



Suecia  
**Sverige**

# Manual de compostaje para zonas a una altura mayor a 3000 m.s.n.m.

EXPERIENCIA CIUDAD DE ORURO



## Créditos

**Título:** Manual de compostaje para zonas a una altura mayor a 3000 m.s.n.m.

**Autor:** Proyecto Basura Cero, segunda fase.

**Financiador:** Agencia Sueca de Cooperación para el Desarrollo ASDI.

**Ejecutores:** Aguatuya, Helvetas Swiss Intercooperation, Swisscontact Bolivia.

**Redacción:** Nilo Garnica Méndez, Coordinador Territorial, Proyecto Basura Cero, Aguatuya.

**Revisión:** Lourdes Valenzuela, Directora de Comunicación, Aguatuya.

**Diseño y diagramación:** Gabriela A. Saavedra, Diseñador gráfico, Aguatuya.

**Fotos de portada e interiores:** Aguatuya.

**Año:** 2024.

## Contacto

### Aguatuya

C. Nicolás Ortiz Pacheco N. 33 edificio TESAI, primer piso,  
oficina 1B - entre C. Antonio Salinas y Av. Calampampa / Cochabamba.

Tel.: (591) 4 4242164

info@aguatuya.org

**www.aguatuya.org**

**https://www.facebook.com/Aguatuya**

### HELVETAS Swiss Intercooperation - Bolivia

Directora del Proyecto: Mariana Daza von Boeck

C. Gabriel René Moreno N° 1367. Edificio Taipi. Oficina 1. Piso 2.

Urbanización San Miguel, Bloque H. Zona Calacoto

Casilla Postal 2518/ La Paz

Tel.: (591) 2 2794487

**secretaria.bolivia@helvetas.org**

**https://www.facebook.com/Helvetas.bo**

### Swisscontact Bolivia

Jacinto Benavente #2176 entre Federico Aspiazu y Fernando Guachalla

Sopocachi - Casilla 5033 / La Paz.

Tel.: (591) 2 2112141

**bo.info@swisscontact.org**

**https://www.facebook.com/SwisscontactBolivia**

## Primera edición

Queda permitida la reproducción del presente documento siempre que se cite la fuente.

## Oruro - Bolivia

## Contenido

1. Antecedentes.....	3
2. Contexto.....	4
3. Objetivo del manual.....	5
4. Aspectos a considerar para la implementación de una planta piloto de compostaje.....	5
4.1. Personal mínimo necesario.....	5
4.2. Equipo de protección personal y seguridad.....	5
4.3. Aspectos sanitarios.....	5
5. Maquinaria, equipos y herramientas.....	6
6. Descripción de la experiencia.....	7
6.1. Recepción y almacenamiento de los materiales.....	8
6.1.1. Tipos de materiales.....	8
6.1.2. Duración y capacidad máximas del almacenamiento temporal.....	9
6.2. Separación de impropios.....	9
6.3. Trituración de la fracción vegetal (fv).....	10
6.4. Pretratamiento: mezcla u homogeneización.....	10
6.5. Descomposición.....	11
6.6. Maduración.....	13
6.7. Tamizado y clasificación del compost.....	14
6.8. Almacenamiento del compost.....	14
7. Control del proceso de compostaje a una altura de más de 3000 m.s.n.m. ....	14
7.1. Temperatura.....	15
7.2. Humedad.....	16
7.3. Oxígeno.....	16
7.4. PH.....	17
8. Escenarios que se pueden generar en el proceso y sus posibles soluciones.....	18

9. Diagrama del proceso de producción.....	20
10. Planilla de control y seguimiento.....	21
11. Resultados del análisis de laboratorio del compostaje.....	22
12. Referencias Bibliográficas.....	27

# MANUAL DE COMPOSTAJE PARA ZONAS A UNA ALTURA MAYOR A 3000 m.s.n.m.

## 1. Antecedentes

El manejo adecuado de los residuos sólidos es una prioridad para la calidad de vida de las poblaciones, por lo que es imprescindible tomar acciones para lograr prevenir, mitigar y compensar los impactos ambientales. Debido al mal manejo de los residuos que, sin un control adecuado, provocan diversos problemas a la salud y al medio ambiente, generando al mismo tiempo emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. Tales circunstancias hacen necesaria una adecuada gestión de residuos, a fin de eliminar los efectos negativos y aprovechar los positivos, pero considerando el contexto económico de dicha gestión.

El enfoque de la Gestión Integral de Residuos se orienta a maximizar la reducción de generación de residuos sólidos en volumen y peligrosidad, destinados a disposición final, así como a maximizar el aprovechamiento, promoviendo la separación en origen, recolección diferenciada y el tratamiento de la fracción orgánica para obtener compost, humus, residuos reciclables y otros sub-productos.

Según la Ley 755 de Gestión Integral de Residuos, aprobada el 28 de octubre de 2015, conforme al Artículo 14 numeral IV, establece que el nivel central del estado y las entidades territoriales autónomas, en coordinación con el sector productivo implementarán los mecanismos y estrategias para promover el máximo aprovechamiento de los residuos antes que su disposición final.

En ese contexto la Agencia Sueca de Cooperación para el Desarrollo ASDI, consolidó los recursos para la ejecución del Proyecto "Basura Cero en Bolivia, Segunda Fase"; el cual tiene como objetivo consolidar y replicar modelos de gestión de residuos sólidos, abordajes y herramientas en la ciudad de Oruro apalancando recursos y articulando iniciativas públicas (nacionales y locales), así como iniciativas privadas, proyecto que es ejecutado por Helvetas Swiss Intercooperation, Aguatuya y Swiss Contact.

▼ Voluntarios explicando sobre el aprovechamiento de orgánicos.



## 2. Contexto

El Municipio de Oruro, es la capital del departamento de Oruro y está ubicado dentro de la provincia Cercado y del altiplano central a una altura promedio de 3.706 m.s.n.m. Tiene una población proyectada de 351.802 habitantes al 2022.

Las temperaturas de la ciudad de Oruro vienen muy marcadas por su elevada altitud, la temperatura media máxima anual se sitúa en los 22,5°C. Por otra parte, las temperaturas medias mínimas se sitúan en los 1,5°C. Los valores más bajos se producen durante los meses que van desde mayo a septiembre, con temperaturas por debajo de los 0°C, produciéndose su valor más bajo en el mes de junio con -5°C.

Este municipio tiene una producción per cápita municipal de residuos de 0,57 [kg/hab/día] equivalente a una generación de 202,10 [Tn/día]. Los residuos sólidos generados están compuestos por un 50% de fracción orgánica, un 20% de residuos inorgánicos aprovechables y un 30% de la fracción no aprovechable.

Actualmente la administración municipal del servicio de aseo urbano está a cargo de la Empresa Municipal de Aseo Oruro (EMAO).

Bajo estas condiciones del municipio, en junio de 2023 se inició un proyecto piloto de compostaje municipal con la finalidad de poder aprovechar los residuos orgánicos de grandes generadores (mercados, matadero, carpinterías y cementerio) en su primera etapa.

Este documento fue elaborado en base al proyecto de compostaje municipal piloto implementado en Oruro, considerando las características climáticas y tipos de residuos que genera el municipio.

El manual cuenta con la información necesaria para comenzar con el aprovechamiento de residuos orgánicos a través del compostaje, además permite resolver inquietudes que surjan durante el proceso.

▼ Recolección de orgánicos, Mercado Tagarete - Oruro.



### 3. Objetivo del manual

El objetivo del presente manual es tener una sistematización del proceso que se siguió en la implementación del compostaje piloto municipal, para orientar a la Empresa Municipal de Aseo Oruro EMAO y otros municipios con características climáticas similares, identificando los aspectos más importantes del proceso de compostaje para obtener un producto final sano y de buena calidad.

