



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL- AIRE

**VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA INTERNA DE UN BIOFILTRO DE  
COMPOSTA ALIMENTADO CON METANO**

TESIS  
PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
**ING. YULY VANESSA TORRES ARÉVALO**

TUTOR PRINCIPAL  
**DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES**  
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR  
**DR. SERGIO REVAH MOISEEV**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA – UNIDAD CUAJIMALPA

**DRA. TANIA GÓMEZ BORRAZ**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA – UNIDAD CUAJIMALPA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Revah Moiseev Sergio  
Secretario: Dr. Quijano Govantes Guillermo  
Vocal: Dr. Cervantes Carrillo Francisco Javier.  
1er Suplente: Dra. Gómez-Borraz Tania Lizet  
2do Suplente: Dr. Noyola Robles Adalberto

Esta tesis de maestría se realizó en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del Edificio 5, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que cuenta con Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015.

**TUTOR DE TESIS:**

A large, stylized handwritten signature in black ink, consisting of a large loop on the left and a series of smaller, connected strokes on the right. The signature is positioned above a horizontal line.

DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES



El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015 No. de Certificado CMX C SGC 209 2020, válido en el período del 12 de noviembre de 2020 al 11 de noviembre de 2023.

***Itandehui***

*¿Me haces un favor?*

*¿Qué clase de favor?*

*¿Quieres tenerme mis avioncitos durante todo el recreo?*

*¿Durante todo el recreo?*

*Sí, es que tú eres mi cielo*

*La alegría de querer*

*Jairo Aníbal Niño*

*A mi familia*

*Mami gracias por la vida y como has cuidado de mi cada momento.*

*Luisa gracias por todo el apoyo y ser un ejemplo de perseverancia.*

*Nicolás gracias por cada una de las palabras y cuidados.*

*Lina y Danna gracias por ser la representación del amor, la vida y la alegría.*

## *Agradecimientos*

A México, a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Ingeniería por permitirme ser parte de su comunidad y vivir la experiencia de estudiar en esta casa de estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada.

A los profesores y miembros del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Ambiental, por sus enseñanzas y dirección.

Al Dr. Adalberto Noyola Robles por su confianza, apoyo y asesoramiento. Recuerdo con gratitud sus palabras cuando fui becaria AIDIS, tiempo después cuando le comenté que deseaba hacer la maestría y durante cada una de las veces que trabajamos juntos en este proyecto de investigación.

A los miembros de mi Comité Tutorial, Dr. Sergio Revah y Dra. Tania Gómez, por su acompañamiento y comentarios que enriquecieron este trabajo.

Al Dr. Guillermo Quijano y Dr. Francisco Cervantes por sus aportaciones realizadas durante la revisión de este trabajo.

A la Mtra. Margarita Cisneros por su apoyo y orientación desde la primera vez que estuve en México y durante la realización de mi maestría.

A Raúl Robles por el apoyo incondicional brindado durante la experimentación. La rigurosidad y dedicación nos permitieron obtener muy buenos resultados.

A mis compañeros de cubículo y maestría que durante el poco tiempo presencial que pudimos compartir tuvimos momentos llenos de alegría, reflexión y consejos.

A Laura Jaimes, gracias por cada uno de los momentos compartidos y por todas nuestras tardes de café. Tu compañía fue maravillosa.

A la Dra. Tatiana Rodríguez, fuiste tú quien sembró en mi este sueño de aprender cada día más y me motivaste para llegar hasta este momento. Que afortunada fui de ser tu estudiante y joven investigadora.

A mis compañeros y jefes de Constructora Landa, sin saberlo, fueron quienes me dieron el último impulso que necesitaba antes de comenzar esta aventura. Mafe eres el significado de la alegría, perseverancia y fortaleza. Te admiro y reconozco la gran mujer que eres.

Cata y Fore siempre estaré agradecida por su amistad, sin importar la distancia y el paso del tiempo.

A ti por una mañana linda y bella y cuando salga el sol será una mañana linda como la flor.

# RESUMEN

---

El metano es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 34 veces mayor que el del dióxido de carbono en un periodo de 100 años. Las fuentes de emisión pueden ser naturales y antropogénicas, siendo estas últimas las responsables del 60% del metano atmosférico. Las plantas de tratamiento de aguas residuales y los rellenos sanitarios emiten a la atmósfera alrededor del 20% de las emisiones de metano antropogénicas.

Los biofiltros de composta son capaces de tratar emisiones de metano a pequeña escala. Sin embargo, aún existen aspectos como el aumento de la temperatura interna y el control de la humedad que deben ser estudiados para permitir que esta biotecnología pueda ser aplicada ampliamente, con capacidades de eliminación de metano competitivas y capaces de operar durante tiempos prolongados con limitados costos de operación y mantenimiento.

En este trabajo se estudió la variación de la temperatura interna de un biofiltro de composta alimentado con tres concentraciones de metano y usando un mismo flujo de gas con el objetivo de determinar el perfil de distribución de temperatura y su relación con la capacidad de eliminación.

La parte experimental de este trabajo consistió en la operación de un biofiltro de composta de 0.30 m<sup>3</sup> de lecho empacado y 0.53 m de altura durante 36 días. Para el monitoreo de la variación de la temperatura interna del biofiltro se instalaron 30 sensores de temperatura a diferentes niveles axiales y distancia radial. Las cargas de alimentación de metano fueron: Etapa 1, 0% CH<sub>4</sub>, 26.35 ± 3 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> (etapa 2, 2% CH<sub>4</sub>), 51.4 ± 2 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> (etapa 3, 4% CH<sub>4</sub>) y 102.6 ± 6 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> (etapa 4, 8% CH<sub>4</sub>) con un tiempo de retención de lecho vacío (TRLV) de 23 min.

Las capacidades de eliminación de metano fueron 26.35 ± 3 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>, 50.1 ± 2 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>, 75.8 ± 9 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>, lo que representa una eficiencia de remoción de 100%, 97.5 ± 1.7% y 73 ± 8.7% para cada una de las tres cargas (etapas), respectivamente. Los resultados obtenidos están acordes a lo reportado en otras investigaciones y para algunos casos son superiores, como en el caso de concentraciones de metano del 8%.

Respecto a la temperatura, al interior del biofiltro se alcanzaron temperaturas máximas de 51°C cuando la concentración de metano fue 2%, 66°C para 4% y 67°C para concentraciones del 8%. Estas temperaturas se encuentran fuera del rango considerado como óptimo para la biofiltración de metano. La zona de mayor temperatura fue el centro del biofiltro. Esta zona desde el inicio de la actividad microbiológica registró elevadas temperaturas, lo que permite definirla como una zona de acumulación del calor generado por la zona activa de la entrada, y con baja transferencia de calor. A nivel axial, la mayor temperatura se presentó entre los 0.15 m y 0.35 m de altura del lecho de composta.

Aspectos como la porosidad y humedad de la composta también fueron evaluados. Tanto la reducción de la porosidad como de la humedad se asocian a las elevadas temperaturas registradas, las cuales promovieron la evaporación del agua, secado de la composta y compactación de la misma. Finalmente, en este trabajo se calibró y validó un modelo matemático de biofiltración de metano. Se usó el parámetro de conductividad térmica como el término que agrupa los efectos de secado y compactación de la composta. Una vez calibrado el modelo y de acuerdo a los resultados del monitoreo de la temperatura, se simuló el uso de intercambiadores de calor a nivel transversal y radial, con el objetivo de determinar su efecto en la eficiencia de remoción. Los resultados de la simulación indican que intercambiadores de calor en distintas zonas radiales permitirían aumentar la eficiencia de remoción por encima del 75% cuando se tratan concentraciones de metano del 8%.



## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN .....   | 16 |
| CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO .....  | 18 |
| 1.1 Metano como contaminante ambiental.....  | 18 |
| 1.2 Biofiltración para el tratamiento de emisiones gaseosas de metano .....            | 20 |
| 1.3 Factores que inciden en la operación de biofiltros .....                           | 25 |
| 1.3.1 Tiempo de residencia de lecho vacío .....  | 25 |
| 1.3.2 Temperatura.....   | 27 |
| 1.3.3 Oxígeno.....   | 36 |
| 1.3.4 Nutrientes.....  | 37 |
| 1.3.5 Caída de presión, tipos de empaque y distribución del gas.....                   | 38 |
| 1.3.6 Humedad .....  | 41 |
| 1.4 Modelos matemáticos para biofiltros .....  | 43 |
| CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....                                 | 51 |
| 2.1 Justificación.....   | 51 |
| 2.2 Hipótesis .....  | 52 |
| 2.3 Objetivos .....  | 52 |
| 2.3.1 Objetivo general .....   | 52 |
| 2.3.2 Objetivos específicos .....  | 52 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....  | 53 |
| 3.1 Experimentación .....  | 53 |
| 3.1.1 Condiciones de operación del biofiltro .....                                     | 53 |
| 3.1.2 Biofiltro de composta .....  | 57 |
| 3.1.3 Deflectores en el biofiltro.....   | 57 |
| 3.1.4 Sensores de temperatura .....  | 58 |
| 3.1.5 Muestreo .....   | 61 |
| 3.2 Evaluación de la operación del biofiltro de composta .....                         | 62 |
| 3.2.1 Cálculo de la conductividad térmica en función del grado de saturación .....     | 64 |
| 3.3 Simulación de eficiencia de remoción y temperatura al interior del biofiltro ..... | 64 |
| 3.3.1 Error estadístico de datos experimentales y simulados.....                       | 66 |

