ventaja grande. La cantidad de agua que se puede recuperar diariamente por el proceso de condensación equivaldrá más o menos la cantidad que se necesita. Por consecuencia el tanque de almacenamiento puede ser mucho más pequeño.

Sin embargo para no complicar el proyecto piloto innecesariamente, no fue elegido este alternativo. Solamente se lo menciona como solución alternativa para proyectos futuros.

#### **3.9.2 Cosecha de Lluvia del Techo de la Nave**

El principio es captar el agua de lluvia de los techos de las edificaciones en el terreno del RSRS y almacenarlo en un tanque para ser usado más tarde.

Multiplicar los datos meteorológicos de la precipitación por la superficie de los techos determina la cantidad de agua que se puede captar. Según qué características de la precipitación y del consumo de agua, se puede calcular el volumen del tanque de almacenamiento. En un clima con épocas de lluvia y de estiaje, eso significa la necesidad de un tanque más grande para poder pasar la época de estiaje con el agua de la época de lluvia anterior.

Según estos principios el anexo 2 calcula el balance de agua del proyecto piloto, según los puntos de partido siguientes:

- El techo de la nave de compostaje tiene una superficie de 103 m<sup>2</sup>.
- Los datos meteorológicos de la precipitación provienen de Desaguadero.
- Se supone un año con menores precipitaciones: 67% de los promedios mensuales.

Resultado del balance diario de agua es que se necesita un tanque de 12 m<sup>3</sup> para poder pasar la época de estiaje de un año particularmente seco.

Con una bomba pequeña hay que llenar diariamente un tanque de 100 li en el techo de la nave, para abastecer la red de agua de la nave de compostaje.

### **3.10 Consideraciones Constructivas del Proyecto Piloto**

#### **3.10.1 Terreno**

El terreno debe ser cercado con una alambrada de 1,50 m de altura que consiste de cinco alambres de púas.

El camino de acceso en el terreno debe ser fortalecido por una capa de ripio de 20 cm para garantizar un acceso adecuado en todas las estaciones del año.

### **3.10.2 Nave de Compostaje**

Los cimientos y el piso de la nave deben ser hechos de hormigón ciclópeo. Las paredes se construyen de adobes 30\*20\*10 cm, puestos de manera transversal para mayor estabilidad y mejor aislamiento.

Las losas de cimentación y del techo de los pozos de compostaje deben ser hechos de hormigón armado. Las paredes deben ser hechas de ladrillos Gambote con un revoque impermeable de cemento al interior de los pozos.

Las ventanas tienen vidrios dobles contra el frío. Las puertas consisten de un armazón de angulares con tablas de madera en ambos lados: el aire entre las tablas interiores y exteriores funciona como aislamiento.

Los extremos de las cuadernas de pares del lado superior del techo están empotrados en las paredes de adobe. Los extremos de las cuadernas de pares del lado inferior del techo deben ser fijados en las paredes de adobe con anclas de corrugado Ø1/4" hasta 1,00 m más bajo de los mismos.

Las canaletas servirán para captar las aguas de lluvia para el proceso de compostaje, entonces deben ser construidas de manera impermeable y sólido: de fierro galvanizado.

### **3.10.3 Servicios Básicos**

La nave de compostaje debe ser conectado a la red pública de electricidad para las ventiladores del proceso de compostaje, iluminación y pequeña maquinaria en general. Una conexión monofásico (220 V) será suficiente.

El agua de lluvia debe ser almacenada en un tanque de 12 m<sup>3</sup> (12.000 li) para mojar el compost. Con una bomba eléctrica pequeña hay que llenar diariamente un tanque elevado de 100 li por debajo del techo de la nave, para abastecer la red de agua de la nave de compostaje.

Aunque está diseñado un sistema de alcantarillado para drenar los pozos y el almacén de compost, se espera que las cantidades serán nulas y incidental a lo más. Por eso no fue agregado un tanque séptico para su tratamiento. Si un tratamiento mínimo alguno resulta deseable, se puede cavar una pequeña laguna.

## 4 Manual de Operación

Este manual de operación describe la manera de operación estándar de la nave de compostaje. Es decir sin ejecutar experimentos que pertenecen a un programa de investigación.

