

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN



**VICEPRESIDENCIA DE INVESTIGACIÓN
INSTITUTO DE CIENCIA DE DATOS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN CONTAMINACIÓN DE SISTEMAS
AGRO-FORESTALES POR PRÁCTICAS AGRÍCOLAS**

MANUAL DE EJERCICIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS

Annick Estefany Huaccha Castillo

Franklin Hitler Fernandez Zarate

Mariela Núñez Figueroa

VII ciclo de Ingeniería Forestal y Ambiental

2023-I

JAÉN - PERÚ, FEBRERO, 2023

Manual de ejercicios de residuos sólidos

Autores:

© Annick Estefany Huaccha Castillo

© Franklin Hitler Fernandez Zarate

© Mariela Núñez Figueroa

Edición de:

© Universidad Nacional de Jaén. Fondo Editorial

Dirección: Km. 24 de la carretera Jaén-San Ignacio, Cajamarca-Perú

www.unj.edu.pe

1ra. Edición digital - febrero 2023

Libro electrónico disponible en <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/16>

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N°: 2022-12637

ISBN: 978-612-48908-2-6

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| ÍNDICE DE TABLAS | 4 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 6 |
| ACRÓNIMOS | 3 |
| I. TERMINOLOGÍA BASE | 5 |
| 1.1 Reciclaje | 7 |
| 1.2 Biodegradabilidad de los componentes de residuos orgánicos | 7 |
| 1.3 Sólidos suspendidos volátiles (SSV)..... | 7 |
| 1.4 Contenido de humedad en los residuos sólidos (RRSS) | 7 |
| 1.5 Generación de RRSS | 8 |
| 1.6 Estudio de caracterización..... | 9 |
| 1.7 Instalación de recuperación de materiales (IRM) | 9 |
| 1.8 Procedimientos de separación de RRSS que se emplean en la IRM..... | 9 |
| 1.9 Criba tipo trómel | 10 |
| II. EJERCICIOS Y SOLUCIÓN..... | 13 |
| Problema 1 | 15 |
| Problema 2 | 21 |
| Problema 3 | 25 |
| Problema 4 | 36 |
| Problema 5 | 40 |
| Problema 6 | 44 |
| Problema 7 | 54 |
| Problema 8 | 60 |
| Problema 9 | 66 |
| Problema 10 | 71 |
| REFERENCIAS..... | 75 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1 Características de RRSS que ingresan a la planta de compostaje | 15 |
| Tabla 2 Contenido de lignina en componentes de los RRSS..... | 15 |
| Tabla 3 Generación de componentes de los RRSS considerando composición física porcentual..... | 16 |
| Tabla 4 Componentes de los RRSS en base húmeda (H_{BH}) y base seca (H_{BS}) | 16 |
| Tabla 5 Sólidos volátiles en los RRSS en base seca según componentes | 18 |
| Tabla 6 Porcentaje de fracción biodegradable en base al contenido de lignina en los RRSS..... | 18 |
| Tabla 7 Fracción biodegradable en base a los sólidos volátiles en los componentes de los RRSS..... | 19 |
| Tabla 8 Fracciones recuperadas y composición física de los RRSS generados por la población..... | 21 |
| Tabla 9 Generación de componentes de los RRSS (Kg/día) | 22 |
| Tabla 10 Fracción de recuperación de RRSS en contenedores y recuperación de componentes por participación de población..... | 23 |
| Tabla 11 Componentes de RRSS que ingresan a la IRM | 24 |
| Tabla 12 Características de diseño de trómel | 26 |
| Tabla 13 Rendimiento de separación del trómel de voluminosos con una inclinación de 3° y una velocidad de rotación de 10 r.p.m. | 26 |
| Tabla 14 Rendimiento de separación del trómel combinado con una inclinación de 3° y una velocidad de rotación de 18 r.p.m. | 26 |
| Tabla 15 RRSS monstruos recuperados en separación manual | 29 |
| Tabla 16 RRSS operados por el trómel de voluminosos | 30 |
| Tabla 17 RRSS operados en el trómel combinado | 32 |
| Tabla 18 Datos para el cálculo de horas que pueden trabajar los trómel sin superar su capacidad | 34 |

| | |
|--|----|
| Tabla 19 Mínimo de horas que puede trabajar el trómel sin superar su rendimiento (Qm) | 34 |
| Tabla 20 Velocidad de rotación de los trómel..... | 35 |
| Tabla 21 RRSS generados en la ciudad de Jaén y su humedad..... | 44 |
| Tabla 22 Humedad en RRSS frescos que ingresan a planta de reciclaje..... | 46 |
| Tabla 23 RRSS que ingresan, separan y se rechazan en la etapa de triaje | 46 |
| Tabla 24 RRSS separados en el hundido y en el rechazo del trómel..... | 47 |
| Tabla 25 RRSS reciclados y rechazados en la línea de recuperados | 47 |
| Tabla 26 Características de los residuos a compostar..... | 55 |
| Tabla 27 Características de la materia prima..... | 60 |
| Tabla 28 Datos para el diseño del biogás a partir del rendimiento de materia prima en base al peso seco | 61 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1 Diseño de trómel de voluminosos | 27 |
| Figura 2 Diseño de trómel combinado..... | 28 |
| Figura 3 Líneas de entrada y de salida de las operaciones mecánicas de separación de RRSS..... | 28 |
| Figura 4 Flujo de los RRSS en las tres etapas de la planta de reciclaje | 49 |
| Figura 5 Forma prisma triangular de hilera de compostaje | 53 |
| Figura 6 Vertedero de residuos no peligrosos y altura de barreras de protección mínimas debajo de la masa de residuos..... | 67 |
| Figura 7 Vertedero de residuos no peligrosos y altura de barreras de protección mínimas encima de la masa de residuos..... | 68 |

INTRODUCCIÓN

La generación de los residuos sólidos, ligado al manejo inadecuado de estos es un problema ambiental acentuado en los últimos años, influenciado por factores como el aumento de la población y los patrones de producción y consumo. Por tanto, contribuye en la contaminación del suelo, agua, aire, por lo que se ha convertido en un problema social y de salud pública. Es importante el análisis y gestión de los residuos sólidos, permite reflexionar sobre la realidad que no puede desconocerse y que se ha convertido en prioridad para los municipios desde la generación - valorización hasta la disposición final de los residuos sólidos, contribuyendo con la protección del ambiente.

Es por ello que la Universidad Nacional de Jaén a través del Instituto de Ciencia de Datos, pone a disposición del público el “*manual de ejercicios de residuos sólidos*”, como aporte para el manejo integrado de los residuos sólidos, con información de utilidad y ejercicios prácticos que se pueden desarrollar con conocimientos básicos.

Está dirigido a profesionales, estudiantes y público en general interesado en atender la problemática ambiental de su localidad.

ACRÓNIMOS

C/N: Relación carbono nitrógeno

GPC: Generación per cápita

H_{BH}: Humedad en base húmeda

H_{Bs}: Humedad en base seca

IRM: Instalación de recuperación de materiales

K: coeficiente de permeabilidad del terreno

MO: Materia orgánica

RRSS: Residuos sólidos

RSU: Residuos sólidos urbanos

SSNV: Sólidos suspendidos no volátiles

SSV: Sólidos suspendidos volátiles

SSVB: Sólidos suspendidos volátiles biodegradables

ST: Sólidos totales

TRH: Tiempo de retención hidráulica

I. TERMINOLOGÍA BASE

1.1 Reciclaje

Hace referencia a toda operación enfocada en la recuperación a través de la cual los materiales de desecho se reprocessan para obtener productos o materiales para otros fines (Kurniawan et al., 2021).

1.2 Biodegradabilidad de los componentes de residuos orgánicos

Para determinar la biodegradabilidad de los residuos orgánicos, por lo general se usa el contenido de sólidos volátiles (SV) a 550 °C (base seca). Sin embargo, el uso de SV para la descripción de la fracción orgánica de los RSU es erróneo, ya que algunos de los constituyentes orgánicos de los RSU son altamente volátiles pero bajos en biodegradabilidad (por ejemplo, el papel de periódico, residuos de jardines). Alternativamente, se puede usar el contenido de lignina de un residuo para estimar la fracción biodegradable (Ecuación 1) (Tchobanoglous et al., 1994).

$$FB = 0.830 - 0.028 \times CL \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

FB = Fracción biodegradable expresada en base a los sólidos volátiles

0.830 = Constante empírica

0.028 = Constante empírica

CL =

Contenido de lignina en los SV expresado como un porcentaje en peso seco

1.3 Sólidos suspendidos volátiles (SSV)

Son los sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los SST son calcinados a 500 ± 50 °C. La concentración de SSV se suele considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica (Tchobanoglous et al., 1994).

1.4 Contenido de humedad en los residuos sólidos (RRSS)

Empleado para describir la cantidad de agua que tienen los RRSS. Debido a que la mayoría de los RRSS están constituidos de materia seca y agua, se puede establecer que la masa total (m_T) de los RRSS es igual a la suma de la masa en base seca (m_{BS}) y de su masa en base húmeda (m_{BH}) (Tchobanoglous et al., 1994).

$$m_T = m_{BS} + m_{BH} \quad \text{Ecuación 2}$$

El contenido de humedad se puede expresar de dos maneras:

- A. Contenido de humedad en base seca (H_{BS}):** es el cociente entre la masa de agua en los RRSS y su masa seca.

$$\% H_{BS} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

El contenido de humedad H_{BS} “compara” la masa de agua que contienen los RRSS con su masa seca. Por ejemplo, un valor $H_{BS} = 200 \%$ significa que la masa de agua presente en los RRSS es 2 veces su masa seca.

- B. Contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}):** es el cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total.

$$\% H_{BH} = \frac{m_{H_2O}}{m_H} \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

El contenido de humedad representa el porcentaje de masa de agua que contiene la muestra respecto a su masa total (m_H). En esta ecuación, la masa de agua es una fracción de la masa total, es decir la masa de agua es menor o igual a la masa total del material. La definición de H_{BH} permite identificar de manera “intuitiva” el punto en el cual el material sólo está constituido por materia seca (0 %) y el punto en el que sólo está constituido de agua (100 %).

1.5 Generación de RRSS

La gestión de los RRSS es uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI. En 2018 se produjeron 2010 millones de toneladas en todo el mundo y al menos el 33% no se desechan adecuadamente (Kaza et al., 2018). Se proyecta que para el 2050, la generación mundial de residuos incrementará a 3400 millones de toneladas. El problema es más grave en países en vías de desarrollo ya que la cultura ambiental es menos desarrollada, escasez de recursos económicos y marcos legales e instituciones más débiles. Sin embargo, el problema también es complejo para los países desarrollados, que lo afrontan a través de la implementación de distintas

reglas, normas y políticas con restricciones cada vez mayores (Alzamora et al., 2022).

1.6 Estudio de caracterización

Herramienta que permite obtener información primaria relacionada a las características de los residuos sólidos en este caso municipales, constituidos por residuos domiciliarios y no domiciliarios, como son: la cantidad de residuos, densidad, composición y humedad, de un lugar determinado, permitiendo la planificación técnica-operativa, administrativa y financiera del manejo de los residuos sólidos.

1.7 Instalación de recuperación de materiales (IRM)

Es una planta especializada que recibe, separa y prepara los materiales con valor para su comercialización (Huaccha, 2017).

1.8 Procedimientos de separación de RRSS que se emplean en la IRM

Según Tchobanoglous et al. (1994) el tamaño y distribución de los componentes de los RRSS son una consideración importante dentro de las IRM y a través de diversos procedimientos, se logra separar materiales para su posterior valorización. Algunos de estos procedimientos son:

1. **Triaje manual:** los residuos son depositados en una cinta o banda transportadora y los trabajadores situados a los lados de esta, separan los residuos según características específicas.
2. **Cribado:** este método consiste en la separación basada en el tamaño de los residuos.

Tipos de cribas:

- **Criba tipo trómel:** es un tambor cilíndrico de gran diámetro (normalmente 3 m), que gira sobre un eje horizontal y por donde los materiales más pequeños pasan a través de las cribas (mallas). Mayormente, el trómel empleado en la separación de RRSS, contiene un «**sistema rompe bolsas**» en el que se

produce la rotura de las bolsas mediante cuchillas (o pinchos rasgadores) sin triturar el contenido asegurando la efectividad de rasgado o vaciado no inferior al 70 % de las bolsas cerradas de entrada (Huaccha, 2017).

- **Criba de disco:** formada por discos giratorios, entrelazados, paralelos. Los materiales que hay que separar caen entre los espacios, los materiales grandes se llevan por encima de los discos como en una cinta transportadora.

1.9 Criba tipo trómel

Tchobanoglous et al. (1994) señalan que la criba tipo trómel es la más empleada en la gestión de los RSU. Su diseño está basado en los siguientes parámetros: diámetro, longitud, velocidad de rotación, ángulo de inclinación, tasa de alimentación, rendimiento. A continuación, se detallan algunos de estos parámetros.

A. Diámetro del trómel

$$D_{\text{teórico}} = \left[\frac{11.36 \times Q_m}{d_b \times F \times K_v \times g^{0.5} \times \tan \alpha} \right]^{0.4} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$D_{\text{teórico}}$ = es el diámetro del trómel en metros

Q_m = rendimiento del trómel en kg/s

d_b = peso específico de los residuos sólidos urbanos medidos en kg/m^3
 $\rightarrow (200 \text{ kg/m}^3)$

α = ángulo de inclinación del trómel

K_v = factor de corrección de velocidad que depende del ángulo de inclinación este puede ser de 1.35 con un ángulo de 3° o, 1.85 con un ángulo de 5°

F = factor de relleno entre 0.25 a 0.33 ya que el trómel no se llena en su totalidad

g = aceleración gravitacional igual a 9.81 m/s^2

Nota: Con la Ecuación 5 se puede determinar el rendimiento del trómel, despejando

Q_m

B. Velocidad de rotación del trómel (VR)

Está en función a la «velocidad crítica» (VC) la misma que es cuando los materiales se pegan a la superficie del cribado. Entonces la velocidad óptima se produce cuando los materiales se voltean en un movimiento catarata, esto es cuando los RRSS se conducen parcialmente por la pared interior del trómel para luego caer sobre sí mismos. Idealmente la VR debe ser el 50 % de la VC para diseños que incluyen placas verticales en el interior y 80 % para casos que no consideren estas placas.

$$VR = k \times VC \quad \text{Ecuación 6}$$

$$VC = \frac{1}{2. \pi} \sqrt{\frac{g}{r}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

K

= factor de corrección de velocidad que depende del ángulo de inclinación y va de 0.5 - 0.8

g = aceleración gravitacional igual a 9.81 m/s²

r = radio del trómel (m)

II. EJERCICIOS Y SOLUCIÓN

Problema 1

En una planta de compostaje se reciben diariamente 50,000 Kg de residuos sólidos (RRSS), con las características que se detallan en la Tabla 1 y Tabla 2

Tabla 1

Características de RRSS que ingresan a la planta de compostaje

| Componentes de los RRSS | Composición física (%) | % Humedad en base húmeda (H _{BH}) |
|--------------------------|------------------------|---|
| Residuos de comida | 50 | 55 |
| Residuos: cartón y papel | 21 | - |
| Papel de periódico | 30 | 6 |
| Cartón | 40 | 5 |
| Papel de oficina | 30 | 5 |
| Residuos de jardín | 14 | 60 |
| Otros | 15 | 10 |

Determinar:

1. Porcentaje de humedad de los RRSS en base húmeda (% H_{BH}) y en base seca (% H_{BS}).
2. Cantidad total de residuos sólidos biodegradables en base a los sólidos volátiles.