### 4. Aspectos a considerar para la implementación de una planta piloto de compostaje

#### 4.1. Personal mínimo necesario

El personal mínimo que se debe destinar al proceso de compostaje manual es de 4 personas, considerando que este personal pueda llegar a manejar hasta 3 [Tn/día] de residuos que se recuperen de grandes generadores en esta primera etapa. Dependiendo de la cantidad de residuos que ingresen a la planta se debe considerar el incremento de personal o maquinaria. A continuación en el cuadro inferior, se describe las actividades y cargo del personal:

#### Personal requerido y funciones

Cargo	Cantidad	Descripción de actividades
<b>Responsable de la planta de compostaje</b>	1	Manejo técnico de la planta, planifica, dirige al personal, coordina con el responsable de recolección de residuos, responsable de controlar los parámetros y establece la operación de la planta.
<b>Operador de mini cargador</b>	1	Realiza la mezcla de las fracciones, conformación de pilas, volteo de pilas, traslado del área de descomposición al área de maduración y para el cernido y almacenamiento del compost final.
<b>Operador de la planta de compostaje</b>	2	Realizaran el control de ingreso de los residuos, separación de residuos impropios, ayudar a mezclar y homogeneizar las fracciones, apoyar en la conformación de las pilas al mini cargador, regar las pilas de ser necesario, controlar el proceso de compostaje, apoyar en el cernido del compost y otras actividades que les sean delegadas por el responsable.

Fuente: Elaboración en base a la operación de la planta piloto de Oruro.

#### 4.2. Equipo de protección personal y seguridad

El uso de equipo de seguridad y protección personal en la planta de compostaje será de carácter obligatorio en todas las etapas del proceso de compostaje.

- ☞ Pantalón y camiseta industrial u overol.
- ☞ Botines de seguridad.
- ☞ Gafas de seguridad contra impactos y contra polvo.
- ☞ Sombrero.
- ☞ Guantes.
- ☞ Barbijos contra el polvo.

#### 4.3. Aspectos sanitarios

Todo el personal de la planta debe recibir vacuna contra el tétano de acuerdo a la periodicidad establecida para este tipo de vacuna. Y se deben disponer en la planta de ambientes adecuados para aseo personal y vestuario, además de contar con un botiquín de primeros auxilios para el personal.

## 5. Maquinaria, equipos y herramientas

Dependiendo de la cantidad de residuos que ingresa a la planta se puede considerar la adquisición de diferentes maquinarias, equipos o herramientas para optimizar el proceso de compostaje. Inicialmente es

necesario contar con las herramientas manuales adecuadas para el proceso y una trituradora de restos de poda. En el caso de Oruro ya contaba con un minicargador, que le permite optimizar en mano de obra.

### Maquinaria, equipos y herramientas a utilizar

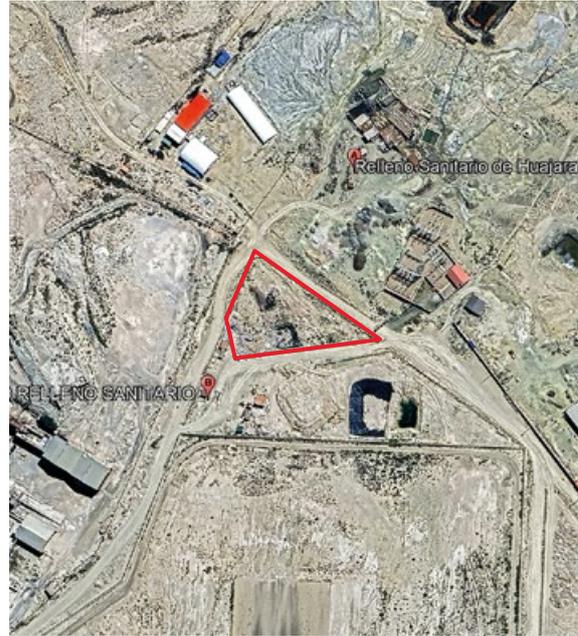
Maquinaria, herramienta o equipo	Etapas	Descripción	Precio Ref. Bs	Precio Ref. USD (tipo de cambio 6,97)
Minicargador frontal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pre tratamiento</li> <li>▶ Descomposición</li> <li>▶ Maduración</li> <li>▶ Tamizado y almacenamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Mezcla de las tracciones FO + FV.</li> <li>▶ Conformación de pilas.</li> <li>▶ Volteo de pilas.</li> <li>▶ Cernido y almacenamiento del compost.</li> </ul>	285.000,00	40.900,00
Picadora de restos poda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pre tratamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Picado de restos de poda.</li> </ul>	20.300,00	2.900,00
Termómetro tipo varilla.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Descomposición.</li> <li>▶ Maduración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Medir semanalmente la temperatura de las pilas en los procesos de descomposición y maduración.</li> </ul>	5.300,00	770,00
Medidor de PH y humedad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Descomposición.</li> <li>▶ Maduración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Medir semanalmente el PH y la humedad de las pilas en los procesos de descomposición y maduración.</li> </ul>	2.200,00	320,00
Machete y acha.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pre tratamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Utilizado para cortar restos de poda grandes, antes de ingresar a la picadora.</li> </ul>	150,00	22,00
Pala ancha cuadrada, pala redonda, rastrillos, trinchas y carretillas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pre tratamiento.</li> <li>▶ Descomposición.</li> <li>▶ Maduración.</li> <li>▶ Tamizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Mezcla de las tracciones FO + FV.</li> <li>▶ Conformación de pilas.</li> <li>▶ Cernido del compost.</li> </ul>	1.200,00	170,00
Contenedores.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pre tratamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Utilizado para el almacenamiento de los residuos impropios.</li> </ul>	900,00	130,00
Zaranda tipo A.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Tamizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Utilizado para el tamizado del compostaje final.</li> </ul>	1.650,00	240,00
Tanque de polietileno de 3000 l. y manguera de 30 m.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pre tratamiento.</li> <li>▶ Descomposición.</li> <li>▶ Maduración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Utilizado para el almacenamiento de agua y riego de las pilas de compostaje.</li> </ul>	3.300,00	475,00

Nota: En caso de no contar con mini cargador se puede utilizar carretillas, de forma manual se puede operar una planta de una capacidad máxima de 2 [Tn/día].

El monto estimado de inversión mínima en maquinaria, equipos y herramientas que se necesita para iniciar la operación de una planta de compostaje manual-Piloto, es de 35.000,00 Bs-5.000,00 \$us. Posteriormente en base al incremento de la recolección diferenciada se puede considerar la adquisición de un minicargador u otra maquinaria similar.