Sin embargo la función de un proyecto piloto es precisamente para experimentar y en este sentido se puede desviarse de estos procedimientos estándares. Pero esos desvíos de las normas de operación siempre deben ser ejecutados bajo la responsabilidad de un profesional que conduce un programa de investigación aprobada por las autoridades pertinentes.

### 4.1 Preparar Materia Orgánica Nueva

Antes de alimentar el primer pozo con los desechos orgánicos, esos deben ser preparados. Por este fin es el recipiente hecho de mampostería al lado del primer pozo de compostaje.

Primero los desechos orgánicos deben ser depurados de cualquier material no-orgánico, como bolsas de plástico, botellas, latas, etc. Luego se debe cortar los trozos más grandes en pedazos de 2-5 cm.

La materia orgánica debe tener ciertas calidades para conseguir un buen proceso de compostaje. Sobre todo depende del balance entre carbono y nitrógeno (C/N). Son los dos elementos más importantes para el crecimiento de las bacterias, pero deben estar presente en proporciones favorables. Una relación C/N de 30 significa que por cada 30 unidades de peso de carbono hay 1 unidad de nitrógeno. Esta relación C/N debe estar entre 20 y 40. Cuando el contenido de carbono es demasiado alto ( $C/N > 40/1$ ) el proceso de compostaje vuelve a ser más lento y menos caliente. Cuando el contenido de nitrógeno es demasiado alto ( $C/N < 20/1$ ) el exceso de nitrógeno saldrá en forma de amoníaco ( $NH_3$ ) que produce males olores. Cuando la relación C/N es demasiado alto, se lo puede reducir por mezclar materia de relación baja de C/N, como los lodos de tanques sépticos o estiércoles de animales o humanos. Cuando la relación C/N es muy bajo se lo puede aumentar con materiales de relación alta de C/N, como paja o restos de papel, cartón y madera. Las temperaturas y los olores sirven como los mayores indicadores de una buena mezcla, lo que será un proceso de aprendizaje y experiencia de los empleados.

La materia debe tener suficiente humedad: 40%-60%. Cuando es demasiado seco, las bacterias no pueden crecer y el proceso de compostaje no arranque. Cuando es demasiado mojado, la materia vuelve a ser más denso y con menos poros para la ventilación. Por falta de aire el proceso vuelve a ser anaeróbico y resulta en más olores malos. Estrujando un trozo de compost de mano, deben salir algunos goteos de agua, no más ni menos. Caso contrario, hay que añadir más agua o más materia seca.

La materia orgánica nueva carece de los cultivos distintos de bacterias todavía. Para acelerar el proceso de compostaje hay que mezclarlo con pequeñas cantidades de compost del segundo y tercer pozo donde ya están presentes en abundancia. Así se los siembra y el proceso de compostaje arranque volando.

### 4.2 Agregar Materia Orgánica Nueva en el Primero Pozo

Una vez tener una buena composición de materia prima, se lo echa en el primer pozo:

- Se apague la ventilación del pozo y se abre la puerta.
- Se eche la materia nueva encima de lo que ya está presente en capas horizontales de manera ligero y uniforme.
- Antes de cerrar la puerta del pozo se asegure que no sale nada del marco de la puerta y que el mismo está limpio.

- Se cierre la puerta con atención que cierre muy bien, para que el sistema de ventilación artificial no chupe aire falso por la puerta.
- Se reanuda la ventilación.

El primer pozo recibe un poco de materia nueva cada día, según el régimen de la recolección urbana. Al final de la semana será lleno.

### 4.3 Volcar Compost de Uno Pozo al Próximo

Para que el segundo pozo sea vacío antes de que se deba volcar el contenido del primer pozo, es necesario seguir un régimen regular de volteos. Básicamente se empieza vaciando el último pozo para poder volcar el contenido del penúltimo pozo al día siguiente, etcétera hasta que el segundo pozo será vacío para volcar el primer pozo.

El tiempo de retención de los pozos 1, 2 y 3 dura una semana, de los pozos 4, 5 y 6 dura dos semanas y del último pozo dura cuatro semanas. Entonces el pozo 4 se llena con dos volteos del pozo 3 y el último pozo se llena con dos volteos del pozo 6. Los dibujos 7-8 y 8-8 muestran dos regímenes alternativos de los volteos: uno basado en una semana de 5 días y el otro de 6 días laborales (según las necesidades).