Tabla 2

Contenido de lignina en componentes de los RRSS

| Componentes de los RRSS | Sólidos volátiles (SV) (%) | Contenido de lignina (CL) (%) |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Residuos de comida | 7-15 ; 11 | 0.4 |
| Residuos: cartón y papel | - | - |
| Papel de periódico | 94.0 | 21.9 |
| Cartón | 94.0 | 12.9 |
| Papel de oficina | 96.4 | 0.40 |
| Residuos de jardín | 50-90 ; 70 | 4.10 |
| Otros | - | - |

Fuente: Tchobanoglous et al. (1994)

Nota: Biodegradabilidad de los componentes de residuos orgánicos. El contenido en sólidos volátiles (SV), determinado a 550 °C, se usa frecuentemente como una medida de la biodegradabilidad de la fracción orgánica de los RRSS. Sin embargo, el uso de SV para

la descripción de la fracción orgánica de los RRSS es erróneo, porque algunos de los constituyentes orgánicos son altamente volátiles pero bajos en biodegradabilidad (por ejemplo, el papel de periódico y algunos recortes de plantas). Alternativamente, se puede usar el contenido de lignina de un residuo para estimar la fracción biodegradable, mediante la Ecuación 1.

Solución

- **Cálculo de la generación de RRSS (Kg) según componentes y considerando la composición física (%) indicada en la Tabla 1**

Tabla 3

Generación de componentes de los RRSS considerando composición física porcentual

| Componentes de los RRSS | Composición física (%) | RRSS (Kg) |
|--------------------------|------------------------|------------------|
| Residuos de comida | 50.00 | 25,000.00 |
| Residuos: cartón y papel | 21.00 | 10,500.00 |
| Papel periódico | 30.00 | 3,150.00 |
| Cartón | 40.00 | 4,200.00 |
| Papel de oficina | 30.00 | 3,150.00 |
| Residuos de jardín | 14.00 | 7,000.00 |
| Otros | 15.00 | 7,500.00 |
| Total | 100.00 | 50,000.00 |

- **Cálculo de componentes de los RRSS en base húmeda y base seca considerando la Tabla 1 que indica el % H_{BH} por componente:**

Tabla 4

Componentes de los RRSS en base húmeda (H_{BH}) y base seca (H_{BS})

| Componentes de los RRSS | % H_{BH} | RRSS en base húmeda (Kg) | RRSS en base seca (Kg) |
|--------------------------|------------|--------------------------|------------------------|
| Residuos de comida | 55.00 | 13,750.00 | 11,250.00 |
| Residuos: cartón y papel | - | - | - |
| Papel periódico | 6.00 | 189.00 | 2,961.00 |
| Cartón | 5.00 | 210.00 | 3,990.00 |
| Papel de oficina | 5.00 | 157.50 | 2,992.50 |

| | | | |
|--------------------|-------|------------------|------------------|
| Residuos de jardín | 60.00 | 4,200.00 | 2,800.00 |
| Otros | 10.00 | 750.00 | 6,750.00 |
| Total | - | 19,256.50 | 30,743.50 |

- **Cálculo del porcentaje de humedad de los RRSS en base húmeda (% H_{BH}) y en base seca (% H_{BS}).**

Considerando que el 100 % de RRSS frescos son 50,000.00 Kg; es necesario calcular el % H_{BH} y en base seca (% H_{BS}).

$$50,000.00 \text{ kg de RRSS} = 100 \%$$

$$19,256.50 \text{ kg de RRSS en base húmeda} = X \%$$



$$X = 38.51 \%$$

Por lo tanto:

El porcentaje de humedad de los RRSS en base húmeda (% H_{BH}) es: 38.51 %. Y por diferencia el porcentaje de humedad de los RRSS en base seca (% H_{BS}), es 61.49 %

- **Cálculo de los sólidos volátiles (Kg) presentes en los RRSS en base seca según componentes y empleando la Tabla 2.**

Tabla 5

Sólidos volátiles en los RRSS en base seca según componentes

| Componentes | RRSS. en base seca (Kg) | Sólidos volátiles (%) | Sólidos volátiles (Kg) |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Residuos de comida | 11,250.00 | 11.00 | 1,237.50 |
| Residuos: cartón y papel | - | - | - |
| Papel periódico | 2,961.00 | 94.00 | 2,783.34 |
| Cartón | 3,990.00 | 94.00 | 3,750.60 |
| Papel de oficina | 2,992.50 | 96.40 | 2,884.77 |
| Residuos de jardín | 2,800.00 | 70.00 | 1,960.00 |
| Otros | 6,750.00 | - | - |
| Total | 30,743.50 | - | 12,616.21 |

- **Cálculo del porcentaje de fracción biodegradable (%) mediante la reacción:**

FB = 0.830 – 0.028 x CL (teniendo como base al contenido de lignina (%) presente en los componentes de los RRSS)

Tabla 6

Porcentaje de fracción biodegradable en base al contenido de lignina en los RRSS

| Componentes | Contenido de lignina (%) | Fracción biodegradable (%) |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Residuos de comida | 0.40 | 0.82 |
| Residuos: cartón y papel | - | - |
| Papel periódico | 21.90 | 0.22 |
| Cartón | 12.90 | 0.47 |
| Papel de oficina | 0.40 | 0.82 |
| Residuos de jardín | 4.10 | 0.72 |
| Otros | - | - |

- **Cálculo de la fracción biodegradable (Kg) expresada en base a los sólidos volátiles (Kg) presentes en los componentes de los RRSS**

Tabla 7

Fracción biodegradable en base a los sólidos volátiles en los componentes de los RRSS

| Componentes | Fracción biodegradable (Kg) |
|--------------------------|------------------------------------|
| Residuos de comida | 1 013.27 |
| Residuos: cartón y papel | - |
| Papel periódico | 603.43 |
| Cartón | 1,758.28 |
| Papel de oficina | 2,362.05 |
| Residuos de jardín | 1,401.79 |
| Otros | - |
| Total | 7,138.82 |



El total de residuos sólidos biodegradables en base a los sólidos volátiles es 7,138.82 Kg.

Problema 2

Estimar la generación de las diferentes fracciones recuperadas (FR) en diferentes contenedores como parte del sistema de recogida selectiva de tres fracciones (papel-cartón; vidrio; envases: plásticos-latas-aluminio) teniendo en cuenta las siguientes fracciones de recuperación y composición física para cada componente:

Tabla 8

Fracciones recuperadas y composición física de los RRSS generados por la población

| Componente | Fracciones recuperadas de RRSS (%) en contenedores | Composición física (%) |
|-------------------------|---|-------------------------------|
| Restos de comida | | 13.0 |
| Papel | 40.0 | 30.0 |
| Cartón | 70.0 | 6.8 |
| Vidrio | 30.0 | 12.0 |
| Tejidos | | 1.8 |
| Gomas | | 0.4 |
| Cuero | | 0.4 |
| Residuos de jardín | | 12 |
| Madera | | 1.8 |
| Plásticos | 50.0 | 9.5 |
| Latas | 70.0 | 5.0 |
| Aluminio | 20.0 | 1.6 |
| Otros metales | | 3.0 |
| Suciedad, cenizas, etc. | | 2.7 |
| Total | - | 100.0 |

1. Calcular la cantidad (Kg/día) y composición física (%) de los componentes de los RRSS que ingresan en una instalación de recuperación de materiales (IRM).

Datos:

- Población: 100,000 habitantes.
- Generación per cápita: 0.65 Kg/hab./día.

- Factor de participación de población en la recuperación de componentes, 30 %.

Solución

➤ Cálculo de la generación total de RRSS (Kg/día)

Generación total de RRSS = población × generación per cápita

$$\text{Generación total de RRSS} = 100,000 \text{ hab.} \times 0.65 \frac{\text{Kg}}{\text{hab}} \cdot / \text{día}$$

$$\text{Generación total de RRSS} = 65,000 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$$

➤ Cálculo de generación (Kg/día) de cada componente, teniendo en cuenta la composición física y la generación total de los RRSS

Tabla 9

Generación de componentes de los RRSS (Kg/día)

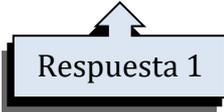
| Componente | Composición física (%) | RRSS generados (Kg/día) |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Restos de comida | 13.0 | 8,450.0 |
| Papel | 30.0 | 19,500.0 |
| Cartón | 6.8 | 4,420.0 |
| Vidrio | 12.0 | 7,800.0 |
| Tejidos | 1.8 | 1,170.0 |
| Gomas | 0.4 | 260.0 |
| Cuero | 0.4 | 260.0 |
| Residuos jardín | 12.0 | 7,800.0 |
| Madera | 1.8 | 1,170.0 |
| Plásticos | 9.5 | 6,175.0 |
| Latas | 5.0 | 3,250.0 |
| Aluminio | 1.6 | 1,040.0 |
| Otros metales | 3.0 | 1,950.0 |
| Suciedad, cenizas, etc. | 2.7 | 1,755.0 |
| Total | 100.0 | 65,000.0 |

- Cálculo de la fracción de recuperación (Kg) de RRSS en contenedores, considerando la fracción de recuperación (%). Y cálculo de la recuperación de componentes (Kg) por la participación de la población, considerando que el factor de recuperación es igual a 30 %.

Tabla 10

Fracción de recuperación de RRSS en contenedores y recuperación de componentes por participación de población

| Componente | RRSS generados (Kg/día) | Fracción de recuperación de RRSS en contenedores | | Recuperación de componentes por participación de la población |
|-------------------------|-------------------------|--|-----------------|---|
| | | (%) | (Kg/día) | (Kg/día) |
| Restos de comida | 8,450.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Papel | 19,500.0 | 40.0 | 7,800.0 | 2,340.0 |
| Cartón | 4,420.0 | 70.0 | 3,094.0 | 928.2 |
| Plásticos | 6,175.0 | 50.0 | 3,087.5 | 926.3 |
| Tejidos | 1,170.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Gomas | 260.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Cuero | 260.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Residuos de jardín | 7,800.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Madera | 1,170.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vidrio | 7,800.0 | 30.0 | 2,340.0 | 702.0 |
| Latas | 3,250.0 | 70.0 | 2,275.0 | 682.5 |
| Aluminio | 1,040.0 | 20.0 | 208.0 | 62.4 |
| Otros metales | 1,950.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Suciedad, cenizas, etc. | 1,755.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total | 65,000.0 | - | 18,804.5 | 5,641.4 |



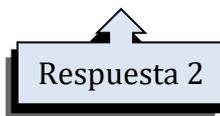
 Respuesta 1

- **Cálculo de los componentes que ingresan a la instalación de recuperación de materiales (IRM), considerando la diferencia entre los RRSS generados (Kg/día) y la recuperación de componentes por la participación de la población (Kg/día).**

Tabla 11

Componentes de RRSS que ingresan a la IRM

| Componente | Componentes que ingresan a la IRM | |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| | Cantidad (Kg/día) | Composición física (%) |
| Restos de comida | 8,450.0 | 14.2 |
| Papel | 17,160.0 | 28.9 |
| Cartón | 3,491.8 | 5.9 |
| Plásticos | 5,248.8 | 8.8 |
| Tejidos | 1,170.0 | 2.0 |
| Gomas | 260.0 | 0.4 |
| Cuero | 260.0 | 0.4 |
| Residuos de jardín | 7,800.0 | 13.1 |
| Madera | 1,170.0 | 2.0 |
| Vidrio | 7,098.0 | 12.0 |
| Latas | 2,567.5 | 4.3 |
| Aluminio | 977.6 | 1.6 |
| Otros metales | 1,950.0 | 3.3 |
| Suciedad, cenizas, etc. | 1,755.0 | 3.0 |
| Total | 59,358.7 | 100.0 |



 Respuesta 2

Problema 3

Los RRSS que llegan a la instalación de recuperación de materiales (IRM) del **Problema 2** pasan por una primera etapa de «separación manual» en donde se logra separar lo RRSS de tamaño grande «llamados monstruos» y otros que puedan entorpecer el correcto funcionamiento de las siguientes operaciones en la IRM.

En la etapa de separación manual de monstruos, los operarios eliminan un 70 % de madera (formados por listones y placas de más de 50 cm de tamaño), el 50 % de tejidos (que podrían enredarse en los elementos mecánicos de las instalaciones y entorpecer operaciones), el 20 % de cajas de cartón (de grandes dimensiones). El resto de los RRSS pasan a través de un «rompe bolsas» donde se abren las bolsas que contienen a los residuos. Esta etapa se realiza antes del ingreso de los RRSS al trómel para su separación mecánica.

La IRM dispone de un «trómel de voluminosos» con 500 mm de diámetro de luz de malla y un «trómel combinado» con 80 mm y 200 mm de diámetro de luz de malla.

Tener en cuenta:

- El diámetro de los dos (02) trómel y la capacidad de carga que tienen estos (ver Tabla 12).
 1. Calcular la composición de las diferentes fracciones que se obtendrán de los dos (02) trómel.
 2. Determinar el número mínimo de horas que podrían estar trabajando sin superar su rendimiento; considerando que el peso específico bruto de los RRSS es de 130 Kg/m³ y que los trómel trabajan al máximo rendimiento con un factor de relleno de 28 %.
- La velocidad de rotación con que trabajan los trómel es de 10 y 18 r.p.m. para el trómel de voluminosos y el combinado, respectivamente.
 2. Comprobar que esta velocidad sea adecuada a las características de diseño de cada uno de ellos.

- Toda etapa requiere de un «balance de materia» para analizar las operaciones desarrolladas en cada fase y poder conocer la cantidad de RRSS que ingresan, recuperan, salen o rechazan.