|  |     |
|--|-----|
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....   | 67  |
| 4.1 Caracterización de la composta .....   | 67  |
| 4.1.1 Porosidad .....  | 67  |
| 4.1.2 Densidad aparente .....  | 67  |
| 4.1.3 pH.....  | 68  |
| 4.1.4 Humedad .....  | 68  |
| 4.1.5 Grado de saturación y conductividad térmica .....  | 71  |
| 4.2 Operación del biofiltro.....   | 72  |
| 4.2.1 Flujo y caída de presión .....   | 72  |
| 4.2.2 Capacidad de eliminación y carga de alimentación .....   | 74  |
| 4.2.3 Relación CO <sub>2</sub> / CH <sub>4</sub> y O <sub>2</sub> / CH <sub>4</sub> .....  | 76  |
| 4.3 Balance de agua .....  | 84  |
| 4.4 Variación de temperatura al interior del biofiltro .....   | 88  |
| 4.4.1 Descripción de la etapa 1 - (0% CH <sub>4</sub> ) .....  | 88  |
| 4.4.2 Descripción de la etapa 2 - (2% CH <sub>4</sub> ) .....  | 90  |
| 4.4.3 Descripción de la etapa 3 y 4 - (4% y 8% CH <sub>4</sub> ) .....   | 94  |
| 4.4.4 Descripción de la etapa 5 – Enfriamiento del biofiltro.....  | 98  |
| 4.4.5 Temperatura según la altura y el radio del biofiltro .....   | 104 |
| 4.5 Modelación .....   | 114 |
| 4.5.1 Calibración del modelo.....  | 114 |
| 4.5.2 Eficiencia de remoción y temperatura simuladas .....   | 117 |
| 4.6 Propuesta de remoción de calor.....  | 129 |
| CONCLUSIONES.....  | 137 |
| RECOMENDACIONES .....  | 139 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 140 |
| ANEXOS.....  | 146 |
| A. Concentración máxima de CH <sub>4</sub> .....   | 146 |
| B. Ejemplo de la determinación de relaciones de estequiometría CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> y O <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> en trabajos de otros autores ..... | 146 |
| C. Solución del balance de masa de CH <sub>4</sub> en la fase gaseosa .....  | 148 |
| D. Simulación de intercambiadores de calor .....   | 149 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Representación de la biofiltración de metano .....  | 22 |
| Figura 1.2 Vía de oxidación del CH <sub>4</sub> y asimilación del formaldehído por microorganismo metanótrofos. Adaptado de Veillette et al. (2012) .....  | 24 |
| Figura 3.1 a) Sistema de biofiltración y b) Cilindro de gas CH <sub>4</sub> .....  | 54 |
| Figura 3.2 Representación esquemática de la instalación y alimentación del biofiltro.....  | 55 |
| Figura 3.3 Sistema de biofiltración detalle 1 .....  | 56 |
| Figura 3.4 Sistema de biofiltración detalle 2 .....  | 57 |
| Figura 3.5 Ubicación de deflectores y dimensiones del sistema de biofiltración .....   | 58 |
| Figura 3.6 Muestra de un deflector instalado al interior del biofiltro .....   | 58 |
| Figura 3.7 Niveles de ubicación de los sensores - Sensores en color naranja.....   | 59 |
| Figura 3.8 Dimensiones de los sensores instalados en el biofiltro.....   | 59 |
| Figura 3.9 Distribución de sensores en cada nivel. El sensor 3 se ubicó en la entrada del gas y el 30 en la pared externa orientada al sur.....  | 60 |
| Figura 3.10 Sensores ubicados en el nivel 3 del biofiltro. Los sensores perimetrales muestran el separador amarillo para evitar el contacto del sensor con la pared .....  | 60 |
| Figura 3.11 Puntos de muestreo .....   | 62 |
| Figura 3.12 Nucleador para toma de muestras de composta.....   | 62 |
| Figura 3.13 Algoritmo para simulación de la operación del biofiltro. CV RMSE: coeficiente de varianza de la raíz del error cuadrático medio.....   | 65 |
| Figura 4.1 a) Composta el día 15 de operación, b) acercamiento en el mismo día, c) el día 20 después de la adición de agua y ya con alimentación de CH <sub>4</sub> y d) agua condensada en la tapa el día 22 .....                                      | 69 |
| Figura 4.2 a) Estado de la composta el día 34 antes de la adición de agua y b) composta el día 34 durante la adición de agua .....   | 70 |
| Figura 4.3 Relación entre el flujo de entrada y la caída de presión del sistema para la Etapa 1 (0% CH <sub>4</sub> ), Etapa 2 (2% CH <sub>4</sub> ), Etapa 3 (4% CH <sub>4</sub> ), Etapa 4 (8% CH <sub>4</sub> ) y Etapa 5 (0% CH <sub>4</sub> ) ..... | 73 |
| Figura 4.4 Carga de alimentación (CA), capacidad de eliminación (CE) y eficiencia de remoción (ER) del biofiltro .....   | 75 |
| Figura 4.5 Carga de alimentación y capacidad de eliminación de trabajos de investigación de biofiltración de metano a nivel laboratorio y piloto. ....   | 76 |
| Figura 4.6 Relaciones de estequiometría y eficiencia de remoción. El eje de tiempo de operación solo muestra los momentos en que se hicieron mediciones de concentración de gases a la entrada y salida .....  | 77 |
| Figura 4.7 Producción de CO <sub>2</sub> como una función de la capacidad de eliminación de CH <sub>4</sub> . La línea punteada representa la relación de estequiometría de la oxidación de metano a dióxido de carbono (ecuación 17). ....              | 81 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.8 Relación de la acumulación de carbono, consumo de $O_2$ , y $CH_4$ y producción de $CO_2$ acumulados durante las etapas de biofiltración .....  | 83  |
| Figura 4.9 Representación del balance de agua en el biofiltro de composta .....  | 85  |
| Figura 4.10 Adición de agua al biofiltro a) agua por la parte superior y b) columnas humidificadoras 1 y 2 .....   | 86  |
| Figura 4.11 Lixiviado recuperado a) Manguera fondo del biofiltro y b) manguera conectada a manómetro de agua .....   | 87  |
| Figura 4.12 Temperatura registrada en el centro del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 1 (0% $CH_4$ ).....   | 89  |
| Figura 4.13 Temperatura registrada en el perímetro y centro del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 1 (0% $CH_4$ ).....   | 90  |
| Figura 4.14 Temperatura registrada en el centro del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 2 (2% $CH_4$ ).....   | 92  |
| Figura 4.15 Temperatura registrada en el interior de la cara oriente del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 2 (2% $CH_4$ ).<br>.....   | 93  |
| Figura 4.16 Temperatura registrada en el centro del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 3 y 4 (4% y 8% $CH_4$ ).....  | 96  |
| Figura 4.17 Temperatura registrada en el interior de la cara oriente del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 3 y 4 (4% y 8% $CH_4$ ).....   | 97  |
| Figura 4.18 Temperatura registrada en el centro del biofiltro en los niveles de altura en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) con y sin alimentación de $CH_4$ en la corriente de aire .....  | 99  |
| Figura 4.19 Diagrama balance de masa en un biofiltro idealizado .....  | 100 |
| Figura 4.20 Cálculo de la tasa de dilución a partir de la integración analítica del balance de metano en la fase gaseosa (Ecuación 18).....  | 103 |
| Figura 4.21 Mapa de temperatura para el día 2 de la etapa 1 (0% $CH_4$ ). Los valores numéricos tienen unidad de $^{\circ}C$ . .....   | 106 |
| Figura 4.22 Mapa de temperatura para el día 25 de la etapa 2 (2% $CH_4$ ). Los valores numéricos tienen unidad de $^{\circ}C$ . .....  | 106 |
| Figura 4.23 Mapa de temperatura para el día 28 de la etapa 3 (4% $CH_4$ ). Los valores numéricos tienen unidad de $^{\circ}C$ . .....  | 107 |
| Figura 4.24 Mapa de temperatura para el día 30 de la etapa 4 (8% $CH_4$ ). Los valores numéricos tienen unidad de $^{\circ}C$ . .....  | 108 |
| Figura 4.25 Variación de la temperatura respecto a la altura y al centro-periferia en el a) día 24 - etapa 2 con 2% $CH_4$ , b) día 28 - etapa 3 con 4% $CH_4$ y c) día 35 – etapa 4 con 8% $CH_4$ . La temperatura de entrada y ambiente corresponde a la temperatura promedio de la hora presentada..... | 112 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.26 Gráfica del factor de corrección por temperatura ( $fV, T$ ) para la Ecuación 26 y Ecuación 27. La zona de color corresponde a la temperatura considerada como óptima.<br>.....  | 116 |
| Figura 4.27 Representación de los datos obtenidos a nivel simulación y la comparación con los experimentales.....  | 118 |
| Figura 4.28 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 1 (0.05m) y Nivel 2 (0.15m) del día simulado bajo la concentración de 2% de CH <sub>4</sub> a la entrada.<br>.....  | 120 |
| Figura 4.29 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 3 (0.35cm) y Nivel 4 (0.50 m)del día simulado bajo la concentración de 2% de CH <sub>4</sub> a la entrada.<br>.....   | 121 |
| Figura 4.30 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 1 (0.05m) y Nivel 2 (0.15m) del día simulado bajo la concentración de 4% de CH <sub>4</sub> a la entrada.<br>.....  | 123 |
| Figura 4.31 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 3 (0.35cm) y Nivel 4 (0.50 m) del día simulado bajo la concentración de 4% de CH <sub>4</sub> a la entrada.<br>.....  | 124 |
| Figura 4.32 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 1 (0.05m) y Nivel 2 (0.15m) del día simulado bajo la concentración de 8% de CH <sub>4</sub> a la entrada.<br>.....  | 127 |
| Figura 4.33 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 3 (0.35m) y Nivel 4 (0.50m) del día simulado bajo la concentración de 8% de CH <sub>4</sub> a la entrada.<br>.....  | 128 |
| Figura 4.34 Propuesta de ubicación de intercambiadores de calor para el biofiltro a nivel transversal y radial .....   | 131 |
| Figura 4.35 Simulación de la variación de temperatura, fuente de calor metabólico y concentración de metano según el número y la ubicación de intercambiadores de calor (transversal y radial). Fluido con temperatura ambiente a través de los intercambiadores de calor. ....                        | 134 |
| Figura 4.36 Curvas de eficiencia de remoción de CH <sub>4</sub> vs la altura del biofiltro para diferentes temperaturas en el intercambiador de calor transversal. Concentración de 8% CH <sub>4</sub> a la entrada. ....  | 136 |
| Figura 4.37 Curvas de eficiencia de remoción de CH <sub>4</sub> vs la altura del biofiltro para diferentes temperaturas en los intercambiadores radiales. Concentración de 8% CH <sub>4</sub> a la entrada. ....   | 136 |
| Figura C.1 Perfiles de concentración de CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , y O <sub>2</sub> en los materiales del lecho filtrante examinados. Valores promedio y desviación estándar calculados sobre la base de las mediciones de los últimos tres meses del trabajo de Pawlowska et al., 2011 ..... | 147 |
| Figura C.2 Resultados obtenidos en una prueba de respirometría (Gómez Borraz, 2017).....   | 147 |
| Figura D.3 Resultados de simulación cuando la temperatura del fluido del intercambiador de calor es de 30°C .....  | 149 |