## 6. Descripción de la experiencia

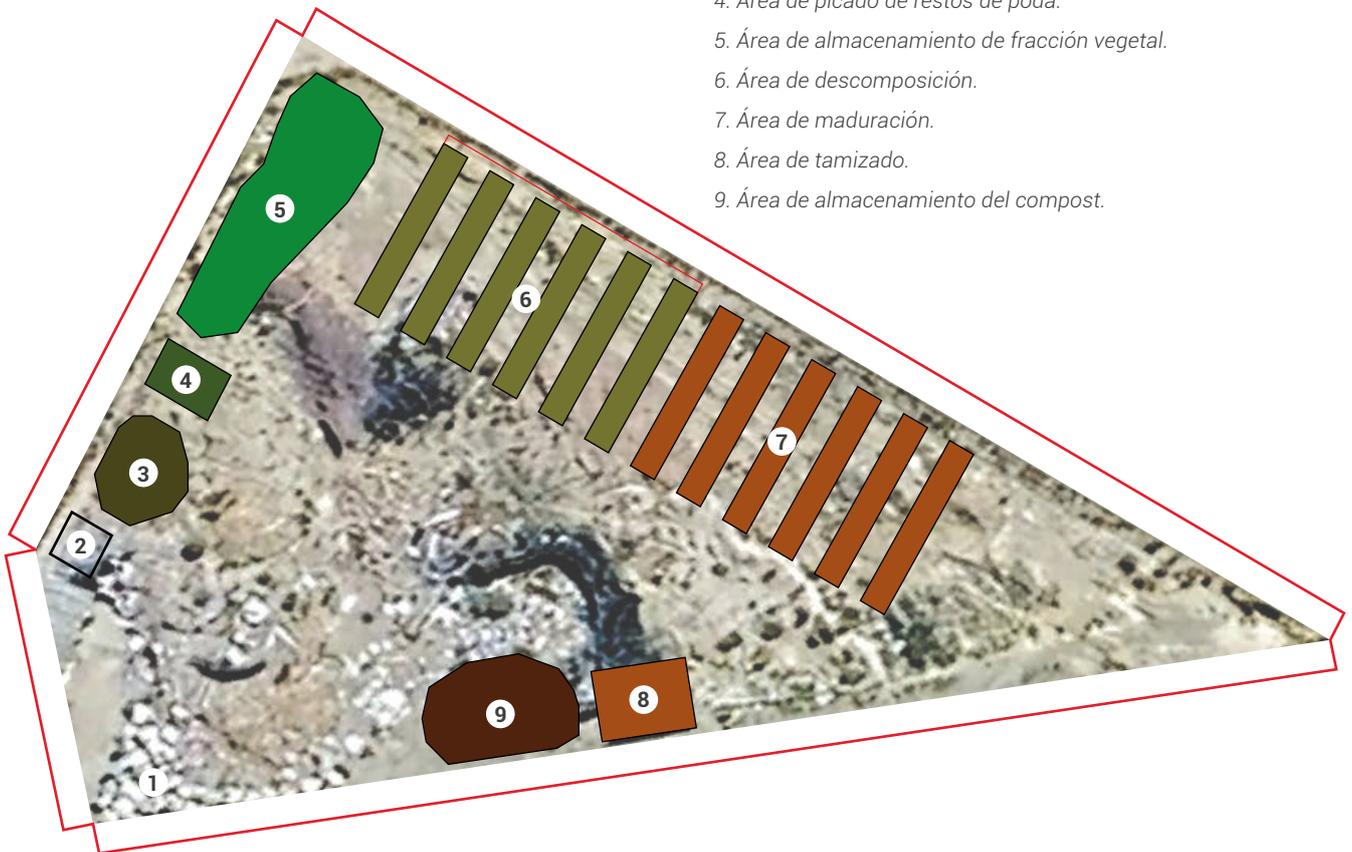
La planta de compostaje piloto de Oruro está emplazada en el sitio de disposición final de Huajara, en una superficie de 2800 [m<sup>2</sup>]. Las características de la ubicación de cada área se deben a la superficie disponible, permitiendo procesar hasta 3 [Tn/día]. A continuación, se muestra la distribución de las áreas de la planta de compostaje.



▲ Ubicación, Planta de compostaje piloto de Oruro.

### Planta de compostaje piloto de Oruro

1. Ingreso y salida a la planta de compostaje.
2. Área de rechazo o residuos impropios.
3. Área de recepción de residuos orgánicos.
4. Área de picado de restos de poda.
5. Área de almacenamiento de fracción vegetal.
6. Área de descomposición.
7. Área de maduración.
8. Área de tamizado.
9. Área de almacenamiento del compost.





## 6.1. Recepción y almacenamiento de los materiales

En esta etapa inicial se engloba la llegada de los materiales a la planta de compostaje y el inicio del pretratamiento:

- ☞ La recepción de los materiales (fracción orgánica y vegetal) destinados al compostaje.
- ☞ La descarga de estos materiales, ya sea directamente en el punto de almacenamiento o bien en una zona intermedia desde donde se trasladarán hasta la zona de tratamiento.
- ☞ El almacenamiento temporal de los materiales a la espera de pretratarlos, si es que la posterior etapa de pretratamiento no se lleva a cabo justo después de la descarga.

También puede ser necesario efectuar lo siguiente:

- ☞ El pesaje o estimación del volumen de los materiales recibidos.
- ☞ La preparación (trituración) de los materiales empleados como estructurantes.
- ☞ Limpieza del camión de recolección diferenciada.

La etapa de recepción es la que recibe los materiales más frescos y, por lo tanto, es la etapa en que resulta más necesario evaluar si se requiere considerar que residuos de fracción orgánica pueden permanecer almacenados hasta 48 horas como máximo. A diferencia de los residuos de fracción vegetal que puede estar almacenado por más tiempo dependiendo del volumen que ingresa y las proporciones requeridas para la mezcla con la fracción orgánica.

### 6.1.1. Tipos de materiales

En esta etapa se distinguen dos tipos de materiales:

**Residuos de baja degradabilidad**, que son los residuos de poca actividad microbiana, por la falta de un componente esencial para la descomposición como ser, el agua, materia orgánica, nitrógeno o algún otro elemento esencial.

**Residuos de alta degradabilidad** son los susceptibles de ser biodegradados con facilidad. Mayormente estos residuos son de fracción orgánica y vegetal.

## Materiales de baja y alta degradabilidad

Materiales	Ejemplos	Materiales	Ejemplos
Residuos de baja degradabilidad		Residuos de alta degradabilidad	
Fracción vegetal y otros RBD.	Restos de poda Restos forestales Pallets de madera Cajas de madera Paja o pajilla Aserrín Cartón Maples de huevo	Fracción orgánica y otros RAD.	Restos de frutas Restos de verduras Rumen Césped Restos de flores

Fuente: Elaboración en base a la (Agencia de residuos de Cataluña, 2016).

### 6.1.2. Duración y capacidad máximas del almacenamiento temporal

**El almacenamiento de los residuos de baja degradabilidad:** No puede superar los 90 días cuando, por efecto de la actividad microbiana, haya riesgo de autoencendido (en caso de la fracción vegetal) o de pérdida de calidad para ser compostados. Para esto hay que considerar que al estar más tiempo almacenando los residuos, se requiere una mayor superficie y pensar en el riesgo de incendio en el sitio, porque sería material seco por el tiempo que transcurre.

**El almacenamiento de los residuos de alta degradabilidad:** No puede superar los 2 días en caso de que más de un 80 % de su peso sean restos de fruta y verduras, Por lo tanto, es recomendable que los materiales deben pretratarse el mismo día en que lleguen a la instalación para evitar la generación de malos olores y la presencia de vectores.

La capacidad de almacenamiento no puede superar el triple de la capacidad diaria de tratamiento prevista para la instalación. Se considera esta capacidad máxima para afrontar situaciones de emergencia que se puedan producir. Hay que considerar que los residuos con un mayor tiempo de almacenamiento generan una reducción en su humedad.

### 6.2. Separación de impropios

La separación consiste en eliminar de la fracción orgánica los elementos que no se degradan biológicamente y aquellos que pueden causar la contaminación como ser plásticos, metales y otros.

A pesar de que el material RSO (residuo sólido orgánico) viene de separación de origen y el servicio de recolección diferenciada, aun así, llega con un porcentaje de impropios. La separación de impropios en la planta de compostaje municipal debe realizarse completamente manual, con ayuda de trinchas u horquetas, tachos y carretillas para su traslado.

**Se separa todos aquellos elementos de gran tamaño como ser:** (plásticos, vidrios, metales, escombros y otros) que pueden perjudicar el proceso de compostaje y contaminarlo bajando la calidad de compost obtenido, este porcentaje no debe superar el 5% en peso para garantizar la calidad del producto. Esta operación se realiza todos los días a medida que llega el material a la planta de compostaje municipal.

▼ Separación de impropios de forma manual.





▲ Área de trituración de fracción vegetal.

### 6.3. Trituración de fracción vegetal (fv)

En esta etapa se reduce el tamaño de los materiales para facilitar la degradación, además de tener un material estructurante que permita la aireación de la mezcla y que la pila tenga una porosidad adecuada.