Tabla 12

Características de diseño de trómel

| Ítem | Trómel de voluminosos | Trómel combinado |
|------------------------------|-----------------------|------------------|
| Luz de malla (mm) | 500 | 80 – 200 |
| Diámetro (m) | 3.5 | 3 |
| Longitud (m) | 6 | 8 |
| Palas elevadoras | sí | no |
| Fracción de área abierta (%) | 85 | 60 |

Tabla 13

Rendimiento de separación del trómel de voluminosos con una inclinación de 3° y una velocidad de rotación de 10 r.p.m.

| Componentes de RRSS | Recuperación (% en el hundido de malla) |
|---------------------|---|
| Papel-cartón | 85 |
| Plásticos | 90 |
| Residuos de jardín | 95 |
| Madera | 95 |
| Otros | 100 |

Tabla 14

Rendimiento de separación del trómel combinado con una inclinación de 3° y una velocidad de rotación de 18 r.p.m.

| Componentes de RRSS | Recuperación (% en el hundido de malla) | |
|---------------------|---|--------|
| | 80 mm | 200 mm |
| Restos de comida | 98 | 2 |
| Papel-cartón | 20 | 40 |
| Plásticos | 10 | 80 |
| Vidrio | 15 | 80 |
| Piel, tejidos, goma | 15 | 70 |

| | | |
|--------------------------------|----|----|
| Residuos de jardín | 40 | 50 |
| Madera | 20 | 50 |
| Metales férricos y no férricos | 15 | 75 |
| Suciedad, cenizas, etc. | 95 | 5 |

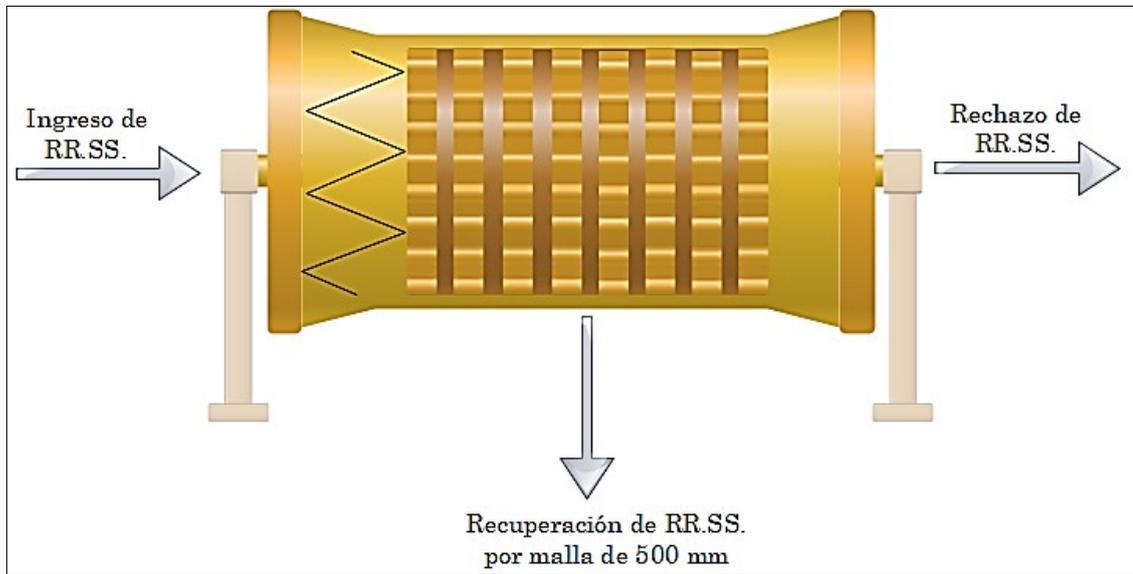


Figura 1

Diseño de trómel de voluminosos

Fuente: Huaccha (2017)

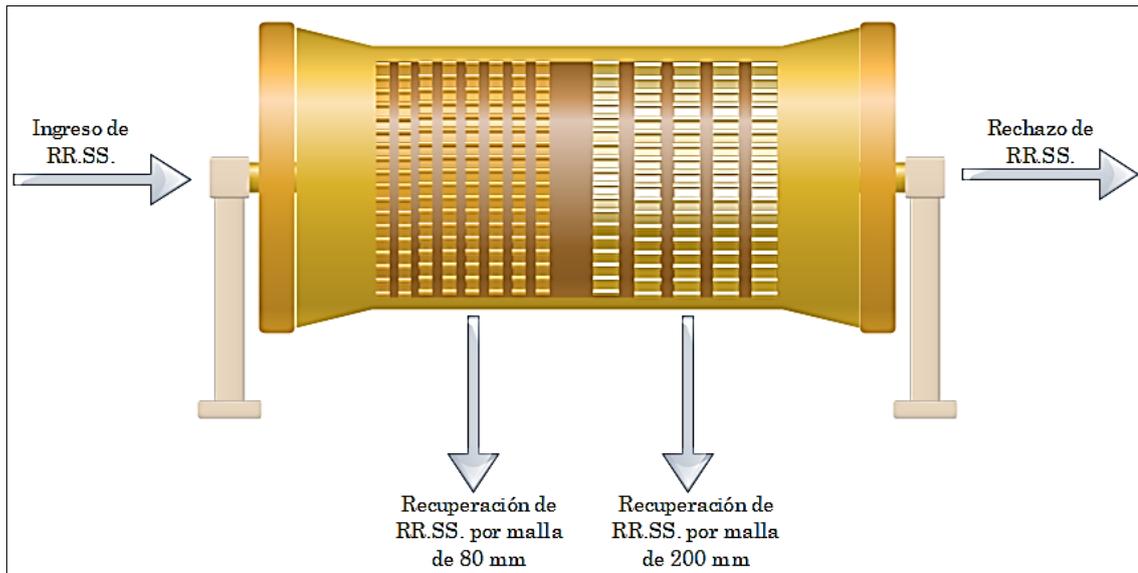


Figura 2

Diseño de trómel combinado

Fuente: Huaccha (2017)

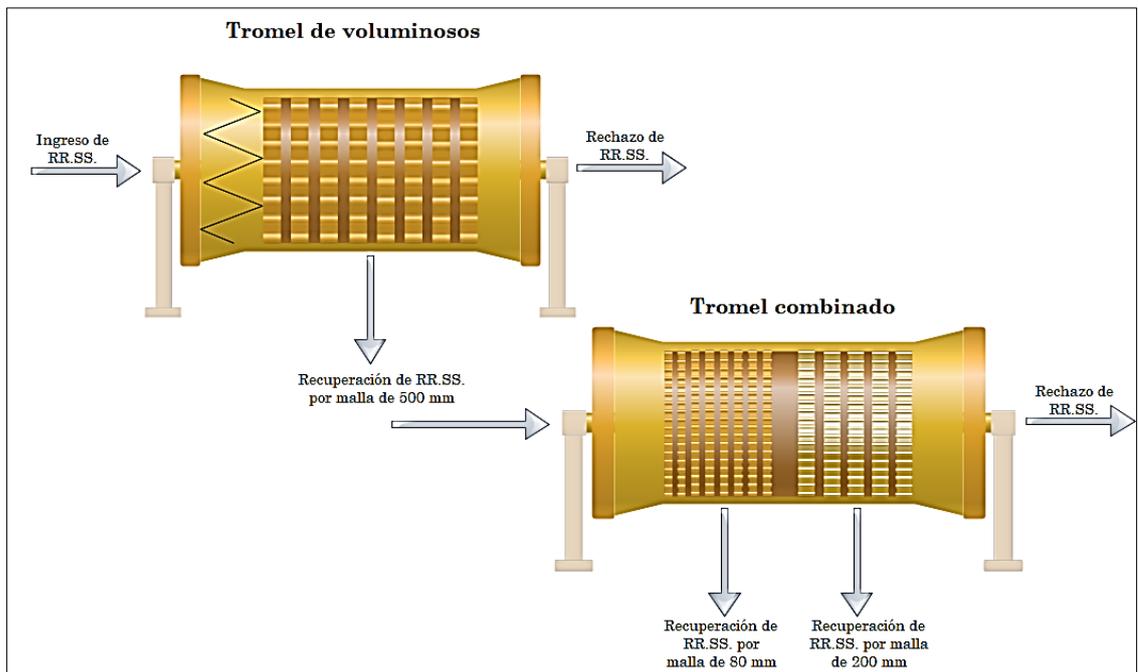


Figura 3

Líneas de entrada y de salida de las operaciones mecánicas de separación de RRSS

Fuente: Huaccha (2017)

Balance de materia

✓ Separación manual

☞ Separación de RRSS monstruos

Ingreso de RRSS generados = RRSS monstruos + RRSS no monstruos

✓ Separación mecánica

☞ RRSS operados en el trómel de voluminosos

Ingreso de RRSS no monstruos = Recuperación de RRSS por malla de 500 mm + Rechazo de RRSS

☞ RRSS operados en el trómel combinado

Recuperación de RRSS por malla de 500 mm = Recuperación de RRSS por malla de 80 mm + Recuperación de RRSS por malla de 200 mm + Rechazo de RRSS

Solución

- **Cálculo de monstruos recuperados (Kg) mediante su separación manual previo al ingreso de los RRSS en el rompe bolsas**

Tabla 15

RRSS monstruos recuperados en separación manual

| Componente | Componentes que entran a la IRM | RRSS monstruos recuperados | | RRSS no monstruos |
|------------------|---------------------------------|----------------------------|-------|-------------------|
| | (Kg) | (%) | (Kg) | (Kg) |
| Restos de comida | 8,450.0 | 0.0 | 0.0 | 8,450.0 |
| Papel | 17,160.0 | 0.0 | 0.0 | 17,160.0 |
| Cartón | 3,491.8 | 20.0 | 698.4 | 2,793.4 |
| Plásticos | 5,248.8 | 0.0 | 0.0 | 5,248.8 |
| Tejidos | 1,170.0 | 50.0 | 585.0 | 585.0 |
| Gomas | 260.0 | 0.0 | 0.0 | 260.0 |

| | | | | |
|-------------------------|-----------------|----------|----------------|-----------------|
| Cuero | 260.0 | 0.0 | 0.0 | 260.0 |
| Residuos de jardín | 7,800.0 | 0.0 | 0.0 | 7,800.0 |
| Madera | 1,170.0 | 70.0 | 819.0 | 351.0 |
| Vidrio | 7,098.0 | 0.0 | 0.0 | 7,098.0 |
| Latas | 2,567.5 | 0.0 | 0.0 | 2,567.5 |
| Aluminio | 977.6 | 0.0 | 0.0 | 977.6 |
| Otros metales | 1,950.0 | 0.0 | 0.0 | 1,950.0 |
| Suciedad, cenizas, etc. | 1,755.0 | 0.0 | 0.0 | 1,755.0 |
| Total | 59,358.7 | - | 2,102.4 | 57,256.3 |

➤ **Balance de materia de las cantidades de RRSS que son operadas en la separación manual**

☞ Separación de RRSS monstruos

$$\begin{array}{rcccl}
 \text{Ingreso de RRSS} & = & \text{RRSS} & + & \text{RRSS no} \\
 \text{generados} & & \text{monstruos} & & \text{monstruos} \\
 \\
 59,358.7 & = & 2,102.4 & + & 57,256.3
 \end{array}$$

➤ **Cálculo de RRSS que son operados por el trómel de voluminosos, considerando el rendimiento de separación según**

➤ **Tabla 13**

Tabla 16

RRSS operados por el trómel de voluminosos

Respuesta 1

| Componente | Ingreso de RRSS | | Recuperación de RRSS por el hundido de la malla de 500 mm | | Rechazo de RRSS | |
|------------------|-----------------|-------|---|-------|-----------------|------|
| | (Kg) | (%) | (Kg) | (%) | (Kg) | (%) |
| Restos de comida | 8,450.0 | 100.0 | 8,450.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 |
| Papel | 17,160.0 | 85.0 | 14,586.0 | 85.0 | 2,574.0 | 15.0 |
| Cartón | 2,793.4 | 85.0 | 2,374.4 | 85.0 | 419.0 | 15.0 |
| Plásticos | 5,248.8 | 90.0 | 4,723.9 | 90.0 | 524.9 | 10.0 |
| Tejidos | 585.0 | 100.0 | 585.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 |
| Gomas | 260.0 | 100.0 | 260.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 |
| Cuero | 260.0 | 100.0 | 260.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 |

| | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-----------------|----------------|--------------|
| Residuos de jardín | 7,800.0 | 95.0 | 7,410.0 | 390.0 | 9.9 |
| Madera | 351.0 | 95.0 | 333.5 | 17.6 | 0.4 |
| Vidrio | 7,098.0 | 100.0 | 7,098.0 | 0.0 | 0.0 |
| Latas | 2,567.5 | 100.0 | 2,567.5 | 0.0 | 0.0 |
| Aluminio | 977.6 | 100.0 | 977.6 | 0.0 | 0.0 |
| Otros metales | 1,950.0 | 100.0 | 1,950.0 | 0.0 | 0.0 |
| Suciedad, cenizas, etc. | 1,755.0 | 100.0 | 1,755.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total | 57,256.3 | - | 53,330.8 | 3,925.4 | 100.0 |

➤ **Cálculo de RRSS que son operados por el trómel combinado, considerando el rendimiento de separación**

Tabla 17

RRSS operados en el trómel combinado

| Componente | Ingreso de RRSS | Recuperación de RRSS en malla de 80 mm | | Recuperación de RRSS en malla de 200 mm | | | Rechazo de RRSS (no recuperado) | |
|-------------------------|-----------------|--|-----------------|---|----------|-----------------|---------------------------------|--------------|
| | (Kg) | (%) | (Kg) | Ingreso (Kg) | (%) | (Kg) | (Kg) | (%) |
| Restos de comida | 8,450.0 | 98.0 | 8,281.0 | 169.0 | 2.0 | 3.4 | 165.6 | 1.2 |
| Papel | 14,586.0 | 20.0 | 2,917.2 | 11,668.8 | 40.0 | 4,667.5 | 7,001.3 | 49.1 |
| Cartón | 2,374.4 | 20.0 | 474.9 | 1,899.5 | 40.0 | 759.8 | 1,139.7 | 8.0 |
| Plásticos | 4,723.9 | 10.0 | 472.4 | 4,251.5 | 80.0 | 3,401.2 | 850.3 | 6.0 |
| Tejidos | 585.0 | 15.0 | 87.8 | 497.3 | 70.0 | 348.1 | 149.2 | 1.0 |
| Gomas | 260.0 | 15.0 | 39.0 | 221.0 | 70.0 | 154.7 | 66.3 | 0.5 |
| Cuero | 260.0 | 15.0 | 39.0 | 221.0 | 70.0 | 154.7 | 66.3 | 0.5 |
| Residuos de jardín | 7,410.0 | 40.0 | 2,964.0 | 4,446.0 | 50.0 | 2,223.0 | 2,223.0 | 15.6 |
| Madera | 333.5 | 20.0 | 66.7 | 266.8 | 50.0 | 133.4 | 133.4 | 0.9 |
| Vidrio | 7,098.0 | 15.0 | 1,064.7 | 6,033.3 | 80.0 | 4,826.6 | 1,206.7 | 8.5 |
| Latas | 2,567.5 | 15.0 | 385.1 | 2,182.4 | 75.0 | 1,636.8 | 545.6 | 3.8 |
| Aluminio | 977.6 | 15.0 | 146.6 | 831.0 | 75.0 | 623.2 | 207.7 | 1.5 |
| Otros metales | 1,950.0 | 15.0 | 292.5 | 1,657.5 | 75.0 | 1,243.1 | 414.4 | 2.9 |
| Suciedad, cenizas, etc. | 1,755.0 | 95.0 | 1,667.3 | 87.8 | 5.0 | 4.4 | 83.4 | 0.6 |
| Total | 53,330.8 | - | 18,898.1 | 34,432.7 | - | 20,179.9 | 14,252.8 | 100.0 |