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1.1 Química de la oxidación del CH <sub>4</sub> .....   | 24  |
| Tabla 1.2 Recopilación de investigaciones realizadas orientadas a la eliminación biológica de CH <sub>4</sub> utilizando biofiltros a escala laboratorio (menor a 20 litros) .....                  | 31  |
| Tabla 1.3 Recopilación de investigaciones realizadas orientadas a la eliminación biológica de CH <sub>4</sub> utilizando biofiltros a escala piloto (mayor a 20 litros) .....                       | 33  |
| Tabla 1.4 Valores de conductividad térmica ( $\lambda$ ) para composta reportados en literatura.  | 36  |
| Tabla 1.5 Presión de vapor y parámetros de correlación (Poling et al., 2000) .....  | 43  |
| Tabla 3.1 Tiempos de evaluación para cada concentración de CH <sub>4</sub> y condiciones de alimentación .....  | 53  |
| Tabla 3.2 Parámetros físicos y químicos medidos.....  | 61  |
| Tabla 4.1 Cantidad de agua adicionada en los días indicados, durante la operación del biofiltro .....   | 69  |
| Tabla 4.2 Humedad y sólidos de la composta .....  | 71  |
| Tabla 4.3 Grado de saturación y conductividad térmica.....  | 72  |
| Tabla 4.4 Interpretación de la combinación de las relaciones de estequiometría considerando el consumo de oxígeno y metano y la producción de dióxido de carbono en un biofiltro metanotrófico..... | 78  |
| Tabla 4.5 Relaciones de estequiometría determinadas para diferentes trabajos de biofiltración de CH <sub>4</sub> .....  | 80  |
| Tabla 4.6 Balance de agua .....   | 85  |
| Tabla 4.7 Relación de agua aproximada adicionada a las columnas de humidificación.....  | 87  |
| Tabla 4.8 Temperatura máxima para diferentes ejes axiales y niveles de altura del biofiltro durante el periodo estacionario de la etapa 2 (2% CH <sub>4</sub> ) .....                               | 94  |
| Tabla 4.9 Temperatura máxima para diferentes ejes axiales y niveles de altura del biofiltro durante la etapa 3 (4% CH <sub>4</sub> ) .....  | 97  |
| Tabla 4.10 Temperatura máxima para diferentes ejes axiales y niveles de altura del biofiltro durante la etapa 4 (8% CH <sub>4</sub> ) .....   | 98  |
| Tabla 4.11 Parámetros modificados para la calibración de modelo .....   | 117 |
| Tabla 4.12 Eficiencia de remoción y valores de CV(RMSE) de las curvas de temperatura obtenidos para la simulación del día 26 (2% CH <sub>4</sub> ).....   | 119 |
| Tabla 4.13 Eficiencia de remoción y valores de CV(RMSE) de las curvas de temperatura obtenidos para la simulación del día 28 (4% CH <sub>4</sub> ).....   | 122 |
| Tabla 4.14 Eficiencia de remoción y valores de CV(RMSE) de las curvas de temperatura obtenidos para la simulación del día 35 (8% CH <sub>4</sub> ).....   | 126 |
| Tabla 4.15 Tasa de calor metabólico durante la oxidación de CH <sub>4</sub> .....   | 129 |
| Tabla C. 1 Concentración de gases determinadas a partir de la Figura C.1 .....  | 147 |
| Tabla C.2 Concentración de gases determinadas para la Figura C.2.....   | 148 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

**A<sub>w</sub>** Actividad del agua, adimensional

**A<sub>c</sub>** Acumulación de carbono, mol m<sup>-3</sup>

**CE** Capacidad de eliminación de metano, g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>

**CA** Carga de alimentación de metano, g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>

**C-O<sub>2</sub>** Tasa de consumo de oxígeno, g O<sub>2</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>

**C-CH<sub>4</sub>** Tasa de consumo de metano, g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>

**CV RMSE** Coeficiente de varianza de la raíz del error cuadrático medio

**ER** Eficiencia de remoción de metano, %

**F** Flujo, m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>

**F<sub>v,T</sub>** Factor de corrección de la actividad metabólica por temperatura, adimensional

**GEI** Gas de efecto invernadero

**He** Constante de Henry, adimensional (g m<sup>-3</sup><sub>gas</sub> / g m<sup>-3</sup><sub>liquido</sub>)

**K** Kelvin, temperatura

**K<sub>Ba</sub>** Coeficiente de transporte de masa, h<sup>-1</sup>

**LII** Límite inferior de inflamabilidad

**LSI** Límite superior de inflamabilidad

**m** Masa, g

**P-CO<sub>2</sub>** Tasa de producción de dióxido de carbono, g CO<sub>2</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>

**P<sub>v</sub>** Presión de vapor, Bar

**Q<sub>rx</sub>** Tasa de calor metabólico generado, J m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>

**R** Radiación solar, W m<sup>-2</sup>

**t** Tiempo, segundos-minutos-horas

**T** Temperatura, °C

**TRLV** Tiempo de residencia de lecho vacío, min

**TRG** Tiempo de residencia del gas, min

**V** Volumen útil del biofiltro de composta, m<sup>3</sup>

**V<sub>g</sub>** Volumen de gas, m<sup>3</sup>

**V<sub>LB</sub>** Volumen de líquido y biopelícula, m<sup>3</sup>

**V<sub>hs</sub>** Volumen de headspace, m<sup>3</sup>

**V<sub>v</sub>** Volumen de vacíos, m<sup>3</sup>

**V<sub>w</sub>** Volumen de agua, m<sup>3</sup>

**Y<sub>CO<sub>2</sub></sub>** Coeficiente de rendimiento de CO<sub>2</sub>, adimensional

**W** Vatio, W

**[CH<sub>4</sub>]** Concentración de metano, g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup><sub>gas</sub>

**[CO<sub>2</sub>]** Concentración de dióxido de carbono, g CO<sub>2</sub> m<sup>-3</sup><sub>gas</sub>

**[O<sub>2</sub>]** Concentración de oxígeno, g O<sub>2</sub> m<sup>-3</sup><sub>gas</sub>

**[CL]** Concentración de equilibrio, g m<sup>-3</sup><sub>líquido</sub>

### **Subíndices**

**A** Aire

**amb** Ambiente

**B** Biofiltro

**M** Mezcla

**i** Inicial

**f** Final

### **Letras griegas**

**γ** Reacción biológica

**Δ** Diferencia o gradiente

**ΔH<sub>rx</sub>** Calor de reacción, J mol<sup>-1</sup>

**ε** Porosidad, adimensional

**λ** Conductividad térmica, W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

**ρ** Densidad de una sustancia, g m<sup>-3</sup>

**φ** Grado de saturación, adimensional

**ω** Humedad, %



## INTRODUCCIÓN

El aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, considerando su relación directa con el fenómeno del calentamiento global, requiere de acciones inmediatas para su mitigación y control. El metano ( $\text{CH}_4$ ) es un gas de efecto invernadero, que, si bien es generado por fuentes naturales, también es emitido por fuentes antropogénicas, como la extracción y transporte de gas natural, la producción de arroz y ganado vacuno, las plantas de tratamiento de aguas residuales y los rellenos sanitarios. Estas dos últimas actividades generan aproximadamente el 20% de las emisiones antropogénicas de  $\text{CH}_4$  (Gómez Cuervo et al., 2016 y IPPC, 2014).