La trituración de (fv) se puede realizar en función a las necesidades de la planta y de la disponibilidad de espacio para acopiar, también es recomendable realizar el triturado en el lugar de generación de la poda con el triturado móvil, para evitar costos elevados en transporte.

La fracción vegetal (fv) está formada por los residuos orgánicos de origen vegetal, susceptibles de degradarse biológicamente, hay que tener en cuenta que se pueden diferenciar dos tipos de fracciones como es la fracción vegetal pequeña no leñosa (donde están inmersos los restos vegetales de jardín, césped, hojas, flores y otros) y la fracción vegetal grande leñosa (poda de árboles o arbustos que requiere ser triturada para facilitar su valorización).



▲ Área de pretratamiento.

### 6.4. Pretratamiento: mezcla u homogeneización

Con el fin de que el compostaje se desarrolle correctamente es necesario que los parámetros que afectan el proceso se mantengan dentro de los rangos ideales, hay que tener en cuenta que los residuos que ingresan a la planta de compostaje son variables, en el caso de zonas frías a menudo debe recurrirse a la preparación de mezclas con materiales complementarios, sobre todo con la fracción vegetal, para poder lograr una mezcla 1:1 en volumen.

Una mezcla adecuada nos permitirá obtener una porosidad que permita la circulación del aire por el interior y la retención del agua, una humedad y un pH adecuados a la actividad microbiana, la proporción de materia orgánica biodegradable suficiente para que el proceso se pueda iniciar y completar y una relación C/N que minimice las pérdidas de nitrógeno o que permita que este elemento no sea un factor limitador del proceso.

Al contar con un minicargador en la planta de compostaje piloto las fracciones son mezcladas con este equipo, para luego conformar las pilas en la etapa de descomposición.

## 6.5. Descomposición

En esta etapa del proceso de compostaje se produce la descomposición biológica donde se incrementa la temperatura por la degradación de los residuos orgánicos, la evaporación de parte del agua que está en el proceso y la disminución del PH por la formación de ácidos orgánicos.

La etapa de descomposición se caracteriza por la reducción de peso y volumen y también ocurre el proceso de higienización (eliminación de microorganismos patógenos y semillas), siempre y cuando la temperatura de la pila sea superior a los 55°C durante algunas horas o días.

A continuación, se muestran las recomendaciones americanas (EPA, 1999) sobre la temperatura y la duración mínima de este periodo, que se pueden resumir del siguiente modo:

Temperatura	Duración mínima
55 °C	3 días
60 °C	1 día
65 °C	3 horas
70 °C	1 hora

▼ Área de descomposición.



### ► Conformación del material

Existen diferentes formas de conformación de las pilas, para el caso del proyecto piloto de Oruro se está empleando la forma trapezoidal, la altura máxima de conformación es de 1,50m por un ancho de 2,80m y un largo de 6m. estas dimensiones varían en base a la cantidad de residuos que ingresan durante las dos semanas que se tarda en conformar una pila, cabe mencionar que para esta actividad se utiliza un minicargador.



▲ Diferentes formas de conformación de las pilas.

### ► Aireación o volteo

Al ser la etapa más activa, se deben controlar las condiciones de trabajo para evitar la falta de oxígeno y temperaturas excesivas para esto hay que airear, remover o regar el material. Dependiendo de las condiciones del municipio y la cantidad de residuos que ingresen a la planta, el volteo del material puede ser manual o con maquinaria y si se cuenta con la infraestructura se puede tener un sistema automatizado con aireación forzada.

En el caso de Oruro se recomienda que los volteos se realicen de 1 a 2 veces por semana dependiendo de la época el año, al ser un compostaje piloto que se realiza a la intemperie.



▲ Volteo materia orgánica.

### ► Incorporación de agua al proceso

La incorporación del agua al proceso puede ser necesaria cuando el material o mezcla que se composte no tenga la humedad necesaria para que el compostaje arranque y cuando la generación de calor es tan elevada que la pila se llega a secar y provoca que el proceso se detenga.

Para estas situaciones en la planta de compostaje piloto de Oruro se cuenta con un tanque de almacenamiento de agua.



▲ Incorporación del agua.

### ► Duración de la etapa

La etapa de descomposición puede durar de 6 a 8 semanas, esto depende de las condiciones de infraestructura y equipamiento de la planta de compostaje. En el caso de Oruro el proceso dura aproximadamente 8 semanas desde que se termina de conformar la pila.

### ► Seguimiento al proceso

Semanalmente se deben controlar mínimamente los parámetros de temperatura, humedad y PH de cada pila que se encuentra en la etapa de descomposición, para evaluar con los parámetros ideales como está avanzando el proceso. En el capítulo de control de procesos se detalla el seguimiento de la planta de compostaje de Oruro.

## 6.6. Maduración

Una vez concluido con el proceso de descomposición de la materia orgánica, la pila pasa a la etapa de maduración, en esta etapa el material se estabiliza y el compost termina de desarrollar las características deseadas para su posterior uso.

En esta etapa la descomposición de la materia orgánica aún existe, tiene menos importancia, por lo que no demanda mayor oxígeno y la temperatura empieza a disminuir gradualmente. Debido a la menor actividad microbiana, esta etapa es mucho menos crítica que la anterior y no requiere un control tan exhaustivo de las condiciones de trabajo. Pero de todos modos es necesario tomar en cuenta y evitar **temperaturas demasiado elevadas** que pueden ralentizar la actividad microbiana, para evitar esto es necesario ventilar, remover o regar el material para

estar entre los parámetros ideales del proceso y **sequedad excesiva** que genera el calentamiento excesivo como se explicó anteriormente, ralentiza o detiene la actividad microbiana, por lo que al final de la etapa se obtienen materiales menos maduros de lo que sería esperable y deseable. Para evitar esta sequedad es necesario llevar a cabo una buena gestión de los riegos y un buen control de la humedad del material en maduración, en base a los parámetros ideales en este proceso.

### ► Aireación o volteo

En esta etapa no es necesario contar con aireación forzada, y el volteo se lo puede realizar con el mini cargador que está disponible en la planta de compostaje piloto. Para Oruro es recomendable que el volteo de las pilas en esta etapa se lo realice dos veces por semana y como se mencionaba anteriormente la humedad de las pilas es importante por lo que al momento de voltear las pilas se debe regar.

### ► Duración de la etapa

Esta etapa de maduración puede durar 8 semanas aproximadamente, siempre y cuando no se ralente el proceso por la falta de humedad o volteos para airear las pilas.

### ► Seguimiento al proceso

Semanalmente se deben controlar mínimamente los parámetros de temperatura, humedad y PH de cada pila que está en la etapa de maduración, para evaluar con los parámetros ideales como está su proceso. En el capítulo de control de procesos se detalla el seguimiento de la planta de compostaje de Oruro.

▼ Área de maduración.





## 6.7. Tamizado y clasificación del compost

Una vez finalizada la etapa de maduración, el compost pasa al área de tamizado, donde se utiliza una malla estática y un trómel es recomendable para una planta de mayor producción.

En esta etapa el objetivo es recuperar el estructurante en caso de que la mezcla compostada todavía lo contenga y se debe ingresar nuevamente al proceso hasta que se termine de descomponer, separar los impropios que el compost generado pueda contener y enviarlo al área de disposición final y obtener un compost de una granulometría determinada para su uso posterior.

Para el caso de la planta de compostaje piloto en Oruro, cuenta con una malla metálica tipo A, donde con ayuda del minicargador se realiza el cernido del compostaje final.

## 6.8. Almacenamiento del compost

Por la demanda que tendrá el compost en Oruro, se almacenará en montones para que sea más fácil de cargar con el minicargador, pero se debe de considerar que la capacidad de almacenamiento para un compost maduro destinado a usos agrícolas o en la jardinería debe ser suficiente para acopiar la producción de al menos dos meses.

## 7. Control del proceso de compostaje a una altura de más de 3000 m.s.n.m.

Durante las etapas de descomposición y de maduración se deben controlar de forma prioritaria los parámetros de humedad, temperatura, PH y oxígeno.