➤ **Balance de materia, de las cantidades de RRSS que son operadas en la separación mecánica**

☞ RRSS operados en el trómel de voluminosos.

$$\begin{array}{rclcl}
 \text{Ingreso de RRSS} & = & \text{Recuperación de RRSS} & + & \text{Rechazo de} \\
 \text{no monstruos} & & \text{por malla de 500 mm} & & \text{RRSS} \\
 \\
 57,256.3 & = & 53,330.8 & + & 3,925.4
 \end{array}$$

☞ RRSS operados en el trómel combinado.

$$\begin{array}{rclclcl}
 \text{Recuperación de} & & \text{Recuperación de} & & \text{Recuperación de} & & \text{Rechazo} \\
 \text{RRSS por malla} & = & \text{RRSS por malla} & + & \text{RRSS por malla} & + & \text{de RRSS} \\
 \text{de 500 mm} & & \text{de 80 mm} & & \text{de 200 mm} & & \\
 \\
 53,330.8 & = & 18,898.1 & + & 20,179.9 & + & 14,252.8
 \end{array}$$

➤ **Determinación del mínimo de horas que podrían estar trabajando los trómel sin superar su capacidad (rendimiento); considerando que el peso específico bruto de los RRSS es de 130 Kg/m³ y que los trómel trabajan al máximo rendimiento con un factor de relleno de 28 %.**

Nota: Tchobanoglous et al. (1994) señalan que, la criba tipo trómel es la más empleada en la gestión de los RSU. Su diseño está basado en los parámetros: **diámetro**, longitud, **velocidad de rotación**, ángulo de inclinación, tasa de alimentación, rendimiento.

☞ Para el cálculo de diámetro de un trómel se puede aplicar la Ecuación 5 y con ella determinar el rendimiento del trómel, despejando Q_m

☞ Para el cálculo de la velocidad de rotación del trómel (VR) se puede aplicar la Ecuación 6 y Ecuación 7 lo cual está en función a la «velocidad crítica» (VC) la misma que se da cuando los materiales se pegan a la superficie del cribado. Entonces la velocidad óptima se produce cuando los materiales se voltean en un movimiento catarata, esto es cuando los RRSS se conducen parcialmente por la pared interior del tambor para luego caer sobre sí mismos. Idealmente la VR debe

ser el 50 % de la VC para diseños que incluyen placas verticales en el interior y 80 % para casos que no consideren estas placas.

Tabla 18

Datos para el cálculo de horas que pueden trabajar los trómel sin superar su capacidad

| Característica | Trómel de voluminosos | Trómel combinado |
|--|------------------------------|-------------------------|
| Luz de malla (mm) | 500 | 80 – 200 |
| Diámetro (m) | 3.5 | 3 |
| Longitud (m) | 6 | 8 |
| Palas elevadoras | sí | no |
| Fracción de área abierta (%) | 85 | 60 |
| Ángulo de inclinación | 3 ° | 3 ° |
| Velocidad de rotación VR (rpm) | 10 | 18 |
| Peso específico bruto de los residuos (Kg/m ³) | | 130.00 |
| Factor de relleno | | 0.28 |
| Factor de corrección de velocidad; $\alpha = 3$ | | 1.35 |
| Gravedad (m/s ²) | | 9.81 |
| Tangente de ϕ | | 0.052 |

En la Ecuación 5 se despeja y calcula el rendimiento del trómel (Q_m) en Kg/s y Kg/día reemplazando según corresponda. Con este resultado, se calcula el mínimo de horas que podrían estar trabajando los trómel sin superar su rendimiento.

Tabla 19

Mínimo de horas que puede trabajar el trómel sin superar su rendimiento (Q_m)

| Ítem | Trómel de voluminosos | Trómel combinado |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|
| Q_m : Rendimiento del trómel | 16.27 Kg/s 1,405,744.73 Kg/día | 11.07 Kg/s 956,179.64 Kg/día |
| Q_d : RRSS que ingresan diariamente al trómel para su separación por tamaño | 57,256.29 Kg/día | 53,330.85 Kg/día |
| Mínimo de horas (Q_d/Q_m) que podría estar trabajando el trómel sin superar su Q_m | 0.98 horas | 1.34 horas |

Respuesta 2

- **Comprobación de la velocidad de rotación (VR) de cada trómel según las características de diseño y considerando la Ecuación 6 y la Ecuación 7**

Tabla 20

Velocidad de rotación de los trómeles

| Ítem | Trómel de voluminosos | Trómel combinado |
|--|------------------------------|-------------------------|
| K: factor de corrección de velocidad que depende del ángulo de inclinación y va de 0.5 – 0.8 | 0.5 | 0.8 |
| VC: Velocidad de rotación del trómel | 0.38 rps 22.61 rpm | 0.41 rps 24.42 rpm |
| VR: Velocidad de rotación (máxima) del trómel | 11.30 rpm | 19.54 rpm |
| VR de trabajo actual del trómel | 10 rpm | 18 rpm |

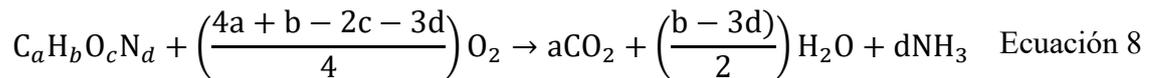
Las velocidades de los 2 trómeles (10 y 18 rpm) son adecuadas.


Respuesta 3

Problema 4

Es importante conocer la composición química de los componentes que conforman los RRSS con el objetivo de evaluar la selección de alguna técnica de procesamiento y recuperación.

Sabiendo que la reacción de oxidación completa de los residuos biodegradables es:



Determinar la cantidad de aire requerida para compostar 1,000 Kg de residuos utilizando un sistema de compostaje en reactor con aire forzado o en pila estática.

Suponer que la composición de la fracción orgánica biodegradable de los RSU es: $C_{60}H_{94.3}O_{37.8}N_1$

Además, considerar que se aplican las siguientes condiciones y datos:

1. Contenido en humedad de los residuos: 25 %.
2. El 93 % de los residuos sólidos totales son volátiles.
3. El 60 % de los sólidos volátiles son biodegradables.
4. Eficacia esperada de oxidación de los sólidos volátiles biodegradable: 95 %.

Datos:

- El aire contiene el 23 % de O_2 en masa
- El peso específico del aire es 1.202 Kg/m^3

Solución

➤ Cálculo de Kg de residuos que se degradarían según la eficacia de oxidación

Se sabe que son 1,000 Kg de residuos a compostar y considerando que el contenido de humedad es del 25 %, se debe determinar los Kg de residuos en base seca (RRSS_{BS} = sólidos totales, ST), a través de la Ecuación 9.

$$RRSS_{BS} = 1,000 \text{ Kg de residuos} - \left(1,000 \text{ Kg de RRSS} \times \frac{25}{100} \text{ de humedad} \right)$$

$$RRSS_{BS} = 750 \text{ Kg de ST}$$

Considerando que el 93 % de los ST son sólidos suspendidos volátiles (SSV), se debe determinar los Kg de SSV, mediante la Ecuación 9.

$$SSV = RRSS_{BS} \times \% \text{ humedad} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$SSV = 750 \text{ Kg de ST} \times \frac{93}{100}$$

$$SSV = 697.5 \text{ Kg}$$

Sabiendo que el 60 % de los SSV son sólidos suspendidos volátiles biodegradables (SSVB), se debe determinar los Kg de SSVB, empleando la Ecuación 10.

$$SSVB = SSV \times \% \text{ SSVB} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$SSVB = 697.5 \text{ Kg de SSV} \times \frac{60}{100}$$

$$SSVB = 418.5 \text{ Kg de SSVB}$$

Conociendo que la eficacia esperada de oxidación de los SSVB es del 95 %, se debe calcular los Kg de residuos SSVB que se degradarán, empleando la Ecuación 11.

$$SSVB_{\text{efica}} = SSVB \times \% \text{ de eficacia de oxidación esperada} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$SSVB_{\text{efica}} = 418.5 \text{ Kg de SSVB} \times \frac{95}{100}$$

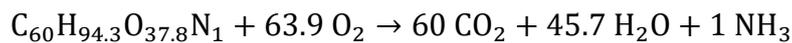
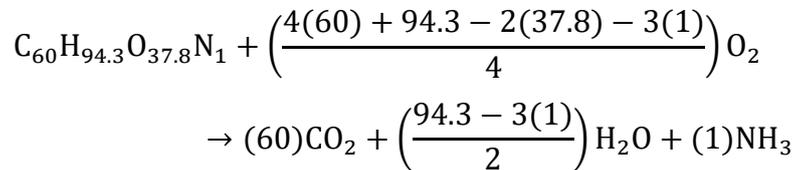
$$SSVB_{\text{efica}} = 397.6 \text{ Kg de SSVB}$$

Con el resultado obtenido, se concluye que, **de los 1,000 Kg de RRSS a compostar, solo 397.6 Kg serán biodegradados** considerando un 95 % de oxidación.

➤ **Estequiometría a la composición química de los RRSS**

Considerando la reacción de oxidación completa de los residuos biodegradables, se realizará el balance estequiométrico en base a los valores de a, b, c y d:

a = 60.0 ; b = 94.3 ; c = 37.8 ; d = 1.0, quedando la reacción



Tenemos que para la reacción de oxidación completa se requieren de 63.9 Kmol de O₂, 60.0 Kmol de CO₂, 45.7 Kmol de H₂O y 1 Kmol de NH₃

➤ **Cálculo del peso molecular (PM) de C₆₀H_{94.3}O_{37.8}N₁**

Se considera el peso atómico del C, H, O y N, siendo: 12, 1, 16, 14 g/mol respectivamente, se calcula el PM:

$$PM = 12 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 60 + 1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 94.3 + 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 37.8 + 14 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 1$$

$$PM = 1,433.1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 1,433.1 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$$

➤ **Cálculo de la cantidad de aire requerido para oxidar los 397.6 Kg de SSVB**

$$n^{\circ} \text{ moles} = \frac{\text{masa}}{\text{PM}}$$

$$n^{\circ} \text{ moles} = \frac{397.6 \text{ Kg SSVB}}{1,433.1 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}}$$

$$n^{\circ} \text{ moles} = 0.2774 \text{ Kmol SSVB}$$

$$0.2774 \text{ Kmol SSVB} \times \frac{63.9 \text{ Kmol O}_2}{1 \text{ Kmol SSVB}} = 17.72 \text{ Kmol O}_2$$

$$17.72 \text{ Kmol O}_2 \times \frac{32 \text{ Kg O}_2}{1 \text{ Kmol O}_2} = 567.34 \text{ Kg O}_2$$

$$567.34 \text{ Kg O}_2 \times \frac{100 \text{ Kg aire}}{23 \text{ Kg O}_2} = 2,466.69 \text{ Kg aire}$$

Considerando que:

$$\text{Densidad } (\rho) \text{ del aire} = \frac{\text{masa del aire}}{\text{volumen del aire}}$$

Ecuación 12

$$\text{Volumen} = \frac{2,466.69 \text{ Kg aire}}{1.202 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Volumen} = 2,052.15 \text{ m}^3 \text{ aire}$$

$$\text{Entonces } \frac{567.34 \text{ Kg O}_2}{397.6 \text{ Kg SSVB}} = 1.43 \text{ Kg } \frac{\text{Kg O}_2}{\text{Kg SSVB}}$$



Se requiere de 2,052.15 m³ de aire para que 567.34 Kg de O₂ oxiden los 397.6 Kg de residuos SSVB

Problema 5

Suponiendo que la ciudad de Chiclayo cuenta con 1 000,000 habitantes y se generan 1.2 Kg de RRSS/hab./día, determinar la vida útil de una celda de relleno sanitario, cuya superficie es de 250,000 m² y su profundidad media es de 17 m, haciendo un total de 4 250,000 m³. Considerar para el cálculo la ausencia y presencia de material de recubrimiento correspondiente al 5 % del volumen del relleno sanitario.