Los rellenos sanitarios contienen desechos orgánicos que durante su descomposición y degradación producen emisiones denominadas gas de vertedero, el cual está compuesto por  $\text{CH}_4$  en un 50% a 60%, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) entre un 40% a 50% y componentes trazas en concentraciones inferiores al 1% de otros gases. El  $\text{CH}_4$  y los compuestos trazas como el benceno, cloruro de vinilo y clorofluorocarbonos, representan un peligro ambiental y para la salud humana, es por esto que se deben tomar medidas de mitigación para reducir las emisiones de los rellenos sanitarios (Duan et al., 2021).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), si bien son procesos fundamentales para la conservación del recurso hídrico, contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero. Las emisiones de una PTAR pueden ser emisiones directas como el biogás producto de la digestión anaerobia y que no se usa como fuente de energía, o emisiones indirectas como el consumo de energía eléctrica para la operación de equipos (Nguyen et al., 2019). El biogás está compuesto por  $\text{CH}_4$  (70%-80%), nitrógeno (10%-25%) y  $\text{CO}_2$  (5% - 10%) (Noyola et al., 2006). Adicional al  $\text{CH}_4$  que se libera a la atmósfera por el biogás que no se usa ni se quema, se debe añadir la pérdida de  $\text{CH}_4$  disuelto en el efluente tratado, el cual se desorbe una vez cambian las condiciones de presión y temperatura que había dentro del reactor anaerobio (Noyola et al., 2016, Matsuura et al., 2014). Huete et al. (2018) reportaron concentraciones de  $\text{CH}_4$  disuelto en el efluente de un reactor anaerobio de  $12.5 \text{ mg CH}_4 \text{ L}^{-1}$ . Después de pasar el efluente por una columna de desorción la concentración de  $\text{CH}_4$  gaseoso en la mezcla de aire de desorción varió entre 2.7% y 4.5%.

Las emisiones de  $\text{CH}_4$  de los rellenos sanitarios y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, pueden ser tratadas con procesos biológicos. Por ejemplo, las cubiertas biológicas o de suelo que se colocan sobre los rellenos sanitarios, o los biofiltros de composta que reciben emisiones de gas previamente capturadas, son biotecnologías que por medio de la actividad de microorganismos metanótrofos oxidan el  $\text{CH}_4$ , obteniendo como productos principales: agua, dióxido de carbono, biomasa y calor. Esta oxidación biológica del  $\text{CH}_4$  se considera una alternativa rentable y respetuosa con el ambiente ante las tecnologías fisicoquímicas (La et al. 2018). Es importante resaltar que de acuerdo con las

recomendaciones de la Convención internacional de protección fitosanitaria (IPCC, por sus siglas en inglés), el CO<sub>2</sub> producto de la oxidación de CH<sub>4</sub> presente en el biogás se considera de origen biogénico o de ciclo corto (no de origen fósil).

Los biofiltros de composta son sistemas que permiten el crecimiento de microorganismos sobre un lecho orgánico que es su fuente de soporte y de nutrientes. Son reactores de lecho poroso que permiten el paso de la corriente de gas, mezcla del contaminante (i.e metano) con aire saturado en agua. La corriente gaseosa se difunde a través del lecho de composta por convección forzada y por medio de procesos difusivos se transporta el contaminante hacia los microorganismos. Aspectos como el contenido de humedad, tiempo de residencia de lecho vacío, material de empaque, nutrientes y hasta la temperatura óptima para los microorganismos, han sido ampliamente estudiados (La et al., 2018). Las investigaciones actuales se centran en la operación de los biofiltros a largo plazo. La formación de sustancias poliméricas extracelulares (SPE), secado y compactación del lecho de soporte son procesos que se consideran importantes de analizar (Gómez-Cuervo et al., 2016 y Wilshusen et al., 2004); así mismo, es actualmente tema de interés, el desarrollo de modelos matemáticos para diseñar y estimar la capacidad de eliminación de los biofiltros (Bian et al., 2021; Jawad et al., 2021; Gómez-Borraz et al., 2017).

Pocas investigaciones se han realizado respecto al incremento y variación de la temperatura al interior del biofiltro de composta (Fjelsted et al., 2020; Fedrizzi et al., 2018; Ng et al., 2015; Gómez-Borraz et al., 2021). El incremento de la temperatura es producto del calor generado durante la oxidación de CH<sub>4</sub> y su acumulación. Al tratarse de procesos biológicos, la temperatura del entorno puede condicionar la actividad metabólica de los microorganismos. Por otra parte, las propiedades físicas del lecho de soporte y las condiciones de humedad en el biofiltro también son afectadas, pudiendo condicionar la operación de los biofiltros a largo plazo.

Considerando lo anterior, en este trabajo de tesis se monitoreó la variación de la temperatura interna de un biofiltro de composta al tratar concentraciones de metano de 2%, 4% y 8% volumen en aire, con el objetivo de determinar el perfil de distribución de temperatura y su relación con la capacidad de eliminación.

El documento presenta en el capítulo 1 información sobre la biofiltración de metano, los factores que inciden en la operación y los modelos matemáticos desarrollados. El capítulo 2 presenta los objetivos de la presente investigación y el capítulo 3 la metodología llevada a cabo para el cumplimiento de los objetivos. En el capítulo 4 se muestran los resultados experimentales y de la modelación realizada. Se reportan aspectos operativos del biofiltro, la temperatura registrada al interior y la modelación de intercambiadores de calor como mecanismo para evitar la acumulación de calor y aumentar la capacidad de eliminación del sistema. Al final del documento se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Metano como contaminante ambiental

El metano (CH<sub>4</sub>) es un gas de efecto invernadero con 34 veces mayor capacidad de retención de calor, comparada con la del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en un periodo de 100 años. Esto se debe por la capacidad del CH<sub>4</sub> de capturar mayor cantidad de fotones del infrarrojo térmico (IR) de los que puede capturar el CO<sub>2</sub>. La vida media del CH<sub>4</sub> en la atmósfera es de 12.4 años (Myhre et al., 2013).

Los gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), al incrementar su concentración en la atmósfera debido al desarrollo industrial y al uso generalizado de combustibles fósiles, capturan en mayor grado la radiación solar que recibe la tierra. Existe ya suficiente evidencia de que este fenómeno provoca el cambio climático ya que se asocia a un aumento de la temperatura en la atmósfera y a la alteración del equilibrio natural del planeta (Masters et al., 2008). Las consecuencias de este fenómeno a escala planetaria se presentan en el derretimiento de glaciares, aumento de la frecuencia e intensidad de sequías, inundaciones, huracanes, entre otros fenómenos hidrometeorológicos.

Las fuentes naturales de CH<sub>4</sub> como los humedales, los océanos, las erupciones volcánicas y la degradación de las plantas, representan el 40% de las emisiones globales de ese gas, mientras que las fuentes antropogénicas como los sectores de energía (petróleo y gas natural), las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), los rellenos sanitarios o vertederos, la minería del carbón, la ganadería y la agricultura son responsables del 60% (La et al., 2018). De manera particular, a nivel global se estima que las PTAR generan el 8.6% de las emisiones antropogénicas de CH<sub>4</sub> (IPPC, 2014) y los rellenos sanitarios el 12% (Gómez Cuervo et al., 2016).

Se han reportado varias concentraciones de emisiones de CH<sub>4</sub> en las PTAR que van desde 7 g m<sup>-3</sup> (1% v/v = 10,000 ppm<sub>v</sub> = 6.66 g m<sup>-3</sup>) hasta 465 g m<sup>-3</sup>, valor que corresponde a la emisión directa del biogás (Khabiri et al., 2021). La determinación de las emisiones de GEI de las PTAR es compleja debido a la variación espacial - temporal, los procesos unitarios que generan las emisiones y la misma operación de la planta. Mediciones puntuales utilizando cámaras de flujo flotantes, junto con análisis de muestras líquidas ha sido la forma con que se realizan las mediciones de emisiones de GEI en PTAR por lo general, en forma relativamente económica. Esta metodología no proporciona datos en forma continua y por intervalos de tiempo largos, centrándose en mediciones puntuales. Yoshida et al. (2014), utilizando espectroscopia de anillo descendente de cavidad (CRDS, por sus siglas en inglés) y acetileno como gas trazador, reportan que una PTAR que trata con procesos de tratamiento aerobios, 25.3 millones de m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> (800 L s<sup>-1</sup>) de agua residual, durante nueve campañas de medición realizadas por un año, tuvo emisiones de 4.99 kg h<sup>-1</sup> a 92.3 kg h<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> con concentraciones que oscilaron entre 2.1% a 4.4% en condiciones de operación

estables, llegando a concentraciones hasta de 32.7% cuando la planta presentó dificultades operacionales. Por otra parte, Lorenzo Toja et al. (2016) reportan las concentraciones y flujos de emisiones de CH<sub>4</sub> generados durante el invierno, de una planta diseñada para tratar 6250 m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup> (72 L s<sup>-1</sup>), señalando además dos tipos de emisiones: canalizadas o difusas, de fuentes activas o pasivas. Las fuentes activas son aquellas con suministro mecánico de aire y las emisiones de gases se pueden medir por medio de chimeneas de flujo. Las fuentes pasivas por su parte no tienen ventilación mecánica y las emisiones se pueden medir por medio de una cámara flotante de flujo dinámico. En el estudio de Lorenzo Toja et al. (2016), las unidades de pretratamiento (fuentes pasivas) generan un flujo de emisión de 14 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> y 7.4 ppm<sub>v</sub>, el reactor biológico (fuente activa) un flujo de emisión promedio de 14.3 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> y una concentración de 2 ppm<sub>v</sub>, el cuarto para secado de lodos por medio de filtros de banda (fuente activa) genera una emisión de 312 ppm<sub>v</sub> y un flujo de 1018 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> y el silo de lodos (fuente activa) genera una emisión de 58.8 ppm<sub>v</sub> a un flujo de 211 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

La combustión de CH<sub>4</sub> reduce por el simple hecho de producir CO<sub>2</sub>, en 34 veces su efecto invernadero, y a cero si el CH<sub>4</sub> es de carácter biogénico (no fósil). La quema de este gas se puede realizar de manera directa si tiene una concentración mínima del 20% (v/v en aire) (Centeno Mora et al., 2020). Autores como Haubrichs et al. (2006) señalan que la producción y composición del biogás producido en vertederos de residuos sólidos varía con el tiempo y que concentraciones por debajo del 35% a 40% de CH<sub>4</sub> y flujos entre 30 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> a 50 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> no son técnica ni económicamente rentables para la instalación y operación de plantas de cogeneración eléctrica. Ante ello, el biogás debe quemarse, aunque en la práctica esto no siempre sucede debido a que normalmente estas emisiones se ventean total o parcialmente, contribuyendo de este modo al aumento de GEI.