Durante cada volteo es muy importante reajustar el contenido de humedad del compost para compensar la evaporación, según los procedimientos del §4.1.

Cuando un pozo está vacío siempre hay que hacer una pequeña inspección rutinaria del interior del pozo:

- ¿Hay obstrucciones de las chimeneas de ventilación? ¡Hay que destapar y limpiarlas!
- ¿Hay restos de compost por debajo de la reja? ¡Hay que sacarlos!
- ¿Hay aguas de drenaje por debajo de la reja de compost? Puede ser que se está agregando demasiado agua y que se pueda disminuir lo.
- ¿Hay daños constructivos? Hay que notificar al supervisor y el supervisor tiene que notificar a los responsables pertinentes.

### 4.4 Manejar el Sistema de Ventilación Artificial

El manejo del sistema de ventilación de los pozos de compostaje consiste de los componentes siguientes:

- Dos postigos de corredera en el cielo raso.
- Una válvula tipo mariposa en cada chimenea de entrada atrás de los pozos
- Un ventilador eléctrico en cada chimenea de salida encima de los pozos

Todos los postigos, válvulas y ventiladores deben ser cerrados/apagados cuando se pone el sol. Cuando sale el sol deben ser abiertos/puestos. Antes de abrir un pozo su ventilación debe ser apagada y luego de cerrar el pozo la ventilación debe ser reanudada. Cuando un pozo se queda vacío, se cierre las puertas y la válvula mariposa y se deja apagado el ventilador.

### 4.5 Almacenar Compost Maduro

Una vez que el compost sale del último pozo, estará listo para vender y utilizar. Sin embargo la demanda de compost no es regular, más bien los campesinos solo necesitan compost cuando están arando.

El compost maduro se almacena afuera y casi no exige atención: puede secar y mojarse sin problema. Para la venta es más honesta cobrar un precio por volumen para evitar variaciones grandes entre el peso de compost seco o mojado.

## 5 Programa de Estudio

### 5.1 Datos y Muestras para Conseguir

#### 5.1.1 Características Meteorológicas

Se mide las características generales del clima para saber las condiciones en que está funcionando el proceso de compostaje:

- Las temperaturas máximas y mínimas diarias.
- La humedad relativa dos veces al día: lo más temprano posible al inicio de la jornada y en la tarde después de la pausa.
- La precipitación diaria.
- Observaciones visuales diarias: nubosidad, viento, tormentas y otras características llamativas.

#### 5.1.2 Características de la Materia Orgánica Entrando

Es esencial saber las características de la materia orgánica que entra el proceso, tomando en cuenta que la materia recibida de la urbanización no es igual a la materia entrando el primer pozo. Entonces hay que medir las características de ambas condiciones:

- La materia orgánica recibida de la urbanización, después de ser depurado de los materiales inadecuados (como bolsas de plástico, botellas, latas, etc.).
- La materia orgánica, después de ser preparado (por cortar los trazos grandes, ajustar la relación C/N y la humedad), cuando se lo inserta en el primer pozo.

Estas características también son interesantes para los empleados: los resultados retroalimentan a su experiencia de ajustar la relación C/N y la humedad a simple vista.

Las mediciones siguientes deben ser ejecutadas en la nave:

- Medir la masa (Kg) de la materia orgánica (depurada de los materiales inadecuados) recibida de la urbanización.
- Medir la masa (Kg) de todas las materias agregadas durante la preparación.
- Medir la masa (Kg) de la materia preparada antes de insertar en el pozo.
- Medir la masa específica (Kg/m<sup>3</sup>) de la materia preparada.
- Tomar una muestra representativa de la materia orgánica recibida (depurada de los materiales inadecuados) para ser analizada en un laboratorio.
- Tomar una muestra representativa de la materia preparada, también para ser analizada en un laboratorio.
- Medir la temperatura (°C) del compost que ya está en el primer pozo, antes de insertar la materia nueva.