Datos:

- Baja densidad de compactación de residuos: 0.5 t/m³
- Baja densidad de compactación de residuos: 1.2 t/m³

Solución

1. Cálculo de vida útil de celda considerando ausencia de material de recubrimiento

➤ Cálculo del total de kg/día de RRSS generados

Se calcula aplicando la Ecuación 13

$$\text{Total}_{\text{RRSS}} = \text{GPC} \times \text{población} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\text{Total}_{\text{RRSS}} = \frac{1.2 \text{ kg RRSS}}{\text{hab} \times \text{día}} \times 1\,000,000 \text{ hab}$$

$$\text{Total}_{\text{RRSS}} = 1\,200,000 \frac{\text{Kg RRSS}}{\text{día}}$$

➤ Cálculo del total de m³/día de RRSS generados considerando compactación baja = $\frac{0.5 \text{ t}}{\text{m}^3} = \frac{1 \text{ m}^3}{500 \text{ Kg}}$

Se calcula aplicando la Ecuación 14

$$\text{Total}_{\text{RRSS}} = \frac{\text{Kg RRSS}}{\text{día}} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\times \text{compactación baja} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{Kg RRSS}} \right)$$

$$\text{Total}_{\text{RRSS}} = 1\,200,000 \frac{\text{Kg RRSS}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{500 \text{ Kg RRSS}}$$

$$\text{Total}_{\text{RRSS}} = 2,400 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

- **Cálculo del total de m³/día de RRSS generados considerando compactación alta = $1.2 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = \frac{1 \text{ m}^3}{1,200 \text{ Kg}}$**

Se calcula aplicando la Ecuación 15

$$\text{Total}_{\text{RRSS}} = \frac{\text{Kg RRSS}}{\text{día}} \times \text{compactación alta} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{Kg RRSS}} \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\text{Total}_{\text{RRSS}} = 1\,200,000 \frac{\text{Kg RRSS}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1,200 \text{ Kg RRSS}}$$

$$\text{Total}_{\text{RRSS}} = 1,000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

- **Cálculo de vida útil de una celda de relleno sanitario considerando compactación baja**

Se calcula aplicando la Ecuación 16

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = \frac{\text{Volumen relleno sanit (m}^3\text{)}}{\text{Total RRSS}_{\text{compact baja}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) \times 365 \left(\frac{\text{días}}{\text{año}} \right)} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = \frac{4\,250,000 \text{ m}^3}{2,400 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}}$$

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = 4.9 \text{ años}$$

➤ **Cálculo de vida útil de una celda de relleno sanitario considerando compactación alta**

Se calcula aplicando la Ecuación 17:

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = \frac{\text{Volumen}_{\text{relleno sanit}} (\text{m}^3)}{\text{Total RRSS}_{\text{compact alta}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) \times 365 \left(\frac{\text{días}}{\text{año}}\right)} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = \frac{4\,250,000 \text{ m}^3}{1,000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}}$$

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = 11.6 \text{ años}$$



La vida útil de la celda del relleno sanitario **sin material de recubrimiento** es de **4.9 años** si se compactan a 500 Kg RRSS/m³, o **11.6 años** si se compactan a 1,200 Kg RRSS/m³

2. **Cálculo de vida útil de celda considerando presencia de material de recubrimiento**

➤ **Cálculo del volumen que ocuparía el material de recubrimiento (V_{mr})**

Se calcula aplicando la Ecuación 18

$$V_{\text{mr}} = V_{\text{relleno sanit}} (\text{m}^3) \times 5\% \quad \text{Ecuación 18}$$

$$V_{\text{mr}} = 4\,250,000 \text{ m}^3 \times 0.05$$

$$V_{\text{mr}} = 212,500 \text{ m}^3$$

➤ **Cálculo del volumen disponible en el relleno sanitario considerando el volumen ocupado por el material recubrimiento (V_{mr})**

Se calcula aplicando la Ecuación 19

$$V_{\text{disponible}} = V_{\text{relleno sanit}} (\text{m}^3) - V_{\text{mr}} (\text{m}^3) \quad \text{Ecuación 19}$$

$$V_{\text{disponible}} = 4\,250,000 \text{ m}^3 - 212,500 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{disponible}} = 4\,037,500 \text{ m}^3$$

- **Cálculo de vida útil de una celda de relleno sanitario considerando compactación baja = 0.5 t/m³**

Se calcula aplicando la Ecuación 20

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} \qquad \qquad \qquad \text{Ecuación 20}$$

$$= \frac{V_{\text{disponible}} (\text{m}^3)}{\text{Total RRSS}_{\text{compact baja}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) \times 365 \left(\frac{\text{días}}{\text{año}}\right)}$$

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = \frac{4\,037,500 \text{ m}^3}{2,400 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}}$$

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = 4.6 \text{ años}$$

- **Cálculo de vida útil de una celda de relleno sanitario considerando compactación alta = 1.2 t/m³**

Se calcula aplicando la Ecuación 21.

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = \frac{V_{\text{disponible}} (\text{m}^3)}{\text{Total RRSS}_{\text{compact alta}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) \times 365 \left(\frac{\text{días}}{\text{año}}\right)} \qquad \qquad \qquad \text{Ecuación 21}$$

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = \frac{4\,037,500 \text{ m}^3}{1,000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}}$$

$$\text{Vida útil}_{\text{relleno sanit}} = 11.1 \text{ años}$$



La vida útil de la celda del relleno sanitario **con material de recubrimiento** es de **4.6 años** si se compactan 500 Kg RRSS/m³, o **11.1 años** si se compactan 1,200 Kg RRSS/m³

Problema 6

Una localidad con 150,000 habitantes desea ubicar una planta de reciclaje incluyendo una planta de compostaje mecánica. Sin embargo la población estacional es de 20,000 habitantes durante los meses de junio, julio, agosto en relación al periodo de compra y venta de café-cacao.

En esta ciudad la generación per cápita (GPC) de RRSS es de 1.2 Kg /hab./día, además la composición física y humedad se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21

RRSS generados en la ciudad de Jaén y su humedad

| Residuos | Peso fresco (%) | Humedad (%) |
|--------------------|------------------------|--------------------|
| Restos de comida | 30 | 75 |
| Papel-cartón | 20 | 25 |
| Plásticos | 10 | 5 |
| Vidrio | 10 | 0 |
| Cuero | 2 | 10 |
| Residuos de jardín | 15 | 60 |
| Madera | 3 | 20 |
| Metales | 2 | 0 |
| Otros | 8 | 30 |

Considerar además que al inicio de las actividades en la planta de reciclaje, el 60 % de otros se separa (voluminosos) antes de pasar por el trómel; por el hundido del trómel (línea de materia orgánica) pasa el 98 % de los restos de comida, 50 % del papel-cartón, 60 % de los residuos de jardín y madera y, un 20 % de plásticos, vidrio y cuero. En la línea de rechazos procedente del trómel se recupera mediante triaje manual el 60 % de los residuos de papel-cartón y plásticos, un 20 % de vidrio y el 100 % de los metales. El resto, junto con el 60 % de otros (separación de voluminosos), se embala para ser trasladado al relleno sanitario de rechazos.

Determinar:

1. Humedad (Kg) de los residuos brutos frescos

2. Humedad (Kg) de los residuos que pasan por el hundido de trómel
3. Porcentaje de residuos reciclados
4. Porcentaje de rechazos generados en la planta de reciclaje
5. Calcular la superficie necesaria para compostar los RRSS de la línea de materia orgánica (MO) del hundido del trómel, considerando:
 - Densidad de hileras = 50 Kg RRSS orgánicos/m³
 - Relación C/N de RRSS orgánicos a compostar es de 40/1
 - Material disponible (pajilla de arroz) para conseguir relación C/N = 30/1 ; 0.7 t pajilla/t RRSS orgánicos a compostar
 - Base de hilera = 4 m
 - Largo de hilera = 100 m
 - Altura de hilera = 2 m
 - Distancia entre hileras para operación de maquinarias = 4 m

Solución

En base a 100 Kg de RRSS, se calculará la humedad y las líneas de entrada - salida en triaje, trómel y recuperación.

- **Cálculo de Kg de humedad contenido en 100 Kg RRSS frescos que ingresan a la planta de reciclaje**

Tabla 22

Humedad en RRSS frescos que ingresan a planta de reciclaje

| Residuos | Peso fresco | Humedad | |
|--------------------|-------------|----------|-------------|
| | (%) | (%) | (Kg) |
| Restos de comida | 30 | 75 | 22.5 |
| Papel-cartón | 20 | 25 | 5 |
| Plásticos | 10 | 5 | 0.5 |
| Vidrio | 10 | 0 | 0 |
| Cuero | 2 | 10 | 0.2 |
| Residuos de jardín | 15 | 60 | 9 |
| Madera | 3 | 20 | 0.6 |
| Metales | 2 | 0 | 0 |
| Otros | 8 | 30 | 2.4 |
| Total (Kg) | 100 | - | 40.2 |

Respuesta 1

Del 100 % de RRSS, **40.2 %** es humedad.

- **Cálculo de RRSS que ingresan, se separan y son rechazados en la etapa de triaje**

Tabla 23

RRSS que ingresan, separan y se rechazan en la etapa de triaje

| Residuos | Entrada (Kg) | Triaje | | |
|--------------------|-----------------|-------------------|------------|-----------------|
| | | Separación (%) | (Kg) | Rechazo (Kg) |
| Restos de comida | 30 | 0 | 0 | 30 |
| Papel-cartón | 20 | 0 | 0 | 20 |
| Plásticos | 10 | 0 | 0 | 10 |
| Vidrio | 10 | 0 | 0 | 10 |
| Cuero | 2 | 0 | 0 | 2 |
| Residuos de jardín | 15 | 0 | 0 | 15 |
| Madera | 3 | 0 | 0 | 3 |
| Metales | 2 | 0 | 0 | 2 |
| Otros | 8 | 60 | 4.8 | 3.2 |
| Total (Kg) | 100 | - | 4.8 | 95.2 |

- Cálculo de Kg de RRSS que se separan por el hundido del trómel (línea de materia orgánica) y cálculo de Kg de RRSS que se rechazan en el trómel

Tabla 24

RRSS separados en el hundido y en el rechazo del trómel

| Residuos | Entrada (Kg) | Trómel | | |
|--------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| | | Línea de materia orgánica (%) | Línea de materia orgánica (Kg) | Línea de rechazo (Kg) |
| Restos de comida | 30 | 98 | 29.4 | 0.6 |
| Papel-cartón | 20 | 50 | 10 | 10 |
| Plásticos | 10 | 20 | 2 | 8 |
| Vidrio | 10 | 20 | 2 | 8 |
| Cuero | 2 | 20 | 0.4 | 1.6 |
| Residuos de jardín | 15 | 60 | 9 | 6 |
| Madera | 3 | 60 | 1.8 | 1.2 |
| Metales | 2 | 0 | 0 | 2 |
| Otros | 3.2 | 0 | 0 | 3.2 |
| Total (Kg) | 95.2 | - | 54.6 | 40.6 |



La humedad contenida en el hundido del trómel se obtiene restando los 54.6 Kg de la línea de materia orgánica a los 95.2 Kg de RRSS que ingresan al trómel, siendo el resultado: **40.6 Kg o 40.6 %**

- Cálculo de Kg de RRSS reciclados y rechazados en la línea de recuperados

Tabla 25

RRSS reciclados y rechazados en la línea de recuperados

| Residuos | Entrada (Kg) | Recuperación | | |
|--------------------|-----------------|---------------|----------------|-------------------------------------|
| | | Reciclado (%) | Reciclado (Kg) | Rechazados a relleno sanitario (Kg) |
| Restos de comida | 0.6 | 0 | 0 | 0.6 |
| Papel-cartón | 10 | 60 | 6 | 4 |
| Plásticos | 8 | 60 | 4.8 | 3.2 |
| Vidrio | 8 | 20 | 1.6 | 6.4 |
| Cuero | 1.6 | 0 | 0 | 1.6 |
| Residuos de jardín | 6 | 0 | 0 | 6 |

| | | | | |
|-------------------|-------------|----------|-------------|----------------|
| Madera | 1.2 | 0 | 0 | 1.2 |
| Metales | 2 | 100 | 2 | 0 |
| Otros | 3.2 | 0 | 0 | 8 ¹ |
| Total (Kg) | 40.6 | - | 14.4 | 31 |

Respuesta 3

Respuesta 4

Del 100 % de RRSS, el **31 %** es considerado rechazo para relleno sanitario.

Del 100 % de RRSS, el **14.4 %** es considerado para reciclaje.

¹ Considerar que la fracción de RRSS “otros” que se trasladan a relleno sanitario son: 3.2 Kg + 4.8 Kg separados en triaje (voluminosos), haciendo un total de 8 Kg.

➤ **Diseño del flujo de los RRSS en las tres etapas de la planta de reciclaje: triaje, trómel y recuperación**

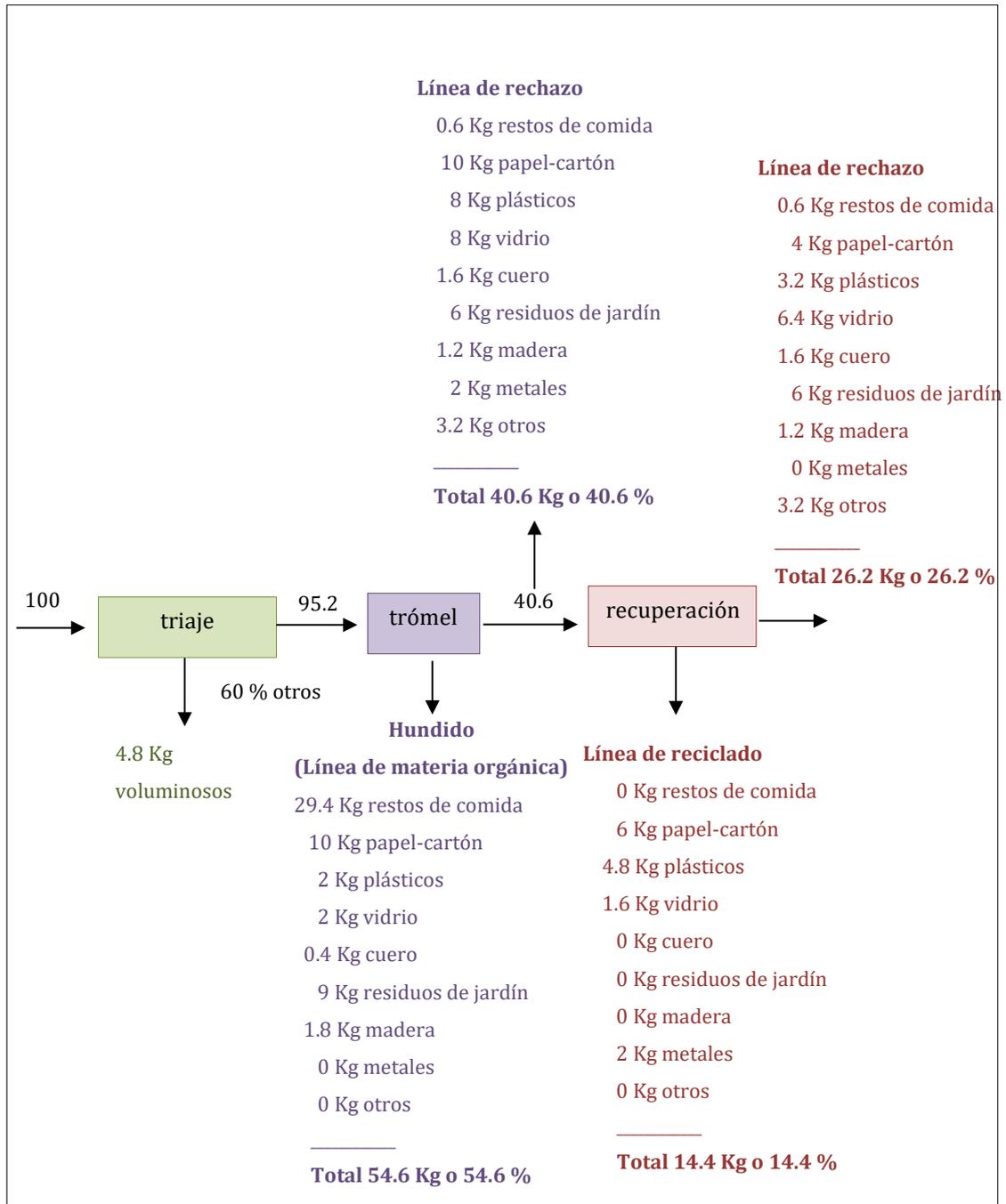


Figura 4

Flujo de los RRSS en las tres etapas de la planta de reciclaje

Balance de materia de cada etapa de la planta de reciclaje:

- Triaje : 100 Kg RRSS = (4.8 + 95.2) Kg RRSS
- Trómel : 95.2 Kg RRSS = (54.6 + 40.6) Kg RRSS
- Recuperación : 40.6 Kg RRSS = (14.4 + 26.2) Kg RRSS

➤ **Para el cálculo de la superficie necesario para compostar los RRSS que pasan por el hundido del trómel (línea de materia orgánica), es necesario calcular los RRSS generados en temporada baja y alta**

Cálculo de RRSS (t) generados por los 150,000 habitantes en 9 meses

Se calcula aplicando la Ecuación 22

$$RRSS_{t/tempor\ baja} = \text{habitantes} \times GPC \left(\frac{\text{Kg}}{\text{hab} \times \text{día}} \right) \times 9 \text{ meses} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$RRSS_{t/tempor\ baja} = 150,000 \text{ hab} \times \frac{1.2 \text{ Kg}}{\text{hab} \times \text{día}} \times \frac{1 \text{ t}}{1,000 \text{ kg}} \times \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \times 9 \text{ meses}$$

$$RRSS_{t/tempor\ baja} = 48,600 \text{ t}$$

Cálculo de RRSS generados por los 170,000 habitantes (150,000 + 20,000) en 3 meses

Se calcula aplicando la Ecuación 23

$$RRSS_{t/tempor\ alta} = \text{habitantes} \times GPC \left(\frac{\text{Kg}}{\text{hab} \times \text{día}} \right) \times 3 \text{ meses} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$RRSS_{t/tempor\ alta} = 170,000 \text{ hab} \times \frac{1.2 \text{ Kg RRSS}}{\text{hab} \times \text{día}} \times \frac{1 \text{ t}}{1,000 \text{ kg}} \times \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \times 3 \text{ meses}$$

$$RRSS_{t/tempor\ alta} = 18,360 \text{ t RRSS}$$

Cálculo del total de RRSS generados al año

Se calcula sumando el resultado de la Ecuación 22 y la Ecuación 23 (temporada baja y temporada baja)

$$\text{RRSS}_{t/\text{año}} = 48,600 \text{ t RRSS} + 18,360 \text{ t RRSS} = 66,960 \text{ t RRSS/año}$$

Cálculo de RRSS a compostar

Tomando en cuenta que existe temporada alta de habitantes en junio, julio y agosto (tres meses), es conveniente trabajar con la mayor generación de RRSS para evitar problemas de colapso en la compostera (RRSS generados por los 170,000 habitantes=18,360 t)

Considerando los RRSS de la línea de materia orgánica (54.6 %), se calcula el total de RRSS a compostar, aplicando la Ecuación 24

$$\text{RRSS a compostar} = \text{RRSS generados (t)} \times \text{RRSS de línea de materia org. (\%)}$$

Ecuación 24

$$\text{RRSS a compostar} = 18,360 \text{ t} \times \frac{54.6}{100}$$

$$\text{RRSS a compostar} = 10,024.56 \text{ t}$$

Según dato del problema, los RRSS a compostar cuentan con una relación C/N = 40/1, siendo necesario agregar algún material que permita corregir la relación C/N de 40/1 a 30/1. Como dato del problema se cuenta con 0.7 t de pajilla/t RRSS orgánicos, siendo necesario aplicar la Ecuación 25

Mezcla a compostar

$$= \text{RRSS a compostar (t)} + \left(\text{RRSS a compostar} \times \frac{0.7 \text{ t pajilla de arroz}}{\text{t RRSS a compostar}} \right)$$

Ecuación 25

$$\text{Mezcla a compostar} = 10,024.56 \text{ t} + (10,024.56 \text{ t} \times 0.7 \text{ t pajilla arroz})$$

$$\text{Mezcla a compostar} = 17,041.75 \text{ t}$$

Cálculo de volumen de mezcla de RRSS a compostar en hileras a través de la Ecuación 26

$$\text{Volumen de mezcla a compostar} = \frac{\text{masa (t)}}{\text{densidad} \left(\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right)} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\text{Volumen de mezcla a compostar} = \frac{17,041.75 \text{ t}}{0.5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Volumen de mezcla a compostar} = 34,083.50 \text{ m}^3$$

Cálculo del volumen de la hilera de compostaje

Considerando que la hilera de compostaje tiene forma de prisma triangular (ver Figura 5) y que el problema indica sus dimensiones; el volumen se calcula mediante la Ecuación 27

$$\text{Volumen hilera} = \frac{(\text{base} \times \text{largo} \times \text{altura}) \text{ m}^3}{2} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\text{Volumen hilera} = \frac{(4 \times 100 \times 2) \text{ m}^3}{2}$$

$$\text{Volumen hilera} = 400 \text{ m}^3$$

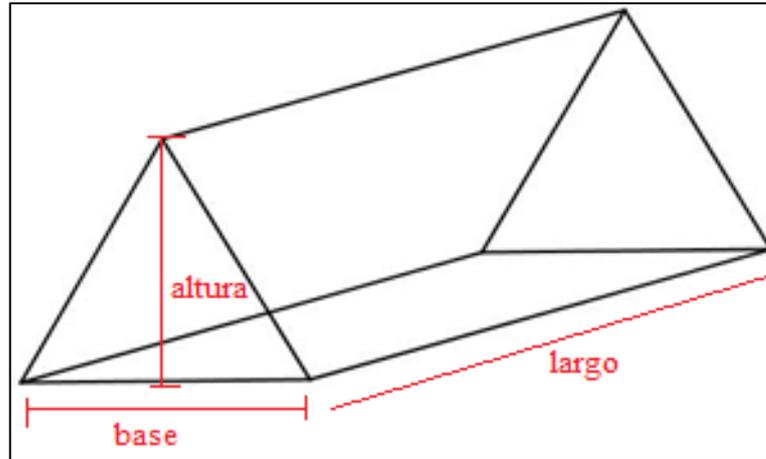


Figura 5

Forma prisma triangular de hilera de compostaje

Cálculo de número de hileras de compostaje mediante la Ecuación 28

$$\text{N}^{\circ} \text{ hileras} = \frac{\text{Volumen de mezcla a compostar } \text{m}^3}{\text{Volumen hilera } \text{m}^3} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ hileras} = \frac{34,083.50 \text{ m}^3}{400 \text{ m}^3}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ hileras} = 85.21 \cong 86$$

Cálculo de superficie para la planta de compostaje mediante la Ecuación 29

$$\begin{aligned} \text{Superficie} &= \text{N}^{\circ} \text{ hileras} \\ &\quad \times (\text{base hilera} + \text{separación entre hileras}) \\ &\quad \times \text{largo hilera} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$\text{Superficie} = 86 \times (4 \text{ m} + 4 \text{ m}) \times 100 \text{ m}$$

$$\text{Superficie} = 68,800 \text{ m}^2 \quad \leftarrow \text{Respuesta 5}$$

Se requieren $68,800 \text{ m}^2$ para compostar $34,083.50 \text{ m}^3$ de residuos con una relación C/N = 30

Problema 7

La ciudad de Jaén produce aproximadamente 100 toneladas (BH) de excrementos humanos cada día. Estos excrementos tienen una relación C/N de 15, un contenido en sólidos suspendidos totales (SST) del 10 %, con un 90 % de sólidos suspendidos volátiles (SSV), 10 % de sólidos suspendidos no volátiles (SSNV) y una densidad aparente de 1100 Kg/m^3 .

Para compostar estos residuos se pretende utilizar aserrín como material estructurante y corrector de la relación C/N, para ajustarla a 30/1. Las características del aserrín son: relación C/N = 70/1; 40 % de humedad; 0.1 % de N (BS) y densidad aparente de 100 Kg/m^3 (BH).

Determinar:

1. La cantidad de aserrín necesaria, en $\text{m}^3/\text{día}$, para obtener una relación C/N de 30.
2. La humedad de la mezcla obtenida a compostar.

Si se utilizara el método de compostaje en hileras y unos tiempos para la etapa de compostaje de 60 días, determinar:

3. El número de hileras (en forma de prisma triangular) necesarias para el proceso, considerando las siguientes dimensiones: 100 m largo, 4 m base, 2.5 m alto, 4 m separación entre hileras.
4. La superficie necesaria (m^2) para instalar la planta de compostaje.

Solución

Tabla 26

Características de los residuos a compostar

| Ítem | Excrementos humanos (MO) | Aserrín |
|---|--------------------------|---------|
| Masa (t/día) | 100.0 | - |
| Relación C/N en base seca | 15.0 | 70.0 |
| Contenido de N (%) en base seca | - | 0.1 |
| ST (%) | | 70.0 |
| SST (%) | 10.0 | - |
| SSV (%) | 90.0 | - |
| SSNV (%) | 10.0 | - |
| Humedad (%) | 90.0 | 40.0 |
| Densidad aparente en base húmeda (Kg/m ³) | 1100.0 | 100.0 |
| Densidad aparente en base húmeda (t/m ³) | 1.1 | 0.1 |

➤ **Cálculo de C y N para una relación C/N = 70 en el aserrín**

Considerando que en 1 t de aserrín el 40 % es humedad, se tiene:
0.4 t de aserrín en base húmeda y 0.6 t de aserrín en base seca

Sabiendo que la cantidad de N presente en el aserrín es de 0.7 % en base seca, entonces:

$$N = 0.7 \% \times 0.6 \text{ t de aserrín}$$

$$N = 0.0006 \text{ t de aserrín}$$

Para conseguir una relación C/N = 70 , se puede reemplazar el valor de N, quedando:

$$\frac{C}{N} = 70 \ ; \ C = 70 \times 0.0006 \text{ t de aserrín} \ ; \ C = 0.042 \text{ t de aserrín}$$

Entonces en 1 t de aserrín se tiene 0.042 t de C por cada 0.0006 t de N

➤ **Cálculo de C y N con relación C/N = 15 en excrementos humanos (MO)**

Considerando que en 1 t de MO el 90 % es humedad, entonces se tiene: 0.9 t de MO en base húmeda y 0.1 t de MO en base seca

Para conocer el contenido de C y de N presente en la relación C/N =15, se debe calcular el % de C empleando la Ecuación 30

$$\% C = \frac{100 - \% \text{ de residuo calcinado a } 550 \text{ }^{\circ}\text{C}}{1.8} \quad \text{Ecuación 30}$$

Siendo:

$$\% C = \frac{100 - \% \text{ SSNV}}{1.8}$$

$$\% C = \frac{100 - 10}{1.8} = 50$$

Entonces en 0.1 t de MO en base seca, el contenido de C = 0.1 t de MO × 50 = 0.05 t y, conociendo que la relación C/N de la MO es 15; el contenido de N será:

$$\frac{C}{N} = 15 ; N = \frac{C}{15} ; N = \frac{0.05 \text{ t}}{15} = 0.0033 \text{ t}$$

Por lo tanto, en 1 t de MO se tiene 0.05 t de C por cada 0.0033 t de N

➤ **Cálculo de cantidad de aserrín necesaria (m³/día), para que al ser mezclado con 1 t de excrementos, se tenga una relación C/N = 30**

En términos generales, se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material “fresco” para iniciar la digestión anaeróbica, debe ser de 30 unidades de carbono por unidad de nitrógeno, es decir, C/N = 30/1. Por lo tanto, cuando no se tiene un material con la relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptima.

Sobre la base del contenido de carbono y de nitrógeno de cada una de las materias primas, puede calcularse la relación C/N de la mezcla aplicando la Ecuación 31

$$K = \frac{C_1 \times Q_1 + C_2 \times Q_2 + \dots + C_n \times Q_n}{N_1 \times Q_1 + N_2 \times Q_2 + \dots + N_n \times Q_n}$$

Ecuación 31

Donde:

K = C/N de la mezcla de materia prima

C = cantidad de carbono orgánico contenido en cada materia prima

N = cantidad de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima

Q = peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas

$$\frac{C}{N} = 30 = \frac{t_{\text{carbono}} \times t_{\text{aserrín}} + t_{\text{carbono}} \times 1 t_{\text{excr}}}{t_{\text{nitrógeno}} \times t_{\text{aserrín}} + t_{\text{nitrógeno}} \times 1 t_{\text{excr}}}$$

$$30 = \frac{0.042 t_{\text{aserrín}} + 0.05 t_{\text{excr}}}{0.0006 t_{\text{aserrín}} + 0.0033 t_{\text{excr}}}$$

$$30 \times (0.0006 t_{\text{aserrín}} + 0.0033 t_{\text{excr}}) = 0.042 t_{\text{aserrín}} + 0.05 t_{\text{excr}}$$

$$0.018 t_{\text{aserrín}} + 0.1 t_{\text{excr}} = 0.042 t_{\text{aserrín}} + 0.05 t_{\text{excr}}$$

$$0.1 t_{\text{excr}} - 0.05 t_{\text{excr}} = 0.042 t_{\text{aserrín}} - 0.018 t_{\text{aserrín}}$$

$$0.05 t_{\text{excr}} = 0.024 t_{\text{aserrín}}$$

$$t_{\text{excr}} = \frac{0.024}{0.05} t_{\text{aserrín}}$$

$$t_{\text{excr}} = 0.48 t_{\text{aserrín}}$$

Entonces por cada t_{excr} se requiere $0.48 t_{\text{aserrín}}$ para lograr una relación $C/N = 30$

Sin embargo, para obtener la cantidad de aserrín $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right)$ para iniciar el proceso de compostaje, se requiere emplear la masa de excrementos (t/día) y la densidad de ambos materiales a mezclar, siendo:

$$\text{Aserrín total} = \frac{0.48 \text{ t}_{\text{aserrín}}}{1 \text{ t}_{\text{excr}}} \times \frac{100 \text{ t}_{\text{excr}}}{1 \text{ día}}$$

$$\text{Aserrín total} = 48 \frac{\text{t}_{\text{aserrín}}}{\text{día}} \times \text{densidad de aserrín}$$

$$\text{Aserrín total} = 48 \frac{\text{t}_{\text{aserrín}}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{0.1 \text{ t}_{\text{aserrín}}}$$

$$\text{Aserrín total} = 480 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \quad \leftarrow \text{Respuesta 1}$$