La Agencia Nacional del Petróleo de Brasil regula el uso y comercialización de biogás para concentraciones superiores al 90% de CH<sub>4</sub> (biometano). Esta concentración garantiza que el biogás tenga características similares al gas natural (combustible fósil) y permita su uso como combustible vehicular y su comercialización en redes de gas natural. Para lograr una concentración de 90% de CH<sub>4</sub>, son necesarios procesos de purificación para separar el CH<sub>4</sub> de otros gases como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub>, los cuales no tienen potencial para generar energía durante la fase de combustión. Delpaz et al. (2020) reportaron que concentraciones de CH<sub>4</sub> de 68.5%, 83.4% y 92.3% pueden generar 2.04 kWh m<sup>-3</sup>, 3.21 kWh m<sup>-3</sup> y 3.57 kWh m<sup>-3</sup> de energía eléctrica y 1.15 kWh m<sup>-3</sup>, 1.57 kWh m<sup>-3</sup> y 1.67 kWh m<sup>-3</sup> de energía térmica respectivamente para cada concentración.

Las mezclas de metano/aire son mezclas peligrosas si contienen CH<sub>4</sub> dentro de los límites de explosividad (5% a 15%). La mezcla dentro del rango de inflamabilidad puede producir una explosión, bajo la forma de una deflagración o detonación, siendo su diferencia la velocidad de propagación de la onda de combustión. Cuando la concentración de CH<sub>4</sub> es menor al límite inferior de inflamabilidad (LII 5%) la cantidad de CH<sub>4</sub> es baja para encender;

cuando la concentración de  $\text{CH}_4$  es mayor al límite superior de inflamabilidad (LSI 15%), la concentración de  $\text{O}_2$  es insuficiente y no se produce ignición. El LII está limitado por la fuente de combustible ( $\text{CH}_4$ ) y el LSI está limitado por el oxidante ( $\text{O}_2$ ). Los límites de explosión dependen de la temperatura y presiones iniciales. A presiones y temperaturas iniciales altas el valor de LSI aumenta y el LII disminuye, lo cual se interpreta como un aumento del rango de inflamabilidad (Kundu et al., 2016). Al presentarse una explosión se produce un aumento de presión, la cual es máxima cuanto la concentración de  $\text{CH}_4$  es de 9.5%, concentración relacionada con la relación de estequiometría de la oxidación química del  $\text{CH}_4$  (Anexo A).

## 1.2 Biofiltración para el tratamiento de emisiones gaseosas de metano

En el caso del tratamiento anaerobio directo de aguas residuales municipales, el  $\text{CH}_4$  producido durante la digestión anaerobia en pequeñas PTAR usualmente es liberado sin quemar, contribuyendo al aumento en la concentración de GEI. Esto puede suceder a pesar de contar con un quemador, cuando este se encuentra fuera de servicio por fallas técnicas o porque el flujo de biogás producido no es constante y provoca que la llama de los quemadores se apague. Además, la producción de  $\text{CH}_4$  en este tamaño de plantas no es suficiente para justificar la inversión necesaria y aprovecharlo como fuente de energía. Esto se debe a la baja concentración de materia orgánica presente en las aguas residuales domésticas y al reducido flujo tratado. A lo anterior se debe añadir la pérdida de  $\text{CH}_4$  disuelto en el efluente (Noyola et al., 2016, Matsuura et al., 2014). El tratamiento anaerobio directo de agua residual debe ir por lo tanto acompañado de un tratamiento de emisiones gaseosas que ayude a disminuir el impacto ambiental de este sector.

Los procesos fisicoquímicos pueden ser usados para la oxidación del  $\text{CH}_4$ . No obstante, sus costos no permiten considerarlos como una opción de tratamiento de emisiones gaseosas de pequeñas PTAR, las cuales además no consideran este tratamiento complementario como una prioridad. Los procesos biológicos por su parte son capaces de tratar bajas concentraciones de contaminantes en altos flujos de corrientes gaseosas, aspectos que permiten que su implementación sea factible. Según la fase en la que se encuentre el  $\text{CH}_4$  (líquida o gaseosa) se pueden emplear diferentes procesos para su oxidación bajo condiciones aerobias o anaerobias. Para efluentes que contengan  $\text{CH}_4$  disuelto (fase líquida) y en lugar de ser desorbido se puede llevar a cabo su oxidación en el licor mezclado del tanque de lodos activados, o bien bajo condiciones anaerobias acoplado el proceso a procesos de desnitrificación. En tales, condiciones, el  $\text{CH}_4$  se oxida a  $\text{CO}_2$  mientras que el nitrito o nitrato se transforma en nitrógeno gaseoso (Centeno Mora et al., 2020). Cuando el  $\text{CH}_4$  está en fase gaseosa se puede oxidar bajo condiciones aerobias en biofiltros de composta sola o mezclada con abultantes, o de lecho escurrido. Los biolavadores no son adecuados, debido a la baja solubilidad del  $\text{CH}_4$  en agua.

La biofiltración es un proceso que oxida contaminantes que están en una fase gaseosa mediante el uso de microorganismos que llevan a cabo su proceso metabólico bajo condiciones aerobias cuando el aceptor de electrones es el oxígeno. Los contaminantes se

transfieren a través de convección y difusión de la fase gaseosa a la fase líquida para hacerlos disponibles a los microorganismos.

La difusión es un proceso microscópico provocado por un gradiente de concentración que ocurre sobre distancias pequeñas y a bajas velocidades, capaces de controlar la rapidez total de un proceso del cual es solo un paso. Lobo Oehmichen (2007) presenta como valores generales no atribuidos a un fluido específico, velocidades de difusión de  $10 \text{ cm min}^{-1}$  en fase gaseosa y  $0.05 \text{ cm min}^{-1}$  en fase líquida. Por su parte, la convección es un proceso macroscópico originado por el movimiento masivo de un fluido que transfiere más rápidamente los compuestos en un biofiltro o en un reactor. Tanto la difusión como la convección son procesos que suceden de manera simultánea (Lobo Oehmichen, 2007).

Según la condición en que se encuentren los microorganismos en el biofiltro (suspensión o adheridos) y el patrón de flujo de la fase líquida, los biofiltros se pueden clasificar como lecho fijo, de lecho escurrido y biolavadores. Los biofiltros de composta son un ejemplo de biofiltros de lecho fijo. Estos biofiltros usan la composta como lecho de soporte para el crecimiento y desarrollo de microorganismos y a su vez como fuente de nutrientes. A través de este lecho fijo fluye la corriente gaseosa que contiene el contaminante a oxidar y por procesos de transferencia de masa entre las fases gas-líquido el contaminante es degradado por los microorganismos (Cárdenas González et al., 2003).

Las emisiones secundarias o fugitivas de  $\text{CH}_4$ , sin considerar la corriente principal de biogás, pueden tener concentraciones inferiores al 3% (v/v aire) cuando son captadas. Bajo esa característica, los procesos biológicos, como biofiltros que utilizan bacterias oxidantes de  $\text{CH}_4$  o metanótrofos, son considerados tecnologías apropiadas para tratar este tipo de emisiones (La et al., 2018). Al tratarse de procesos biológicos, ciertos factores como la temperatura, solubilidad de gases, pH (de especial atención cuando se trata biogás con  $\text{H}_2\text{S}$ ), humedad, concentración de los gases y tiempo de contacto de los microorganismos con el contaminante, influyen en la capacidad de eliminación (CE) y eficiencia del proceso.

La Figura 1.1 es una representación del proceso de biofiltración de  $\text{CH}_4$ . Considerar debidamente todos los procesos y fenómenos que intervienen en la biofiltración no es una tarea fácil, pues es un proceso dinámico que presenta cambios que se pueden manifestar en cuestión de minutos (i.e cambios en la concentración de los gases de salida) o días (i.e secado de la composta). En los biofiltros de composta se puede hacer la distinción de la fase gaseosa, líquida y sólida. Estas fases van a buscar el equilibrio químico y térmico. Por ejemplo, el calor que se genera por la oxidación de  $\text{CH}_4$  o el generado por la radiación solar sobre las paredes, inciden sobre el sistema de biofiltración, lo que crea un delta de temperatura ( $\Delta T$ ) que puede ser absorbido o cedido y es representado como dos flechas que entran o salen del medio filtrante. Respecto a la concentración de gases, se usa una sola flecha que representa la dirección que predomina en el proceso, por ejemplo, el  $\text{CH}_4$  va a tender a transportarse de la fase gaseosa, donde su concentración es máxima, hacia la fase líquida, donde su concentración es menor y es transformado a  $\text{CO}_2$ .