Para el caso de la planta de compostaje piloto de Oruro a continuación se muestra el control de parámetros durante las dos etapas.

## 7.1. Temperatura

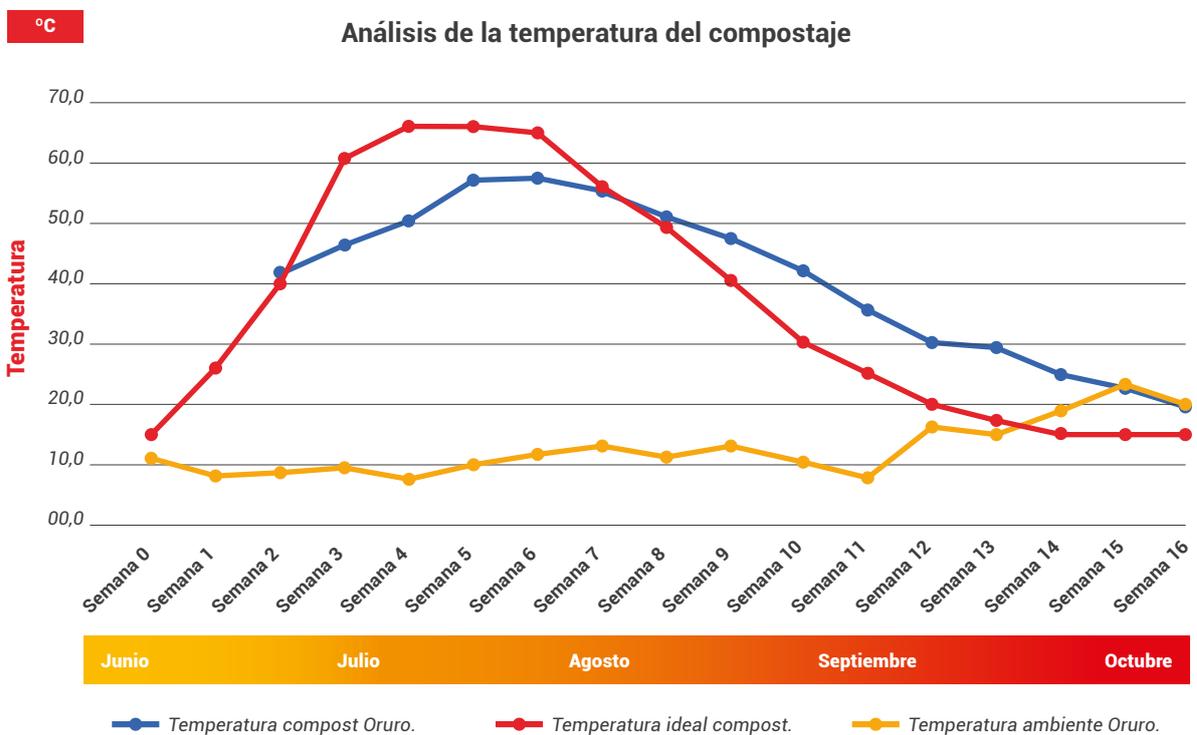
El control de la temperatura se lo debe realizar con un termómetro tipo varilla de 90cm de longitud mínimamente, esta medición se debe realizar periódicamente por lo menos una vez por semana, se debe de tomar la temperatura en diferentes puntos de la pila de compostaje y se debe registrar en una planilla para poder evaluar este parámetro. A continuación, se muestra el comportamiento de la temperatura en las pilas de compostaje de Oruro en las dos etapas vs la temperatura ideal que debería tener el proceso.

En la gráfica se muestra el comportamiento de la temperatura en una pila de compostaje en Oruro, donde se logró llegar durante un par de semanas a más de 50°C, hay que tomar en cuenta que el compostaje piloto se lo realiza a la intemperie y la pila inició el proceso de descomposición en el mes de junio, donde según los datos del Senamhi las temperaturas llegan cerca de los 0°C.

También se muestra la temperatura media registrada por la estación del aeropuerto, la más cercana a la planta de compostaje. Según los datos que se tienen se demuestra que las condiciones climáticas como el frío no afecta el proceso de compostaje, siempre y cuando se tenga un equilibrio entre la fracción orgánica y vegetal, para lograr una mezcla adecuada en el proceso.



▲ Control de la temperatura con un termómetro tipo varilla.

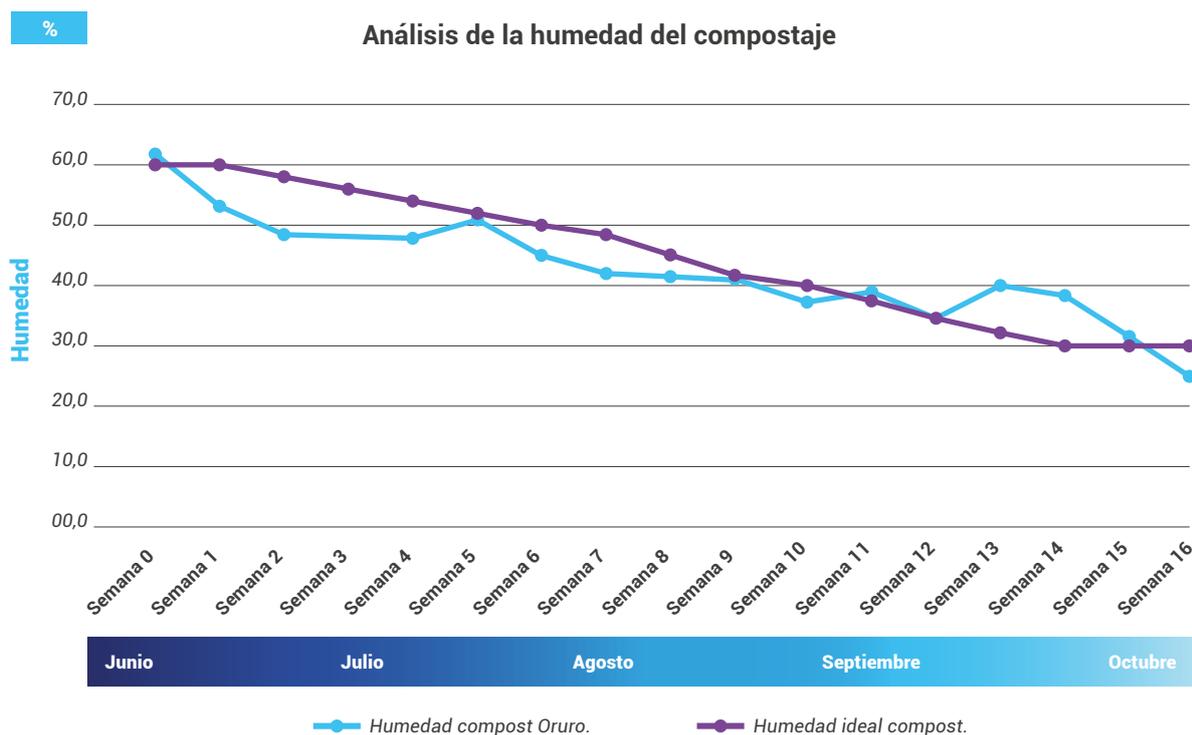


Fuente: Elaboración en base a planilla de control.

## 7.2. Humedad

Este parámetro de igual manera que el anterior se debe de realizar el control una vez por semana mínimamente, en caso de no contar con un equipo de medición se debe de realizar el control por inspecciones visuales y táctiles del grado de humedad de las pilas (método del puño).

En el caso de contar con un equipo portátil el control se debe de realizar en diferentes partes de la pila durante el inicio hasta la finalización del proceso. A continuación, se muestra el comportamiento de la humedad durante el proceso de compostaje:



Fuente: Elaboración en base a planilla de control.