#### 5.1.3 Características del Compost de Cada Pozo

Antes de volcar el compost de un pozo al próximo se ejecute las mediciones siguientes:

- Medir el volumen del compost en el pozo (por medir su altura), antes de volcarlo.
- Medir la temperatura del compost en varios lugares, antes de volcarlo.
- Medir la masa específica (Kg/m<sup>3</sup>) del compost varias veces durante el volteo, guardando temporalmente el compost usado para esta medición.
- Mezclar el compost usado para medir la masa específica, para hacer una muestra representativa para ser analizada.
- Medir la cantidad de agua (li) agregada al pozo siguiente para ajustar la humedad.

Hay que dar atención especial a las mediciones y muestras a volcar los pozos 1, 4 y 7, puesto que no fueron llenados de una vez. El pozo 1 fue llenado gradualmente durante la semana anterior, entonces hay que tomar una buena cantidad de muestras para hacer una mezcla representativa. Los pozos 4 y 7 fueron llenados en dos veces, entonces hay que tomar varias muestras de la mitad superior e inferior para conseguir una mezcla representativa.

#### **5.1.4 Condiciones del Compostaje Dentro de los Pozos**

Los gases que salen de los pozos constituyen indicadores excelentes de la actividad bioquímica del proceso de compostaje. Antes de abrir y volcar un pozo al próximo se ejecute las mediciones siguientes:

- Medir la temperatura (°C) del aire entrando el pozo por la chimenea de entrada.
- Medir la temperatura (°C) de los gases saliendo del pozo por la chimenea.
- Tomar una muestra de gases saliendo del pozo por la chimenea de salida.

## **5.2 Métodos y Herramientas para las Mediciones**

### **5.2.1 Mediciones Meteorológicas**

Para las mediciones meteorológicas se puede usar instrumentos sencillos y económicos:

- Un máximo-mínimo termómetro.
- Un higrómetro con un agujero. Aunque no es muy exacto, da suficiente indicación para este proyecto.
- Un pluviómetro: es tan simple que se lo puede construir casero.

Los instrumentos deben ser colocados según las normas meteorológicas. Unos ejemplos:

- Las temperaturas máxima y mínima del día se mide en la sombra a 1,50 m encima del campo. Se lee el termómetro al final de la tarde, puesto que el momento más frío del día ocurre al amanecer y el momento más caliente ocurre al inicio de la tarde.
- El pluviómetro debe ser posicionado de tal manera que edificaciones y/o vegetación no pueden afectar a la cantidad de lluvia que entra.

Las observaciones visuales se escriben en un diario. Se lo divide en las observaciones de la mañana, la tarde y la noche, porque pueden diferir extremadamente: hace sol en la mañana, nubes acumulando en la tarde y una tormenta eléctrica en la noche. Por definición la persona que lleva las observaciones vive cerca de la nave: puede observar el tiempo nocturno desde su casa y anotar esas observaciones al día siguiente.

### **5.2.2 Mediciones del Compost**

Las cantidades diarias para llenar el primer pozo son viable todavía para medir exactamente: unos 100 Kg. Pero cuando hay que volcar el contenido entero del primer pozo al segundo ya se tratará de unos 600 Kg. Volcando el compost del pozo 4 al pozo 5, cada 2 semanas, serán unos 900 Kg y vaciando el pozo 7, cada 4 semanas, tendría que medir unos 1500 Kg. Sería casi imposible, hacerlo exactamente por una balanza romana.

Por eso se propone una manera indirecta y algo menos exacta: medir el volumen total ( $m^3$ ) y el volumen específico ( $Kg/m^3$ ) para calcular la masa (Kg). Por medir los tamaños exactos internos y sustraer el volumen libre de los pozos, se puede calcular el volumen del compost del pozo. La masa específica del compost se puede calcular por pesar el compost en un recipiente de volumen determinado. Existen las balanzas romana profesionales para medir pesos hasta 50-100 Kg, que se puede colgar en los pares del techo.

Instrumentos y herramientas necesarias:

- Una balanza romana de 50 Kg – 100 Kg.
- Una caja indeformable de 50 li – 100 li (conforme la balanza)
- Dos palas para mezclar y volcar el compost
- Un machete para cortar trozos más grandes
- Una carretilla
- Un termómetro digital con una aguja de 1,00 m para medir la temperatura en el centro y fondo del compost.

### 5.2.3 Mediciones de los Gases

Encima de los ventiladores está colocado un accesorio Tee con llaves de paso para extraer los gases de la chimenea de salida. El tipo de recipiente para captar los gases debe ser acordado con el laboratorio pertinente.