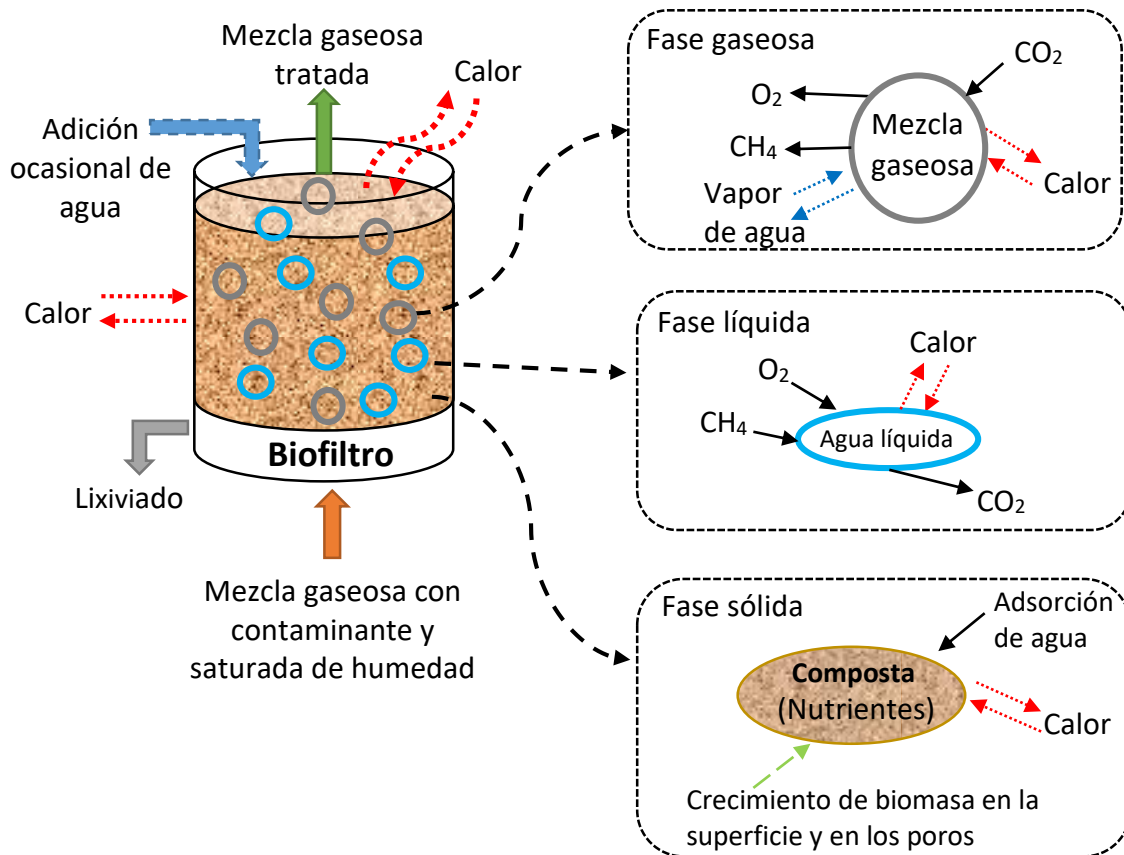
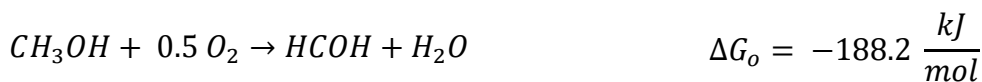
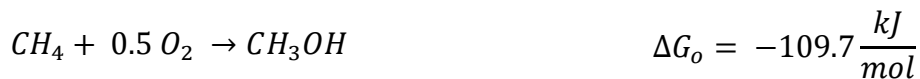


Figura 1.1 Representación de la biofiltración de metano

Adicional a los fenómenos de transporte mencionados anteriormente, la biofiltración de  $\text{CH}_4$  es un proceso bioquímico desarrollado por microorganismos metanótrofos. Las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo para la oxidación biológica de  $\text{CH}_4$  por microorganismos en condiciones aerobias inician con la oxidación de metano ( $\text{CH}_4$ ) a metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y a formaldehído ( $\text{HCOH}$ ), seguido de ácido fórmico ( $\text{HCOOH}$ ) para finalmente obtener  $\text{CO}_2$  (Hueté 2017 y Ng et al., 2015):

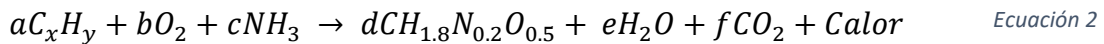


Reacción global



En un sistema de biofiltración en estado estacionario y suponiendo que no hay crecimiento de biomasa, la relación molar teórica de la Ecuación 1 entre CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> es 1:1, es decir, se logra una mineralización del 100% con un coeficiente de rendimiento Y<sub>CO<sub>2</sub></sub> de 2.75 g CO<sub>2</sub> g CH<sub>4</sub><sup>-1</sup> (Brandt et al., 2016).

La reacción bioquímica catalizada por microorganismos se lleva a cabo por diferentes vías dependiendo de la disponibilidad del compuesto a biofiltrar (contaminante o compuestos orgánicos) y nutrientes (i.e. nitrógeno). En presencia de suficientes nutrientes, la oxidación de contaminantes da como resultado la formación de biomasa junto con otros productos de la degradación. En la Ecuación 2 (Bordoloi et al., 2019) se presenta la reacción bioquímica general de oxidación de compuestos orgánicos (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) y la formación de biomasa (CH<sub>1.8</sub>N<sub>0.2</sub>O<sub>0.5</sub>) para sistemas de tratamiento biológico donde no se da una mineralización completa del contaminante.



Las bacterias metanótrofas son un subconjunto de los microorganismos metilótrofos los cuales se caracterizan por su capacidad de usar compuesto C<sub>1</sub> como fuente de energía y carbono (Scheutz et al., 2009). Los compuestos C<sub>1</sub> son aquellos compuestos más reducidos que el CO<sub>2</sub> y que no tienen enlaces carbono-carbono, aunque tengan más de un átomo de carbono (i.e. CH<sub>4</sub>, CH<sub>2</sub>O, CH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>OH, CN<sup>-</sup>, CO, CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S) (Large P.J. 1983). La Figura 1.2 representa las cuatro reacciones necesarias para oxidar el CH<sub>4</sub> hasta CO<sub>2</sub> (catabolismo), así como los dos ciclos metabólicos que pueden emplear las bacterias para la asimilación del formaldehído y la posterior formación de nuevo material celular (anabolismo). En la Tabla 1.1 se presentan las reacciones para oxidar el CH<sub>4</sub> y los electrones cedidos durante el proceso.



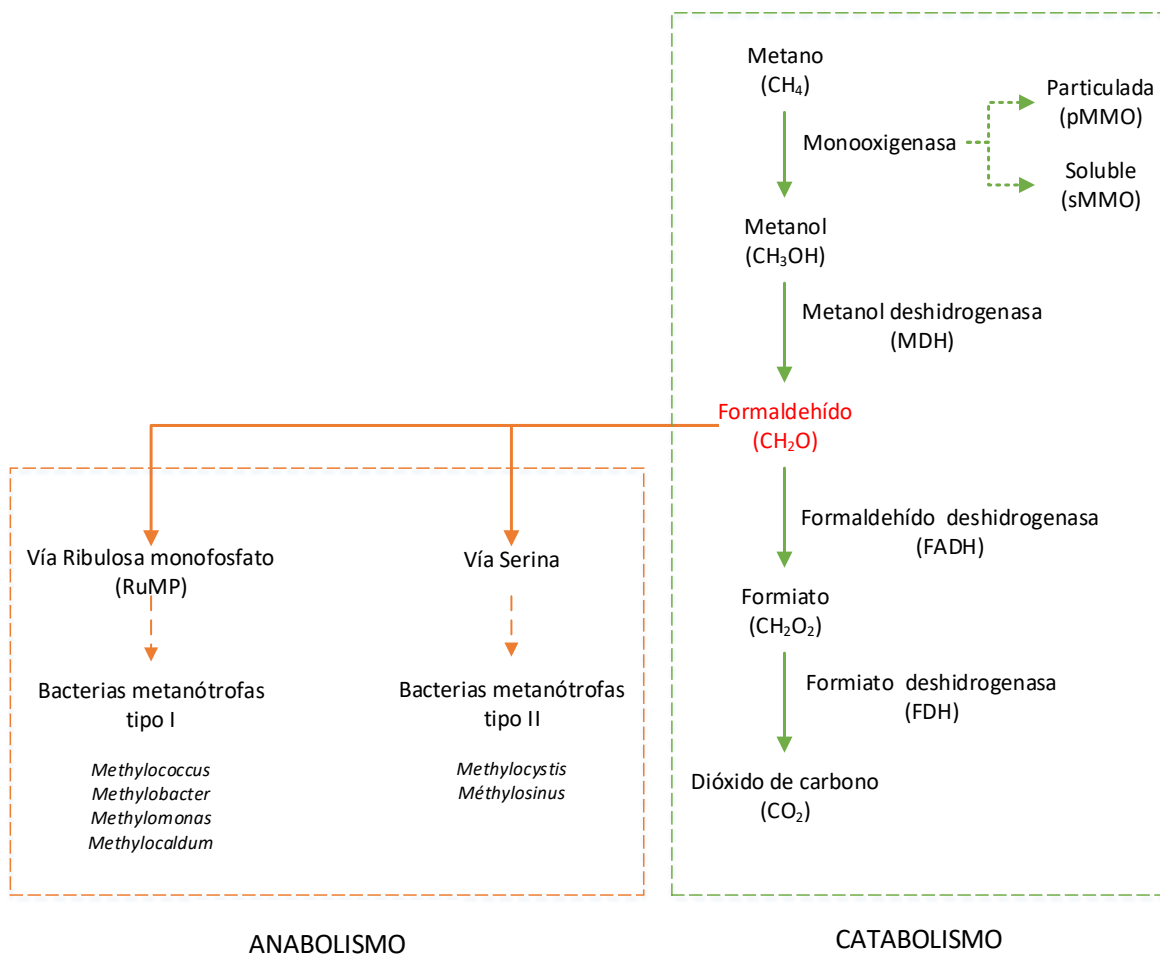


Figura 1.2 Vía de oxidación del  $CH_4$  y asimilación del formaldehído por microorganismo metanótrofos. Adaptado de Veillette et al. (2012)