## 7.3. Oxígeno

El control del nivel de oxígeno también es importante para garantizar el proceso aeróbico en la masa de residuos. Si se dispone de recursos suficientes se puede disponer de un oxímetro que va incorporado a una sonda que permite medir el nivel de oxígeno dentro de la pila. Si no se dispone de recursos puede recurrirse a métodos "caseros" como el olor (comprobar que no existe olor a putrefacción dentro de la masa que se composta) o puede construirse una sonda (sin el oxímetro) con una bomba manual de aspiración y simplemente comprobar que dentro de la masa existe aire.

El compostaje es un proceso aerobio y se debe mantener una aireación adecuada para permitir la respiración de los microorganismos, liberando a su vez, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a la atmósfera.

Así mismo, la aireación evita que el material se compacte o se encharque. Las necesidades de oxígeno varían durante el proceso, alcanzando la mayor tasa de consumo durante la fase termofílica.

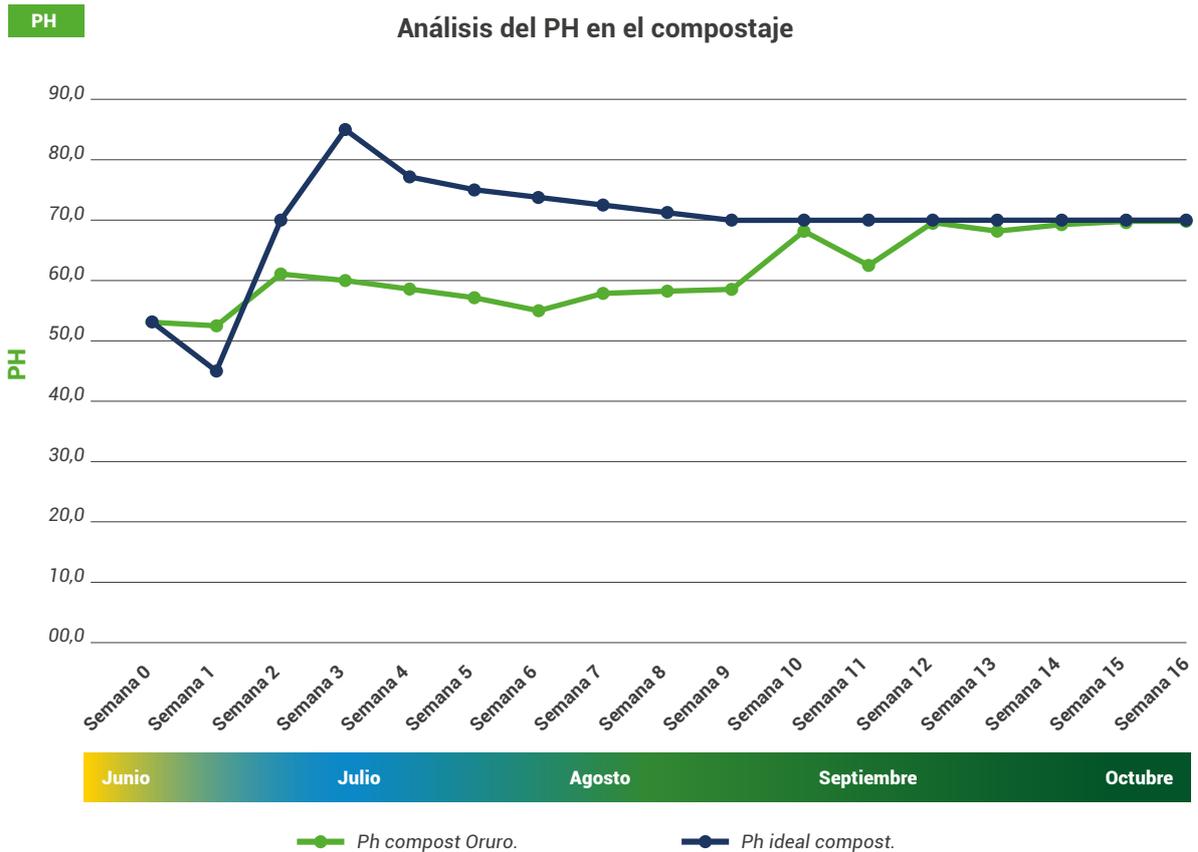
## 7.4. PH

El pH del proceso de compostaje depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso (desde 4,5 a 8,5). En los primeros estados del proceso, el pH se acidifica por la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la conversión del amonio en amoníaco, el pH sube y se alcaliniza el medio, para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro.

El pH define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene pH óptimos de crecimiento y multiplicación. Para el control de este parámetro existen equipos portátiles, a continuación, se muestra el control del PH en una pila de compostaje en Oruro:



▲ Análisis del PH en el compostaje.



Fuente: Elaboración en base a planilla de control.

## 8. Escenarios que se pueden generar en el proceso y sus posibles soluciones

Durante el proceso de compostaje se pueden generar diferentes problemas, para los cuales se presentan posibles soluciones que permitirán recuperar el proceso, como se puede apreciar en el siguiente cuadro:

### Escenarios que se generan en el proceso y posibles soluciones

Problema	Causa	Solución
La pila está fría y seca.	Hay poco material compostando.	Aumentar el tamaño de la pila.
	La altura de la pila es muy baja.	Se debe incrementar la altura de la pila, tratando de llegar a 1.5 m.
	Hay exceso de restos secos.	Añadir residuos que contengan humedad o regar la pila para estabilizar la humedad.
	La pila se voltea muy seguido	Reducir la frecuencia de volteos de 1 a 2 veces por semana en la etapa de descomposición.
La pila está muy húmeda.	Exceso de residuos de fracción orgánica.	Añadir residuos de fracción vegetal secos y mezclar.
	La pila se ha mojado por la lluvia o se ha regado demasiado.	Voltear la pila para airear para que se reduzca la humedad.
La pila desprende malos olores	Falta de oxígeno, el proceso se vuelve anaerobio.	Incrementar el número de volteos.
	Exceso de humedad.	
	Exceso de residuos de fracción orgánica.	Añadir residuos de fracción vegetal secos y mezclar.
Baja aireación	Insuficiente evaporación de agua, generando exceso de humedad y un ambiente de anaerobiosis.	Volteo de mezcla y/o adición de material estructurante que permita la aireación.
Exceso de aireación	Descenso de temperatura y evaporación del agua, haciendo que el proceso de descomposición se detenga por falta de agua.	Picado del material a fin de reducir el tamaño del poro y así reducir la aireación. Se debe regular la humedad, bien proporcionando agua al material o añadiendo material fresco con mayor contenido de agua.
Exceso de ácidos orgánicos	Los materiales vegetales como restos de cocina, frutas, liberan muchos ácidos orgánicos y tienden a acidificar el medio.	Adición de material rico en nitrógeno hasta conseguir una adecuada relación C: N.