La temperatura del aire entrando y de los gases saliendo se puede medir por un termómetro con una aguja de unos 10 cm por un agujero pequeño en las chimeneas.

Instrumentos necesarios:

- Recipientes de gases de/según el laboratorio.
- Un termómetro digital con una aguja de 10 cm.



## 5.3 Análisis de las Muestras

### 5.3.1 Muestras de Compost

Abarcando el total de las muestras de compost, se tomará:

- Una muestra cada día de la materia orgánica recibida de la urbanización.
- Una muestra cada día de la materia preparada que entra el primer pozo.
- Como promedio casi cinco muestras cada semana por los volteos de los pozos.

Una vez que se sabe la composición de la materia orgánica recibida y se domina la técnica de preparar la mezcla correctamente, se puede disminuir esas muestras hasta una vez por semana, variando los días de la semana.

Los aspectos siguientes de las muestras deben ser analizados en el laboratorio:

- El pH
- La masa seca (gr) y la humedad (%)
- El contenido total de C (gr)
- El contenido de los compuestos de nitrógeno:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  (gr)
- El contenido total de N (gr)
- El contenido total de P (gr)
- El contenido total de S (gr)

### 5.3.2 Muestras de Gases

Las muestras de gases se tome al mismo tiempo que las muestras de compost de los volteos, entonces al igual casi cinco muestras cada semana como promedio. Los aspectos siguientes deben ser analizados en el laboratorio:

- El volumen de la muestra de gas
- El contenido de  $\text{H}_2\text{O}$  (gr)
- El contenido de  $\text{CO}_2$  (gr)
- El contenido de  $\text{CH}_4$  (gr)
- El contenido de  $\text{O}_2$  (gr)

- El contenido de N<sub>2</sub> (gr)
- El contenido de los compuestos de nitrógeno: NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (gr)
- El contenido total de N (gr)
- El contenido de H<sub>2</sub>S (gr)
- El contenido total de S (gr)
- El contenido total de P (gr)

## 5.4 Estudio del Proceso de Compostaje

### 5.4.1 Optimización del Proceso de Compostaje

La optimización de proceso de compostaje es un proceso empírico e interactivo a través de variar los parámetros del proceso de compostaje para lograr a una calidad óptima de compost<sup>7</sup>. Parámetros que se puede variar son:

- El contenido de agua
- La relación C/N
- La intensidad de la ventilación

Indicadores importantes demás:

- La temperatura
- El pH
- La emisión de malos olores (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S)

### 5.4.2 Optimización de la Construcción de la Nave

Mientras es importante evaluar la construcción de la nave y los pozos de compostaje para mejorar la eficiencia y la facilidad de manejo. A este respecto las opiniones de los empleados son claves:

- ¿Hay suficiente, insuficiente o demasiado espacio de trabajo dentro de la nave?
- ¿Los olores malos son insoportables, conforme el carácter del proceso, o mejor que esperado?
- ¿Hay suficiente luz para el trabajo?
- ¿Cómo funciona el manejo de las puertas de los pozos?
- ¿Cómo parece el trabajo de volcar el compost de un pozo al otro?
- ¿Las puertas de los pozos cierran bien o entra mucho air falso en los pozos.
- ¿Cómo funciona el sistema de ventilación?
- ¿Hay sugerencias para mejorar el manejo de la nave?

## 5.5 Plazo de los Estudios

### 5.5.1 Período de Arranque y Adaptación

Antes de todo el proceso de compostaje debe ser arrancado. Todos involucrados, la población incluida, deben acostumbrarse y adaptarse a los regímenes que exige el proyecto piloto. La población tiene que acostumbrarse de separar su basura orgánica, los empleados tienen que aprender cómo operar la nave de compostaje y el proceso bioquímico debe arrancarse por el crecimiento de las colonias de bacterias pertinentes.