Tabla 1.1 Química de la oxidación del  $CH_4$

| Compuesto                       | Metano   | Metanol  | Formaldehído | Formiato | Dióxido de carbono |
|---------------------------------|----------|----------|--------------|----------|--------------------|
|                                 | $CH_4$   | $CH_3OH$ | $HCOH$       | $HCOOH$  | $CO_2$             |
| Estado de oxidación del Carbono | $C^{4-}$ | $C^{2-}$ | $C^0$        | $C^{2+}$ | $C^{4+}$           |
| $e^-$ cedidos por $CH_4$        | $0 e^-$  | $2 e^-$  | $4 e^-$      | $6 e^-$  | $8 e^-$            |

La producción de  $CO_2$  es un indicador directo de la actividad biológica de los microorganismos, y permite el seguimiento de la degradación del contaminante y la evaluación de la eficiencia de remoción de un sistema de biofiltración. Comúnmente se asume que los productos finales de la oxidación de la fuente de carbono son principalmente

CO<sub>2</sub> y biomasa (células), así como sustancias poliméricas extracelulares (SPE) en un segundo lugar, además de otros metabolitos solubles. Las diferentes opciones de rastreo del carbono dificultan los balances de carbono y entre el 10% y 50% del carbono degradado queda sin rastreo. Por lo general, el carbono no rastreado en la salida del sistema se atribuye a biomasa que creció y quedó dentro, aunque esto es difícil de corroborar debido a la dificultad que implica la medición de biomasa en un biofiltro (Bordoloi et al., 2019).

La caracterización operativa de un biofiltro se puede realizar mediante la comparación de la eficiencia de remoción (ER), la capacidad de eliminación (CE) o el porcentaje de mineralización del compuesto tratado. La capacidad de eliminación se define como la concentración del compuesto degradado multiplicada por el flujo y dividido por el volumen del sistema. O bien, el flujo másico multiplicado por la eficiencia de remoción y dividido entre el volumen del filtro. Este parámetro proporciona información más precisa sobre la actividad microbiana real en un volumen determinado de biofiltro (Streese et al., 2003).

### 1.3 Factores que inciden en la operación de biofiltros

Factores como el tipo de lecho de soporte, concentración y suministro de nutrientes, pH del medio, porosidad, contenido de humedad, tiempo de residencia de lecho vacío, caídas de presión, suministro de oxígeno, concentración y tipo de compuesto contaminante, así como los efectos por los cambios de temperatura en el exterior, son parámetros estudiados para la optimización de los procesos biológicos de biofiltración (Fedrizzi et al., 2018; Hernández et al., 2015).

La comprensión actual del proceso de oxidación biológica de CH<sub>4</sub> y de los factores que inciden en su operación se han abordado principalmente por medio de la realización de experimentos en columnas de laboratorio; sin embargo, estos resultados pueden no ser extrapolables y aplicables a escala real, considerando que, a escala real, no se controlan variables como la temperatura externa o precipitación pluvial en el caso de biofiltros abiertos (Hettiarachchi et al., 2011).

#### 1.3.1 Tiempo de residencia de lecho vacío

Se considera que el tiempo de residencia de lecho vacío (TRLV) corresponde al tiempo en que la corriente gaseosa permanece en el biofiltro, asumiendo que el volumen del biofiltro se encuentra vacío, es decir, sin ningún material de soporte para la biomasa. Esta consideración es realizada por la dificultad para determinar la porosidad de los materiales o la biomasa crecida en el medio y con ello el volumen útil. Este tiempo se usa como criterio de diseño y de comparación de sistemas que operen bajo condiciones similares, a pesar de que no representa el tiempo real que el gas está dentro del sistema (Soreanu et al., 2020)

La solubilidad del gas por remover condiciona los TRLV aplicados en los biofiltros. Para corrientes con compuestos como el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), los tiempos requeridos pueden ser de 5 a 110 segundos, pero para corrientes con gases poco solubles como el CH<sub>4</sub>, los tiempos requeridos pueden ser de 2 a 80 minutos para obtener una mayor degradación

(Brandt et al., 2016). En la práctica, TRLV de varias decenas de minutos no son aplicables, debido al tamaño resultante del biofiltro y los costos de inversión asociados.

La solubilidad del CH<sub>4</sub> en agua depende del equilibrio gas-líquido el cual está definido por la Ley de Henry. A 25°C, la constante de Henry para el CH<sub>4</sub> es 22.7 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> atm<sup>-1</sup>, valor que refleja la preferencia del CH<sub>4</sub> en permanecer en la fase gaseosa. A modo de comparación, para una temperatura de 25°C, la constante de Henry del O<sub>2</sub> es 42.1 g O<sub>2</sub> m<sup>-3</sup> atm<sup>-1</sup>, del CO<sub>2</sub> es 1471.2 g CO<sub>2</sub> m<sup>-3</sup> atm<sup>-1</sup> y del H<sub>2</sub>S 3453.4 g H<sub>2</sub>S m<sup>-3</sup> atm<sup>-1</sup> (Sander, 2015).

Las limitaciones de transferencia de masa y las restricciones cinéticas son desafíos importantes para la biofiltración de CH<sub>4</sub>. Los contaminantes con limitación de transferencia de masa son generalmente hidrófobos (i.e metano), lo que reduce su biodisponibilidad para la biopelícula y por lo tanto generan bajo desempeño del sistema de biofiltración. Los contaminantes con limitación cinética son generalmente hidrófilos (i.e metanol, etanol y acetona) y por lo general, altas concentraciones de estos compuestos en la biopelícula podrían provocar toxicidad o crecimiento excesivo de biomasa y en consecuencia aumentos en la caída de presión del sistema (Khabiri et al., 2021). En el caso de biofiltración simultánea de compuestos con diferentes solubilidades o limitaciones de transferencia de masa y cinéticas, se deben encontrar los parámetros de operación adecuados que permitan los mejores resultados para el conjunto de compuestos a biofiltrar.

Khabiri et al. (2020) evaluaron biofiltros de 0.018 m<sup>3</sup> con lechos de soporte inorgánicos que trataron concentraciones bajas de CH<sub>4</sub> (entre 0.1% a 0.95 % y cargas de entrada de 7 a 63 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>) con un TRLV de 6 min y diferentes regímenes de suministro de nutrientes. La ER obtenida en los biofiltros evaluados por Khabiri et al. (2020) fue de 55 ± 7% para la carga de entrada de 7 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>, 67± 3% para 13 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> y 57± 4% para 63 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>. Trabajos realizados con lecho de soporte orgánicos fueron ejecutados por Huete et al. (2018) quienes operaron un biofiltro de composta de 0.34 m<sup>3</sup> a un TRLV de 23 min con concentraciones de 2.7 a 4.3% de CH<sub>4</sub> (cargas de entrada de 35 a 60 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>) obteniendo una ER del 70 ± 8% para la máxima carga de entrada probada.

Brandt et al. (2016) evaluaron tres biofiltros de 1.2 m de altura y 0.1 m de diámetro, cada uno con 0.078 m<sup>3</sup> de material de soporte que fue una mezcla de 60% de composta y 40% de material inorgánico que podía ser: anillos plásticos con esponja, escoria de alto horno de acería o vermiculita expandida. Los biofiltros trataron concentraciones de 0.17% a 3.63% de CH<sub>4</sub> (carga de entrada de 3± 0.8 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> a 148.8 ± 4.4 g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>) a 4 TRLV que fueron: 42.8, 29.5, 19.6 y 7.4 min. Para el mayor TRLV (42.8 min) la ER fue similar en los biofiltros con anillos plásticos y escoria de alto horno la cual fue de 56% y 16% para la concentración de CH<sub>4</sub> de 0.3% y 2.8% respectivamente. Para estas mismas concentraciones y TRLV (42.8 min), el biofiltro con vermiculita tuvo una ER de 95% y 50%. En el TRLV de 19.6 min y 7.4 min, la ER de todos los biofiltros disminuyó comparada con el tiempo de 42.8 min. Para 19.6 min el biofiltro de anillos plásticos tuvo una ER de 22% y 4% (0.4% y 3.0% de CH<sub>4</sub>) y para el TRLV de 7.4 la ER fue de 12% y 3% (0.4% y 2.7% de CH<sub>4</sub>). Los valores de ER para el

biofiltro con escoria de alto horno fueron similares al de anillos plásticos. Respecto al biofiltro con vermiculita la ER en el TRLV de 19.6 min fueron 34% y 12% (0.4% y 3.0% de CH<sub>4</sub>) y 28% y 14% (0.4% y 2.7% de CH<sub>4</sub>) para el TRLV de 7.4 min. Según reporta Brandt et al. (2016), una disminución por debajo del umbral de 19.6 min provocó disminuciones significativas en la oxidación de CH<sub>4</sub> para todos los biofiltros evaluados, mientras que el aumento de la concentración de CH<sub>4</sub> a la entrada causó menores disminuciones en la oxidación de CH<sub>4</sub>.