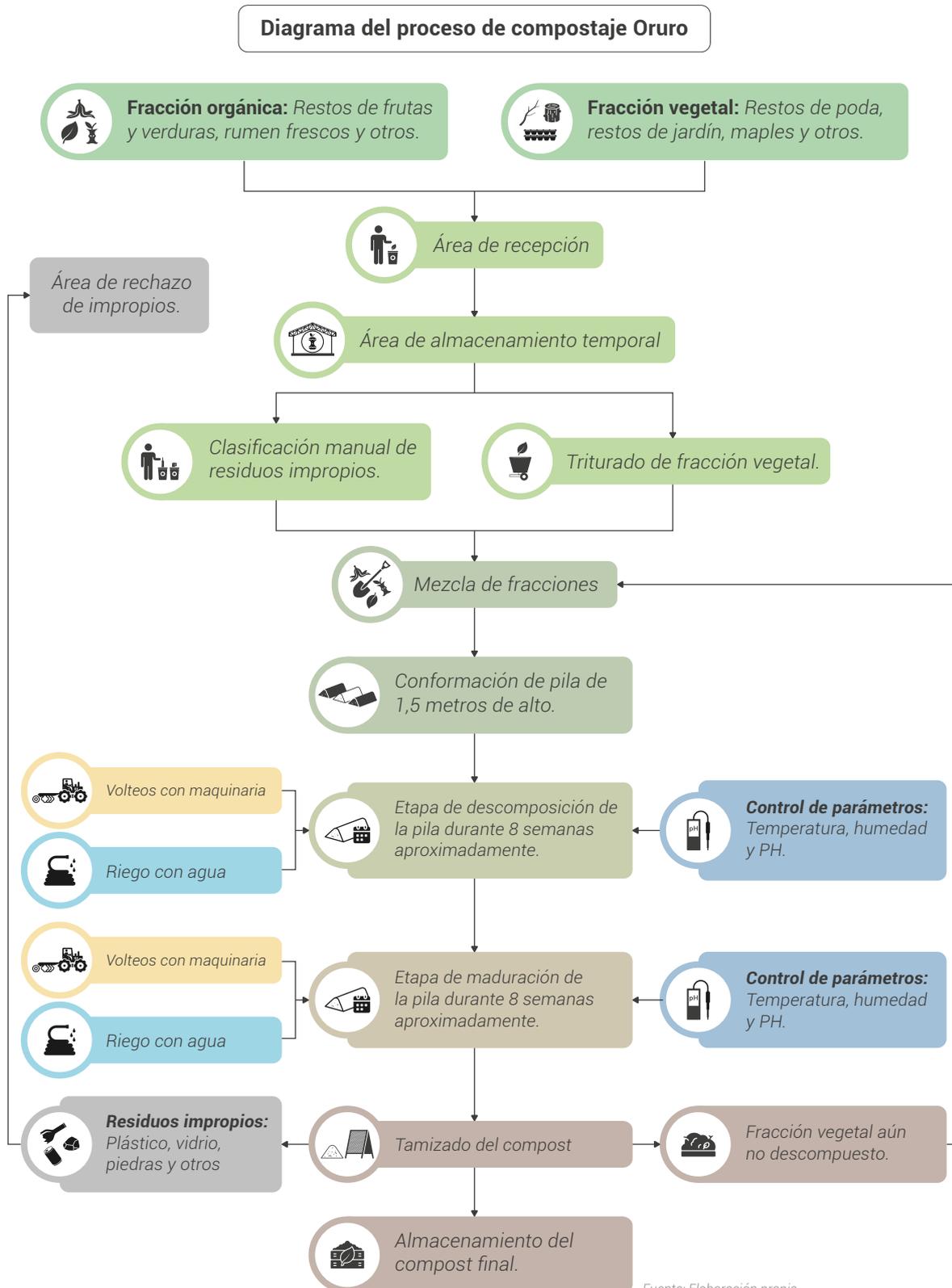
Exceso de nitrógeno	Cuando hay un exceso de nitrógeno en el material de origen, con una deficiente relación C:N, asociado a humedad y altas temperaturas, se produce amoníaco alcalinizando el medio.	Adición de material más seco y con mayor contenido en carbono (restos de poda, hojas secas, aserrín).
Presencia de moscas	Las fracciones no están mezcladas proporcionalmente.	Voltear la mezcla para que los residuos orgánicos no queden en la superficie.
	Existen residuos orgánicos en exceso.	Añadir más residuos de fracción vegetal secos. Cubrir la pila con residuos de fracción vegetal (paja, hojas o restos de césped).
Temperatura baja	Demasiados residuos de fracción vegetal verde.	Añadir residuos de fracción vegetal secos.
	La pila es demasiado pequeña.	Incrementar el tamaño de la pila hasta lograr una buena altura.
	Humedad insuficiente.	Durante el volteo se debe de añadir agua.
Aparición de moho o manchas blancas	Insuficiente aireación, proceso anaerobio.	Voltear y añadir material estructurante.
	Hay crecimiento de hongos. Hay actividad microbiana.	No preocuparse; es buena señal.

▼ Planta de compostaje piloto de Oruro.



## 9. Diagrama del proceso de producción

De acuerdo a la descripción de cada etapa realizada en capítulos anteriores, a continuación, se muestra el diagrama del proceso de producción de la planta de compostaje piloto de Oruro:



## 10. Planilla de control y seguimiento

A continuación, se presenta la planilla de control y seguimiento la operación de la planta de compostaje, donde se puede apreciar el ingreso de material, tiempo de conformación por pila, dimensiones de la pila, control de parámetros y acciones que se realizan en el proceso:

Planilla de control del proceso de compostaje piloto en Oruro												
Pretratamiento					Monitoreo y acciones realizadas en el proceso							
Pila	Aportes		Tiempo de conformación en días	Dimensiones de la pila en metros		Número de control			Fecha			
	Residuos Orgánicos M3 - Tn	Material Estructurante M3 - Tn				Seguimiento semanal			Acciones semanales			
						Temperatura	Humedad	pH	Volteos	Riego	Escenario que se presenta	Soluciones realizadas
Pila 1				Largo								
				Ancho								
				Alto								
Pila 2				Largo								
				Ancho								
				Alto								
Pila 3				Largo								
				Ancho								
				Alto								

▼ Resultado final del compost.



## 11. Resultados del análisis de laboratorio del compostaje

Con la finalidad de conocer las características físico-químicas del compostaje que se está produciendo en la planta de compostaje piloto de Oruro, se realizó un análisis de laboratorio del compostaje, donde nos da como resultados los siguientes datos:

**Cuadro N° 6: Análisis de los resultados de laboratorio del compostaje piloto de Oruro**

N°	Parámetros evaluados	Unidad de medida	Resultados Compost Oruro	Rangos establecidos FAO- Guía MMAYA	Explicación de la función del parámetro	Análisis del resultado y acción a seguir
1	Contenido de humedad	%	8,86	30% - 40% FAO	<p>El contenido de humedad afecta en el éxito y eficiencia del proceso por que influye en la actividad microbiológica y bioquímica que descomponen los materiales orgánicos.</p> <p>El exceso de humedad genera falta de oxígeno, aireación deficiente que genera malos olores y lixiviados de nutrientes esenciales, demasiada sequedad o falta de humedad frena la actividad microbiana y ralentiza el proceso.</p>	<p>El contenido de humedad no se encuentra en el rango ideal. Entre las acciones correctivas, este compost deberá estar cubierto o embolsado para evitar que la humedad disminuya y permite también facilitar el tamizado del compostaje.</p> <p>Para aumentar la humedad en la pila se deberá incorporar más agua para que la siguiente cosecha de compost este dentro el rango ideal de humedad.</p>
2	PH	1:5	9,65	6,5 - 8,5 FAO	<p>El pH afecta a los microorganismos que realizan la descomposición, la mayoría de ellos funciona mejor en un rango de pH neutro a ligeramente alcalino entre 6 a 8.</p> <p>Si el pH es demasiado ácido, menor a 6 ralentiza la descomposición y limita la disposición de nutrientes. Si el pH es demasiado alcalino, mayor a 8 afecta la actividad microbiana.</p>	<p>El pH del compost de Oruro es alcalino, esto se debe a factores externos como es el área donde se realiza el compostaje, con un suelo altamente alcalino por los minerales que contiene, también el pH del agua de pozo que se utiliza para regar el compostaje es alcalino y a esto se le suma que inicialmente se estaba utilizando el po/villo de quinua que al ser alcalino puede haber generado esta afectación en el pH.</p>