➤ **Cálculo de la humedad que contiene la mezcla de residuos a compostar**

Se debe conocer primero la cantidad diaria total de residuos a compostar, para luego calcular las toneladas de humedad del aserrín y de los excrementos según % de humedad indicados en el problema:

$$\text{Residuos a compostar} = (\text{excr} + \text{aserrín}) \text{ t/día}$$

$$\text{Residuos a compostar} = (100 + 48) \frac{\text{t}}{\text{día}} = 148 \frac{\text{t}}{\text{día}}$$

$$\text{Contenido de humedad en aserrín} = 48 \text{ t}_{\text{aserrín}} \times 40 \% \text{ de humedad} = 19.2 \text{ t}_{\text{aserrín}}$$

$$\text{Contenido de humedad en excrementos} = 100 \text{ t}_{\text{excr}} \times 90 \% \text{ de humedad} = 90 \text{ t}_{\text{excr}}$$

$$\text{Contenido de humedad en mezcla} = 19.2 \text{ t} + 90 \text{ t} = 109.2 \text{ t de agua} \quad \leftarrow \text{Respuesta 2}$$

➤ **Cálculo del número de las hileras necesarias para el proceso de compostaje**

Conociendo la densidad de los residuos a compostar, se puede calcular el volumen de la mezcla, el volumen de la hilera de compostaje, siendo:

$$\text{Volumen de aserrín} = 480 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Volumen de excrementos} = 100 \text{ t}_{\text{excr}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.1 \text{ t}_{\text{excr}}} = 90.91 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Volumen de la mezcla} = 570.91 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Volumen de la mezcla en 60 días (tiempo que dura el proceso de compostaje según datos del problema) $= 570.91 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 60 \text{ días} = 34,254.55 \text{ m}^3$ de residuos mezclados

Además, teniendo en cuenta que el proceso de compostaje se realizará en hileras en forma de prisma triangular de 100 m largo, 4 m base, 2.5 m alto y 4 m separación entre hileras, el volumen de cada hilera será igual a:

$$\text{Volumen hilera} = \frac{\text{base} \times \text{largo} \times \text{altura}}{2} = \frac{(4 \times 100 \times 2.5) \text{ m}^3}{2} = 500 \text{ m}^3$$

Con este dato se puede calcular el N° hileras considerando el volumen de la mezcla a compostar y el volumen de la hilera de compostaje, siendo:

$$\text{N}^\circ \text{ de hileras} = \frac{34,254.55 \text{ m}^3}{500 \text{ m}^3} = 68.5 \cong 69$$
 

➤ **Cálculo de superficie necesaria (m²) para instalar la planta de compostaje**

Superficie = 100 m largo × (4 m ancho + 4 m separación) × 69 hileras

$$\text{Superficie} = 55,200 \text{ m}^2$$
 

Problema 8

Una familia de 5 personas necesita 10 m^3 de biogás (metano) para usos familiares diariamente. Determinar:

1. Las necesidades de pajilla de arroz sabiendo que, para una digestión en condiciones óptimas, la relación C/N debería ser de 25 en el alimento al digestor.
2. El rendimiento de la mezcla de residuos iniciales.
3. Los Kg/día de mezcla de residuos en peso seco necesarios para producir los $10 \text{ m}^3/\text{día}$ de metano.
4. Los Kg/día de mezcla de residuos en peso húmedo.
5. El volumen del digestor anaerobio necesario para producir los $10 \text{ m}^3/\text{día}$ de metano a partir de los excrementos humanos y pajilla de arroz.
6. El caudal de residuos mezcla (en peso seco) en el digestor anaerobio considerando un tiempo de retención hidráulica de 30 días.
7. El caudal necesario de residuos mezcla (Q_{mezcla}) en el digestor anaerobio para producir $10 \text{ m}^3/\text{día}$ de metano.
8. El caudal de agua (Q_{agua} en L/día) a añadir en el digestor para asegurar la producción de $10 \text{ m}^3/\text{día}$ de metano.

Tabla 27

Características de la materia prima

| Ítem | Excremento | Pajilla de arroz |
|-------------------------------------|------------|------------------|
| Carbono orgánico (C) (% de ST) | 48 | 43 |
| Nitrógeno Kjeldahl (N) (% de ST) | 4.5 | 0.9 |
| Sólidos volátiles (% de ST) | 86 | 77 |
| Humedad (%) | 82 | 14 |
| Densidad (Kg/m^3) | 1 100 | 100 |

Tabla 28

Datos para el diseño del biogás a partir del rendimiento de materia prima en base al peso seco

| Raw materials | Biogas production per unit weight of dry solids | |
|-------------------|---|--------------------|
| | ft ³ /lb | m ³ /Kg |
| Cow dung | 5.3 | 0.33 |
| Chicken manure | 5.0 | 0.31 |
| Sheep manure | 5.9-9.7 | 0.37-0.61 |
| Forage leaves | 8 | 0.5 |
| Sugar beet leaves | 8 | 0.5 |
| Algae | 5.1 | 0.32 |
| Night soil | 6 | 0.38 |

Fuente: Adaptado de (Council, 1997)

Solución

- **Cálculo de relación paja de arroz/excremento, considerando que la relación C/N debería ser de 25 para alimentar el digestor. Aplicar Ecuación 31**

$$\frac{C}{N} = 25 = \frac{Kg_{\text{carbono}} \times Kg_{\text{pajilla}} + Kg_{\text{carbono}} \times 1 Kg_{\text{excr}}}{Kg_{\text{nitrógeno}} \times Kg_{\text{pajilla}} + Kg_{\text{nitrógeno}} \times 1 Kg_{\text{exc}}}$$

$$25 = \frac{0.43 Kg_{\text{pajilla}} + 0.48 Kg_{\text{excr}}}{0.009 Kg_{\text{pajilla}} + 0.045 Kg_{\text{excr}}}$$

$$25 \times (0.009 Kg_{\text{pajilla}} + 0.045 Kg_{\text{excr}}) = 0.43 Kg_{\text{pajilla}} + 0.48 Kg_{\text{excr}}$$

$$0.225 Kg_{\text{pajilla}} + 1.125 Kg_{\text{excr}} = 0.43 Kg_{\text{pajilla}} + 0.48 Kg_{\text{excr}}$$

$$Kg_{\text{excr}}(1.125 - 0.48) = Kg_{\text{pajilla}}(0.43 - 0.225)$$

$$0.645 Kg_{\text{excr}} = 0.205 Kg_{\text{pajilla}}$$

$$3.15 Kg_{\text{excr}} = 1 Kg_{\text{pajilla}}$$



Por cada Kg de pajilla de arroz es necesario emplear 3.15 Kg de excremento humano para que la mezcla de residuos a compostar tenga una relación C/N =25

- **Cálculo de rendimiento de la mezcla de residuos en peso seco (pajilla + excremento) para producir metano (emplear datos de Tabla 28). Aplicar la Ecuación 32**

$$\text{Rendimiento mezcla} = \frac{\text{Kg}_{\text{pajilla}} \times \text{rendim}_{\text{pajilla}} + \text{Kg}_{\text{excr}} \times \text{rendim}_{\text{excr}}}{\text{Kg}_{\text{pajilla}} + 1 \text{ Kg}_{\text{excr}}} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$\text{Rendimiento mezcla} = \frac{3.146 \text{ Kg}_{\text{pajilla}} \times 0.5 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}_{\text{pajilla}}} + 1 \text{ Kg}_{\text{excr}} \times 0.38 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}_{\text{excr}}}}{3.146 \text{ Kg}_{\text{pajilla}} + 1 \text{ Kg}_{\text{excr}}}$$

$$\text{Rendimiento mezcla} = \frac{1.575 \text{ m}^3 + 0.38 \text{ m}^3}{4.146 \text{ Kg en peso seco}} = \frac{0.47 \text{ m}^3}{1 \text{ Kg en peso seco}}$$

Respuesta 2

- **Cálculo de Kg/día de mezcla de residuos en peso seco necesarios para producir los 10 m³/día de metano que indica el problema**

$$\text{Mezcla de residuos} = \frac{10 \text{ m}^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ Kg en peso seco}}{0.47 \text{ m}^3}$$

$$\text{Mezcla de residuos} = 21.23 \frac{\text{Kg en peso seco}}{\text{día}}$$

Respuesta 3

- **Balance de Kg/día de mezcla en peso seco considerando el valor de sólidos volátiles (SV) del problema**

$$21.23 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} = \text{Kg}_{\text{pajilla}} \times \text{SV}_{\text{pajilla}} + \text{Kg}_{\text{excr}} \times \text{SV}_{\text{excr}} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$21.23 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} = \text{Kg}_{\text{pajilla}} \times 0.77 + \text{Kg}_{\text{excr}} \times 0.86$$

– Reemplazando el valor de $\text{Kg}_{\text{pajilla}} = 3.15 \text{ Kg}_{\text{excr}}$, se tendría:

$$21.23 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} = 3.15 \text{ Kg}_{\text{excr}} \times 0.77 + \text{Kg}_{\text{excr}} \times 0.86$$

$$21.23 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} = \text{Kg}_{\text{excr}}(2.42 + 0.86)$$

$$\text{Kg}_{\text{excr}} = \frac{21.23 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}}{3.28} = 6.47 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$$

– Si, $\text{Kg}_{\text{pajilla}} = 3.15 \text{ Kg}_{\text{excr}}$; entonces $\text{Kg}_{\text{pajilla}} = 6.47 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} \times 3.15 = 20.38 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$

➤ **Balance de Kg/día de mezcla en peso húmedo considerando el % de humedad del problema**

$$\text{Kg}_{\text{excr}} = 6.47 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \frac{100}{100 - 82} = 35.93 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$$



$$\text{Kg}_{\text{pajilla}} = 20.38 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} \times \frac{100}{100 - 14} = 23.69 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$$

➤ **Cálculo del volumen que ocuparía la mezcla de residuos en el biodigestor**

Se tendrá en cuenta los Kg/día de la mezcla de residuos (21.23 Kg/día) y la carga² promedio de sólidos volátiles (SV) en Kg/m³/día para realizar el cálculo del volumen en m³

Entonces el volumen de la mezcla de residuos (V_{mezcla}) será igual a:

$$V_{\text{mezcla}} = \frac{\text{mezcla de residuos } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{día}}\right)}{\text{carga de sólidos volátiles } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3 \times \text{día}}\right)}$$

$$V_{\text{mezcla}} = \frac{21.23 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{día}}\right)}{2.5 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3 \times \text{día}}\right)} = 8.5 \text{ m}^3$$

² La carga orgánica aplicada en los digestores anaerobios alimentadas sólo o principalmente con estiércol varía entre 2 y 3 Kg SV/m³/día (Lobato, 2012)

➤ **Cálculo del volumen del digestor**

Para que el volumen de la mezcla no ocupe la cabeza del digestor, es necesario incrementar³ un 30 % al volumen del digestor, quedando:

$$V_{\text{mezcla}} \quad 8.5 \text{ m}^3 \rightarrow 70 \% \quad \leftarrow \text{Respuesta 5}$$

$$V_{\text{digestor}} \quad X \text{ m}^3 \rightarrow 100 \%$$

$$V_{\text{digestor}} = 12.14 \text{ m}^3$$

➤ **Cálculo del caudal (Q) de residuos mezcla (en peso seco en L/día) en el digestor anaerobio considerando un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 30 días. Aplicar Ecuación 34**

$$Q = \frac{V_{\text{mezcla}}}{\text{TRH}} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$Q = \frac{8.5 \text{ m}^3}{30 \text{ días}} \times \frac{1,000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = 283.33 \frac{\text{L}}{\text{día}} \quad \leftarrow \text{Respuesta 6}$$

➤ **El caudal necesario de residuos mezcla (Q_{mezcla}) en el digestor anaerobio para producir 10 m³/día de metano. Aplicar Ecuación 35**

$$Q_{\text{mezcla}} = \frac{\text{Kg}_{\text{excr}}}{\text{densidad de excr} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)} + \frac{\text{Kg}_{\text{pajilla}}}{\text{densidad de pajilla} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$Q_{\text{mezcla}} = \left(\frac{35.93 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}}{1,100 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)} + \frac{23.69 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}}{100 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)} \right) \times 1,000 \frac{\text{L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$Q_{\text{mezcla}} = 269.56 \frac{\text{L}}{\text{día}} \quad \leftarrow \text{Respuesta 7}$$

³ Investigadores recomiendan que el volumen líquido del digestor ocupe un 70 u 80% del volumen total de éste, dejando la parte restante (30 o 20%) para la parte gaseosa (Martí Herrero, 2011).

- **Cálculo del caudal de agua (L/día) a añadir en el digestor para asegurar la producción de 10 m³/día de metano**

La diferencia del Q de la mezcla en peso seco y el Q de la mezcla en peso húmedo, indica los L/día de agua por añadir al digestor, siendo:

$$Q_{\text{agua}} = (283.33 - 269.56) \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

$$Q_{\text{agua}} = (13.77) \frac{\text{L}}{\text{día}}$$



Problema 9

El material de rechazo generado en una IRM de residuos no peligrosos en España (40,000 t/año), se pretende enviar a un vertedero o también llamado relleno sanitario cuya celda tiene una superficie de 20,000 m² y una profundidad media de 30 m (desde el suelo natural hasta la capa final de cubierta). Los sondeos han determinado que el coeficiente de permeabilidad del terreno (K) es inferior a 1.0×10^{-9} m/s en 8 m. Suponer que el volumen que ocupa el material de recubrimiento diario es del 5 % del volumen ocupado por los residuos y el material de recubrimiento diario. Considerar la densidad de los residuos de 0.5 t/m³.

1. Volumen de barreras total
2. Volumen de residuos más recubrimiento diario
3. Volumen de recubrimiento diario
4. Volumen de residuos
5. Calcular la vida útil de la celda del relleno sanitario

Solución

Considerar el “K” para celdas de vertederos o relleno sanitario para residuos no peligrosos según normativa española (Real Decreto 646/2020, de 7 de julio)⁴:

La base y los lados del vertedero dispondrán de una capa mineral con unas condiciones de permeabilidad y espesor cuyo efecto combinado en materia de protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas superficiales sea por lo menos equivalente al derivado de los requisitos siguientes:

- a) Vertederos para residuos peligrosos: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s y espesor ≥ 5 m.
- b) Vertederos para residuos no peligrosos: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s y espesor ≥ 1 m.

⁴ <https://www.boe.es/boe/dias/2020/07/08/pdfs/BOE-A-2020-7438.pdf>

c) Vertederos para residuos inertes: $k \leq 1.0 \times 10^{-7}$ m/s y espesor ≥ 1 m.