En cuanto del arranque del proceso bioquímico hay que tomar en cuenta que dura unas semanas hasta que las colonias de bacterias termófilas han crecido suficientemente. Se puede

<sup>7</sup> Marcos Arturo Rodríguez Salinas y Ana Córdova y Vázquez (México, 2006): "Manual de Compostaje Municipal" da informaciones interesantes para el manejo del proceso de compostaje. Se lo puede descargar gratis del internet:

[http://www.giresol.org/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=189&Itemid=29](http://www.giresol.org/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=189&Itemid=29)

acelerar significativamente este tiempo de arranque por un proceso de retroalimentación de la materia de los pozos siguientes hacia los pozos anteriores. Es decir sacar cantidades menores de compost de los últimos pozos para mezclar con lo de los primeros pozos cuando se lo están volcando. Funciona como sembrar colonias de bacterias en los primeros pozos que recientemente aparecieron en los pozos finales.

Aunque el arranque cuesta tiempo (dura 13 semanas hasta que el primero compost sale del último pozo y esta primera cantidad de compost todavía no es representativa) ya se puede iniciar las mediciones y los análisis de la materia que entra desde el primer día, para ya conocer los residuos orgánicos de la urbanización y aprender a preparar correctamente la materia que entra los pozos. Probablemente después de unas 4-6 semanas de arranque se puede empezar las mediciones de los pozos.

### **5.5.2 Plazo Típico de un Experimento**

Generalmente dura 13 semanas (3 meses) hasta que un cierto monto de materia orgánica pasa por todo el proceso de compostaje, entonces se podría experimentar 4 veces por año con condiciones distintos para optimizar el proceso. Sin embargo, bajo condiciones de monitoreo muy exacta y disciplinada se puede iniciar un régimen nuevo cada 4 semanas (el contenido del pozo 7). En este caso se encuentra un régimen de compostaje en el pozo 7 (4 semanas de retención), un segundo régimen en los pozos 5 y 6 (dos semanas de retención por pozo) y un tercer régimen en los pozos 2, 3 y 4 (junto son 4 semanas de retención también).

### **5.5.3 Plazo Total de los Estudios.**

Tomando como punto de partido 6 semanas para arrancar el proceso y 6 experimentos de 4 semanas, se necesitará 30 semanas (7 meses) para concluir los estudios.

## Conclusiones

Las propuestas de alta tecnología no necesariamente son sostenibles en el Altiplano Peruano Boliviano.

Implementar un programa de compostaje de baja tecnología, que realice un uso del aprovechamiento de los recursos disponibles en la zona, podría tener éxito, toda vez que pueda validarse la tecnología.

El sistema de compostaje presente es un sistema de funcionamiento sencillo y hecho de materiales locales. En principio se lo puede operar manualmente, aunque se puede añadir un cucharón-grúa para volcar el compost de un pozo al próximo.

La naturaleza y composición de los residuos sólidos urbanos hacen necesario cada vez más la búsqueda de tecnologías ad-hoc para su aprovechamiento.

Es necesario desarrollar alternativas amigables al medio ambiente, en el deseo de retornar al suelo, aquellos elementos que extraemos de él y que generalmente es retornado mediante compuestos químicos, que lo alteran; por ello, según la situación actual, se está extrayendo los nutrientes de las tierras por los cultivos que se cosecha. Los cultivos se venden en las ciudades, pero los nutrientes de los mismos no vuelven de las ciudades a las tierras de cultivo.

El Proceso de Compostaje propuesto se divide en las siguientes fases:

- Pretratamiento
- Primera Fase de Fermentación Termófila
- Segunda Fase de Fermentación Mesófila
- Tercera Fase de Maduración

El cual en conjunto, se prevé una duración de aproximadamente 13 semanas.

## **Anexos**

Anexo 1: Balance de Agua del Proceso de Compostaje

Anexo 2: Cosecha de Lluvia y Tanque de Almacenamiento



## **Dibujos**

- Dibujo 1-8: plano general del terreno y; secciones del almacén de compost
- Dibujo 2-8: nave de compostaje; secciones longitudinal y transversal
- Dibujo 3-8: nave de compostaje; secciones horizontales
- Dibujo 4-8: nave de compostaje; vistas de los pares y las vigas del techo
- Dibujo 5-8: nave de compostaje; vistas y secciones de las puertas y ventanas
- Dibujo 6-8: pozos de la nave de compostaje; vistas y secciones de las puertas y rejas
- Dibujo 7-8: horario de volteos de los pozos de compostaje;  
basado en 5 días laborales por semana
- Dibujo 8-8: horario de volteos de los pozos de compostaje;  
basado en 6 días laborales por semana