						<p>El ajuste de pH se genera agregando materiales ácidos (como restos de frutas) o materiales alcalinos (como ceniza de madera).</p>	<p>Debemos tomar en cuenta la relación carbono, nitrógeno y aumentar la proporción de restos de frutas. Es importante hacer estos ajustes de manera cuidadosa para evitar cambios bruscos en el pH.</p>
3	Conductividad eléctrica	dS/m	1,57	N/C		<p>La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica, proporciona información sobre la cantidad de sales presentes en el compost. Estas sales pueden provenir de materiales como estiércol, restos vegetales o fertilizantes.</p> <p>Se busca un nivel óptimo de conductividad eléctrica para asegurar que no haya exceso de sales y por qué es un indicador de madurez del compost.</p> <p>Una alta conductividad eléctrica indica presencia de sales en niveles perjudiciales para las plantas.</p>	<p>Si la conductividad eléctrica es demasiado alta, se pueden tomar medidas para reducir las sales, como aumentar la aireación del compost o agregar materiales de carbono (como paja, restos de poda y aserrín) para diluir las sales presentes.</p>
4	Carbono orgánico total	%	7,84	N/C		<p>El carbono orgánico total es una medida que indica la cantidad total de carbono que nos proporciona información sobre la calidad y madurez del compost. La disminución del contenido de carbono es un indicador de madurez del compost.</p>	
5	Relación C/N	%	16,68	10:1 - 15:1	FAO	<p>La relación carbono nitrógeno influye en la eficiencia del proceso de descomposición microbiana y en la calidad final del compost.</p> <p>Mucho nitrógeno puede generar malos olores y demasiado carbono puede ralentizar el proceso de compostaje y terminar con un compost final más ácido.</p>	<p>El parámetro obtenido está cerca del rango ideal, se recomienda controlar la proporción de las mezclas de las fracciones.</p>

6	Nitrógeno total	%	0,47	0,3% - 1,5% FAO	<p>El nitrógeno total es un indicador de la disponibilidad de nitrógeno, un nutriente esencial para los microorganismos necesario para su crecimiento y actividad metabólica.</p> <p>La concentración de nitrógeno indica la velocidad de descomposición, un aumento en la concentración de nitrógeno sugiere mayor actividad microbiana y descomposición.</p>	<p>Agregar materiales ricos en nitrógeno, como estiércol o restos de alimentos puede corregir una relación C/N desequilibrada.</p>
7	Fósforo total	%	0,1	0,1% - 1,0% FAO	<p>El fósforo total es un indicador de presencia y disponibilidad de fósforo en el compost.</p> <p>Aunque el fósforo no es tan dinámicamente implicado en el proceso de compost como el nitrógeno y el carbono, es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Contribuye a un equilibrio de nutrientes para el crecimiento saludable de plantas.</p>	<p>La adición de materiales ricos en fósforo, como huesos triturados, puede ayudar a mejorar la disponibilidad de este nutriente.</p>
8	Potasio total	%	0,15	0,3% - 1,0% FAO	<p>El potasio desempeña un papel crucial en la resistencia de las plantas al estrés, incluido el estrés hídrico y las condiciones adversas. Fortalece la salud de las plantas y las hace resistentes.</p>	<p>La adición de materiales ricos en potasio, como restos de plátano o ceniza de madera ayuda a la disponibilidad de este nutriente.</p>
9	Calcio total	%	2,46	2% - 8% Guía MMAYA	<p>La cantidad de calcio total puede influir en la calidad de compost y fertilidad del suelo, contribuye a la estructura y rigidez de las células, fuerza y estabilidad a los tejidos vegetales.</p> <p>Actúa de amortiguador contra la acidez en el suelo para mantener un pH equilibrado.</p>	<p>La adición de materiales ricos en calcio, como huesos o conchas molidas ayuda a la disponibilidad de este nutriente.</p>

10	Magnesio total	%	0,06	<1% Guía MMAYA	El magnesio es un componente central de la molécula de clorofila en las plantas, esta es esencial para la fotosíntesis, el proceso por el cual las plantas convierten la luz en energía.	Agregar materiales ricos en magnesio como dolomita o materiales ricos en este mineral ayuda a la disponibilidad de este nutriente.
11	Sodio total	%	0,15	N/C	Altos niveles de sodio en el compost tienen efectos negativos en el crecimiento de las plantas, interfiere con la absorción de nutrientes esenciales por las raíces, produciendo deficiencias nutricionales.	En caso de altas concentraciones de sodio se debe evitar la adición de materiales ricos en sodio como ciertos tipos de salo residuos con elevado contenido de sodio.
12	Amonio disponible	ppm	70,5	N/C	El amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) es una forma de nitrógeno que las plantas pueden absorber directamente por sus raíces, es una forma de nitrógenos fácilmente asimilable que estimula el crecimiento vegetal.	Agregar materiales como estiércol fresco o restos de alimentos ayudan a su disponibilidad.
13	Granulometría	mm	4,7 - 0,5	<1,6 cm	La granulometría es la distribución de diferentes tamaños de partículas en el compost, influye en su estructura, determina su capacidad de retener agua, permite la circulación de aire y ofrece un ambiente adecuado a la actividad microbiana.	El parámetro obtenido está cerca del rango ideal, se recomienda contar con una cernidora manual de un diámetro menor a 1,6 cm.
14	Dióxido de carbono	ppm	65,26	N/C	El dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) indicador de actividad microbiana, se libera a medida que se metabolizan los materiales orgánicos. El aumento de temperatura es un signo de descomposición eficiente. La relación entre producción de dióxido de carbono y la absorción de oxígeno es un indicador de equilibrio entre los procesos aeróbicos y anaeróbicos en el compostaje. En un compostaje ideal se busca mantener condiciones aeróbicas para una descomposición eficiente.	Según el dato obtenido en el análisis de laboratorio, el dióxido de carbono producido durante el proceso de compostaje, es considerado de bajo impacto ambiental, ya que es capturado por las plantas para realizar la fotosíntesis. Para que este parámetro este presente en el proceso con datos adecuados es necesario que la pila conformada tenga una porosidad entre un 20% y 30% y que los volteos se los realicen constantemente.

15	Amoniaco	ppm	46	N/C	<p>La producción de <math>\text{CO}_2</math> contribuye al control de olores desagradables. A medida que los materiales orgánicos se descomponen y estabilizan la producción de <math>\text{CO}_2</math> disminuye, indicando que el compost está llegando a estabilizarse.</p> <p>El amoniaco <math>\text{NH}_3</math> es un indicador de condiciones anaeróbicas en el compostaje, que ocurren en ausencia de oxígeno.</p> <p>El amoniaco tiene un olor distintivo y fuerte, su presencia nos dice que el compost tiene olores desagradables y nos avisa la necesidad de oxigenación en nuestro compost.</p>	<p>Para bajar el contenido de amoniaco se debe oxigenar el compost a través de la inclusión de materiales ricos en carbono para mejorar la relación carbono/nitrogeno y promover las condiciones aerobias.</p> <p>Además, se debe de realizar los volteos constantes en descomposición y maduración.</p>
16	Prueba de maduración		4	1 - 8 Guía MMAYA	<p>La prueba de maduración es un proceso que evalúa la estabilidad y la calidad del compost, verifica que se haya completado el proceso de descomposición y si ha alcanzado un estado más equilibrado y estable.</p> <p>Implica: medición de temperatura, olores, apariencia visual, pH balanceado, presencia de semillas y de malezas, disminución de niveles de amoniaco. Con esta prueba se espera que el compost sea beneficioso y seguro para las plantas.</p>	<p>El resultado obtenido de la prueba de maduración es de un nivel 4, el cual según la guía de aprovechamiento de residuos corresponde a (compost en una etapa moderadamente activa de descomposición, con necesidades de manejo).</p> <p>Se recomienda que el proceso de compostaje tenga una duración de 16 semanas.</p> <p>Para esto es necesario evitar que el proceso se ralentice, realizar los volteos de las pilas constantemente y controlar y corregir los parámetros.</p>

## 12. Referencias Bibliográficas

- *Agencia de Residuos de Cataluña. (2016). Esta Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje. Cataluña, España.*
- *FAO. (2013). Manual de Compostaje del Agricultor, experiencias en America Latina. Santiago de Chile.*
- *MMAyA/VAPSB/DGGIRS.(2012). Guía para el Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos mediante el compostaje y lombricultura. La Paz, Bolivia.*