Además se establece en dicha normativa la altura de las barreras de protección mínimas que dispondrán los vertederos debajo y encima de la masa de residuos según la Figura 6 y la Figura 7:

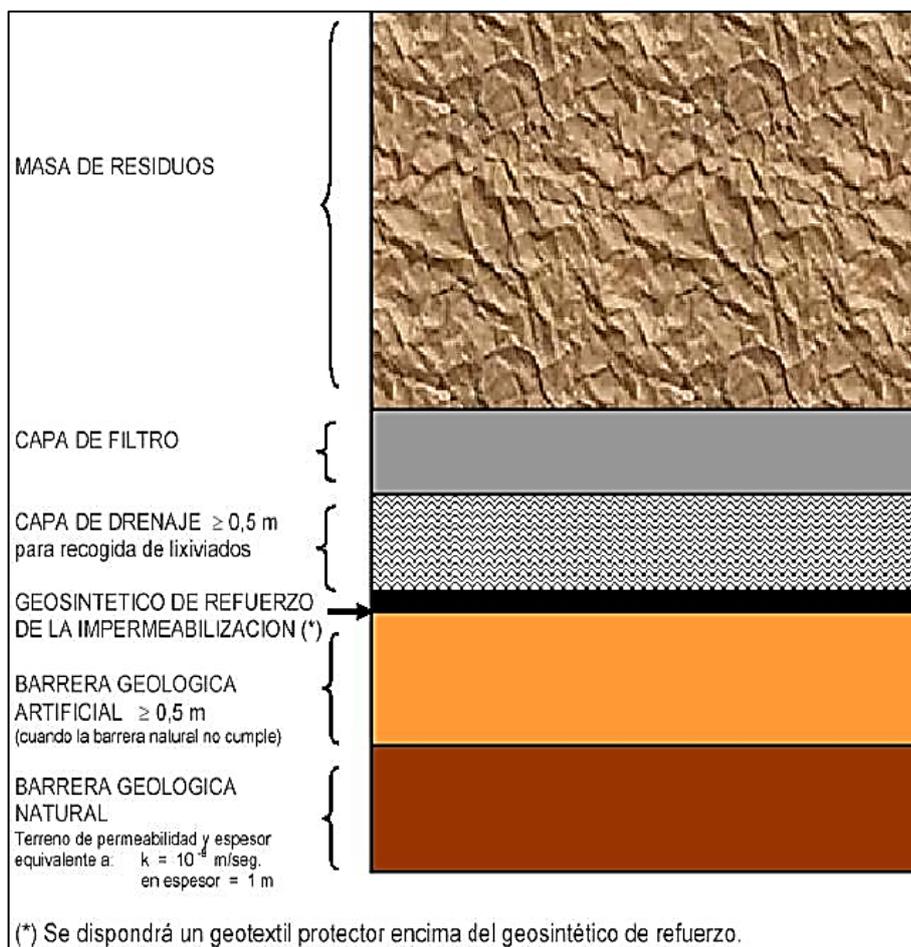


Figura 6

Vertedero de residuos no peligrosos y altura de barreras de protección mínimas debajo de la masa de residuos.

Fuente: Real Decreto 646/2020

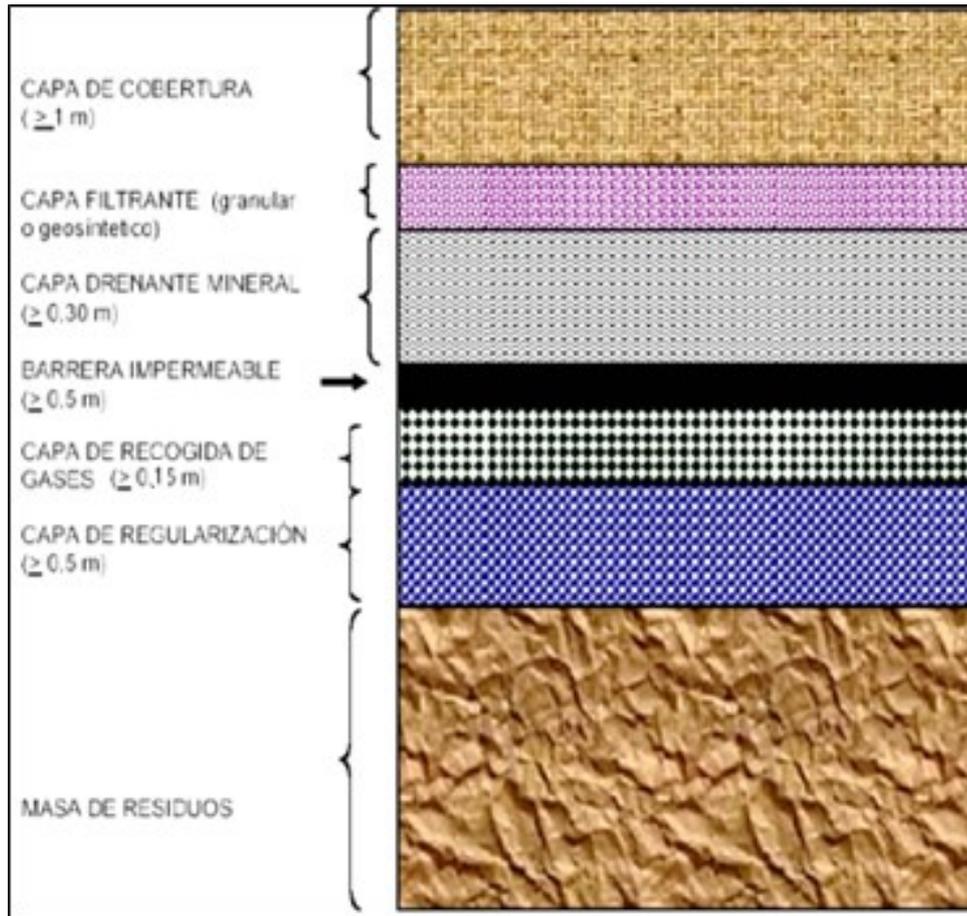


Figura 7

Vertedero de residuos no peligrosos y altura de barreras de protección mínimas encima de la masa de residuos

Fuente: Real Decreto 646/2020

Según dato del problema, $K \leq 1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ y el espesor $\geq 1 \text{ m}$, por lo tanto, cumple con la normativa y no hace falta agregar una barrera geológica artificial ni natural que proteja el suelo y aguas.

➤ **Cálculo del volumen de residuos, considerando:**

- **Volumen de la celda. Aplicar Ecuación 36**

$$V_{\text{celda}} = \text{superficie (m}^2\text{)} \times \text{altura (m)} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$V_{\text{celda}} = 20,000 \text{ m}^2 \times 30 \text{ m} = 60,000 \text{ m}^3$$

- **Volumen de las barreras de protección mínimas debajo de la masa de residuos. Aplicar Ecuación 37**

$$V_{\text{barr debajo}} = \text{superficie (m}^2\text{)} \times (\text{altura barrera debajo residuos})(\text{m}) \quad \text{Ecuación 37}$$

$$V_{\text{barr debajo}} = 20,000 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m} = 10,000 \text{ m}^3$$

- **Volumen de las barreras de protección mínimas encima de la masa de residuos. Aplicar Ecuación 38**

$$V_{\text{barr encima}} = \text{superficie (m}^2\text{)} \times (\text{altura barrera encima residuos})(\text{m}) \quad \text{Ecuación 38}$$

$$V_{\text{barr encima}} = 20,000 \text{ m}^2 \times (1 + 0.3 + 0.5 + 0.15 + 0.5) \text{ m} = 49,000 \text{ m}^3$$

- **Volumen de barreras total. Aplicar Ecuación 39**

$$V_{\text{barr}} = V_{\text{barr debajo}} + V_{\text{barr encima}} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$V_{\text{barr}} = 10,000 \text{ m}^3 + 49,000 \text{ m}^3 = 59,000 \text{ m}^3$$

← Respuesta 1

- **Volumen de residuos más recubrimiento diario. Aplicar Ecuación 40**

$$V_{\text{residuos+recubrim diario}} = V_{\text{celda}} - V_{\text{barr}} \quad \text{Ecuación 40}$$

$$V_{\text{residuos+recubrim diario}} = 60,000 \text{ m}^3 - 59,000 \text{ m}^3 = 541,000 \text{ m}^3$$

↑ Respuesta 2

- **Volumen de recubrimiento diario. Aplicar Ecuación 41**

$$V_{\text{recubrim diario}} = \frac{5}{100} \times V_{\text{residuos+recubrim diario}} \quad \text{Ecuación 41}$$

$$V_{\text{recubrim diario}} = \frac{5}{100} \times 541,000 \text{ m}^3 = 27,050 \text{ m}^3$$

← Respuesta 3

- **Volumen de residuos**

$$V_{\text{residuos}} = V_{\text{residuos+recubrim diario}} - V_{\text{recubrim diario}}$$

$$V_{\text{residuos}} = 541,000 \text{ m}^3 - 27,050 \text{ m}^3 = 513,950 \text{ m}^3$$

 **Respuesta 4**

- **Cálculo de vida útil de la celda del relleno sanitario, considerando la producción de residuos (t/año) y la densidad de los residuos (t/m³)**

$$\text{Vida útil}_{\text{celda}} = \frac{V_{\text{residuos}}}{\text{Producción}_{\text{residuos}}} = \frac{513,950 \text{ m}^3}{(40,000 \frac{\text{t}}{\text{año}}) / 0.5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Vida útil}_{\text{celda}} = \frac{513,950 \text{ m}^3}{80,000 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = 6.4 \text{ años}$$

 **Respuesta 5**

Problema 10

Se pretende construir un relleno sanitario de RSU para una población de 120,000 habitantes con una generación per cápita de RSU de 1.1 Kg/hab./día.

Calcular la superficie y el volumen necesarios de terreno suponiendo que se va a diseñar un relleno sanitario de 500 Kg/m³, suponiendo que se diseña para una vida útil de 20 años con una profundidad de 15 m.

Solución

➤ **Cálculo de volumen y superficie necesaria para relleno sanitario, considerando:**

| | |
|--|-----------------------|
| - Vida útil | 20 años |
| - Población | 120,000 |
| - Generación per cápita de RSU | 1.1 Kg/hab./día |
| - Días al año | 365 días |
| - Generación anual RSU | 48,180 t/año |
| - Profundidad de celda | 15 m |
| - Altura de barreras de protección (debajo y encima de residuos) | 3.5 m |
| - Volumen de recubrimiento diario (5% de volumen disponible) | 0.05 |
| - Densidad de los RSU en el relleno sanitario | 0.5 t/m ³ |
| - Volumen de RSU m ³ | 96,360 m ³ |

Paso 1: Considerar Ecuación 42 y Ecuación 43

$$V_{\text{residuos}} \text{m}^3 = (V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3) - V_{\text{recubrim diario}} \text{m}^3 \quad \text{Ecuación 42}$$

$$V_{\text{recubrim diario}} \text{m}^3 = (V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3) \times 0.05 \quad \text{Ecuación 43}$$

Paso 2: Reemplazar Ecuación 43 en Ecuación 42

$$V_{\text{residuos}} \text{m}^3 = (V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3) - (V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3) \times 0.05$$

$$V_{\text{residuos}} \text{m}^3 = (V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3) \times (1 - 0.05)$$

$$V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3 = \frac{V_{\text{residuos}} \text{m}^3}{0.95} = \frac{96,360 \text{ m}^3}{0.95} = 101,431.58 \text{ m}^3 \quad \text{Ecuación 44}$$

Paso 3: Reemplazar Ecuación 44 en Ecuación 43

$$V_{\text{recubrim diario}} \text{m}^3 = (V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3) \times 0.05$$

$$V_{\text{recubrim diario}} \text{m}^3 = 101,431.58 \text{ m}^3 \times 0.05 = 5,071.6 \text{ m}^3$$

Paso 4: Cálculo de superficie necesaria (m²). Considerar Ecuación 45

$$V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3 = V_{\text{relleno sanitario}} \text{m}^3 - V_{\text{barreras protección}} \text{m}^3 \quad \text{Ecuación 45}$$

$$V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3 = (\text{Altura}_{\text{relleno san}} - \text{Altura}_{\text{barreras prot}}) \text{m} \times \text{superficie (m}^2)$$

$$V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3 = (15 - 3.5) \text{m} \times \text{superficie (m}^2)$$

$$\text{Superficie} = \frac{V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3}{(15 - 3.5) \text{m}} = \frac{101,431.58 \text{ m}^3}{7 \text{ m}} = 14,490 \text{ m}^2$$



Paso 5: Cálculo de volumen del relleno sanitario. Considerar el volumen de: barreras de protección, recubrimiento diario y residuos.

$$V_{\text{barreras protección}} \text{m}^3 = \text{superficie (m}^2) \times \text{altura (m)}$$

$$V_{\text{barreras protección}} \text{m}^3 = 14,490 \text{ m}^2 \times 3.5 \text{ m} = 50,715 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{recubrim diario}} \text{m}^3 = 5,071.6 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{residuos}} \text{m}^3 = (V_{\text{residuos+recubrim diario}} \text{m}^3) \times (1 - 0.05)$$

$$V_{\text{residuos}} \text{m}^3 = 101,431.58 \text{ m}^3 \times 0.95 = 96,360 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{relleno sanit}} = (V_{\text{barreras protección}} + V_{\text{recubrim diario}} + V_{\text{residuos}}) \text{m}^3$$

$$V_{\text{relleno sanit}} = (50,715 + 5,071.6 + 96,360)\text{m}^3$$

$$V_{\text{relleno sanit}} = 152,146.6 \text{ m}^3$$



REFERENCIAS

- Alzamora, B. R., Tobias de Vasconcelos Barros, R., Kelli de Oliveira, L., & Gonçalves, S. S. (2022). Forecasting and the influence of socioeconomic factors on municipal solid waste generation: A literature review. *Environmental Development*, 100734. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100734>
- Council, N. R. (1997). *Methane Generation From Human, Animal, and Agricultural Wastes*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/21482>
- Huaccha, A. E. H. (2017). *Mejoramiento del sistema de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el municipio del distrito y provincia de Jaén, departamento de Cajamarca, Perú* [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/90993>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Woerden, F. V. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Publications.
- Kurniawan, T. A., Lo, W., Singh, D., Othman, M. H. D., Avtar, R., Hwang, G. H., Albadarin, A. B., Kern, A. O., & Shirazian, S. (2021). A societal transition of MSW management in Xiamen (China) toward a circular economy through integrated waste recycling and technological digitization. *Environmental Pollution*, 277, 116741. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116741>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos* (1.^a ed., Vol. 1). McGraw-Hill. <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UMARPA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expression=mfn=004657>

ISBN: 978-612-48908-2-6