### 1.3.2 Temperatura

En todo proceso biológico, la temperatura es un parámetro operacional crítico. De manera general, la temperatura repercute en la actividad microbiana y en las tasas de degradación del contaminante. Temperaturas inferiores al rango óptimo de los microorganismos, inhiben el crecimiento por afectar estructuralmente a los lípidos y los mecanismos de transporte de la membrana celular. Elevadas temperaturas, disminuyen la solubilidad de gases, pueden inducir a la desnaturalización de proteínas y a la muerte celular. Así mismo, la temperatura sobre la comunidad microbiana puede influir sobre las vías metabólicas de degradación de los compuestos. La variación en el patrón de mineralización de la materia orgánica sugiere una adaptación microbiana a diferentes temperaturas, lo que se puede interpretar como un cambio en las vías metabólicas que podría dar como resultado diferentes puntos finales al carbón degradado. Por lo general a altas temperaturas se van a favorecer los procesos de mantenimiento (mayor producción de CO<sub>2</sub>) y no de crecimiento (Bordoloi et al., 2019).

El estudio de la importancia y el efecto de la temperatura en el proceso de oxidación del CH<sub>4</sub> en un biofiltro, se puede abordar al considerar la influencia tanto de la temperatura externa como los cambios de temperatura interna. La temperatura externa se relaciona con los cambios de estaciones y las variaciones entre el día y la noche, los cuales pueden ser modificados por el tipo de instalación (cubierta o a la intemperie) del biofiltro. La temperatura interna se asocia con la generación de calor producto de la reacción exotérmica de la oxidación del CH<sub>4</sub>. El gradiente de temperatura entre el biofiltro y el ambiente causa pérdida o ganancia de calor a través de las paredes.

Valores reportados por La et al. (2018) ejemplifican cómo las variaciones externas de temperatura (disminución hasta 12°C) redujeron en un 18% la eficiencia de remoción de CH<sub>4</sub>, así como situaciones en las cuales, temperaturas inferiores a -1°C inhibieron totalmente su oxidación. La temperatura óptima para la oxidación de CH<sub>4</sub> se considera en un rango de 20°C a 35°C (Bian et al., 2021; Gómez-Borraz et al., 2017; Hettiarachchi et al., 2011).

Nikiema et al. (2005) registraron la variación de temperatura en dos biofiltros de diferentes lechos de soporte, (FB1) inorgánico y (FB2) orgánico de composta; así mismo, evaluaron la importancia del nitrógeno en el proceso de biofiltración de CH<sub>4</sub> mediante la adición de diferentes concentraciones de nitrógeno (0.14 a 1 g l<sup>-1</sup> adicionado en la forma de iones de

nitrito). Los biofiltros de  $0.018 \text{ m}^3$ , operaron con un flujo de  $0.25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , TRLV de 4.2 min y concentraciones de  $\text{CH}_4$  entre 0.7% y 0.75%. En FB1 la diferencia de la temperatura de entrada y salida, fue constante e inferior a  $1^\circ\text{C}$  para las diferentes concentraciones de nitrógeno. En FB2, la variación de temperatura fue de  $2.8^\circ\text{C}$  entre la entrada y la salida, siendo mayor a la salida, y más evidente para concentraciones mayores de  $0.5 \text{ g l}^{-1}$  de nitrógeno. En el biofiltro de soporte orgánico se registró que la mayor temperatura estaba en la primera parte del reactor, y a medida que aumentaba la altura se registraba una menor temperatura, fenómeno asociado a una menor biodegradación del  $\text{CH}_4$  o menor concentración. La mayor ER obtenida en el biofiltro de lecho inorgánico fue de 41% y en el biofiltro con lecho orgánico fue de 19%.

Ciclos de variación de temperatura simulando estaciones del año fueron evaluados a escala laboratorio por Fedrizzi et al. (2018), en dos biofiltros (0.70 m de altura y 0.45 m de diámetro) de flujo continuo con composta y paja como lecho de soporte y concentraciones de  $\text{CH}_4$  de  $0.22 \text{ g m}^{-3}$  (0.03%) a un TRLV de 12.6 min. La concentración de  $\text{CH}_4$  a la salida fue medida con cromatografía de gases y la temperatura del medio se monitoreó con termopares ubicados en tres niveles de altura diferentes (5, 20 y 40 cm). Los biofiltros de  $0.0076 \text{ m}^3$  fueron sometidos a ciclos de enfriamiento para simular las condiciones de invierno. Sólo la parte superior del biofiltro se enfrió para simular una condición por la cual la escharcha penetra hasta cierta profundidad. Se indica que aun expuesto a bajas temperaturas ( $-5^\circ\text{C}$ ) en la parte superior, la temperatura en la zona inferior por donde ingresa el gas estuvo cercana a los  $18^\circ\text{C}$  y en el punto medio (20 cm de altura) hubo casos en que se mantuvo en  $13^\circ\text{C}$ . Para los diferentes ciclos de enfriamiento y calentamiento, la mayor temperatura se tuvo en la base del biofiltro y disminuyó con la altura. La variación de la eficiencia de remoción tuvo comportamientos fluctuantes, similares a la variación de temperatura presentadas en el biofiltro, siendo mayor a temperaturas altas (Temperatura superior a  $18^\circ\text{C}$ ) y disminuyendo con el enfriamiento del biofiltro (temperatura por debajo de  $0^\circ\text{C}$ ); así mismo, se identificó que la eficiencia se ve afectada por la duración de los ciclos de enfriamiento y calentamiento, ya que para variaciones de temperatura cortas hubo mayor estabilidad en la eficiencia de remoción.

Hettiarachchi et al. (2011) operaron un biofiltro a escala piloto de  $2.13 \text{ m}^3$  ( $2.4*2.4*0.37 \text{ m}$ ), sin ninguna cobertura que impidiera la infiltración de agua lluvia, empacado con composta de material forestal, con un flujo promedio de  $3.5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ . No hubo control de variaciones de temperatura ambiental, precipitación y evaporización. La concentración de gases, humedad y temperatura fueron monitoreados en 48 puntos, distribuidos en 16 puntos a tres profundidades (0.05, 0.2 y 0.3 m). Durante la operación del biofiltro en los meses de verano se registraron temperaturas de  $40^\circ\text{C}$  acompañadas de bajas tasas de oxidación. Se consideró que la elevada temperatura promovía el secado del lecho de soporte (no se reportan valores de humedad al interior del biofiltro) y la presencia de puntos calientes. En los meses de invierno, la oxidación de  $\text{CH}_4$  disminuyó al grado de considerar un biofiltro inactivo, lo anterior asociado a la baja temperatura ( $0^\circ\text{C}$  a  $-20^\circ\text{C}$ ) que se encontraba fuera

del intervalo adecuado para microorganismos metanótrofos. Para las estaciones de primavera y otoño, el biofiltro alcanzó una ER del 90%. Para observar el efecto del cambio de temperatura ambiental a lo largo del día, se monitoreó el biofiltro durante 12 horas continuas. Las variaciones de temperatura y humedad que se tuvieron durante las 12 horas de monitoreo fueron: en la madrugada 14°C y 46% de humedad, momento de la tarde sin lluvia y temperatura ambiental de 22°C, momento de la tarde después de ligera lluvia de 5 min, 17°C y 54% de humedad, tarde noche con lluvia 14°C y 79% de humedad y noche con condiciones iguales a la tarde noche con lluvia. La ER durante ese periodo de 12 horas fue de  $84 \pm 4.4\%$  y 46.1°C de temperatura máxima al interior del biofiltro (no se reporta en qué punto de los 48 sitios de monitoreo se registró la máxima temperatura). Estos resultados indican que el efecto de la variación diurna de la temperatura ambiental sobre la eficiencia de oxidación no es significativo. Hettiarachchi et al. (2011) concluye que una sola medición diaria de la ER es suficiente para determinar el rendimiento del biofiltro y es representativa del promedio diario. En contraposición, Spokas y Bogner (2011), quienes trabajaron con una cubierta de relleno sanitario, encontraron que, si no se consideraban las fluctuaciones diarias y en su lugar se usaban valores promedio diarios, se producirían errores significativos en la estimación del desempeño de remoción de metano.

Gómez-Borraz (2017) evaluó el efecto de cambios de temperatura en la CE de CH<sub>4</sub> a escala laboratorio en biofiltros operados en continuo. Los biofiltros fueron columnas de 5 cm de radio y 82 cm de altura. El material de lecho de soporte se llenó hasta una altura de 60cm. Los materiales usados fueron composta, esponja de poliuretano y esponja de poliuretano con adición de medio mineral con cobre (CuSO<sub>4</sub> 15µM). Los biofiltros operaron con un TRLV de 18 min y carga de entrada de CH<sub>4</sub> de 60.5 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>. Los biofiltros fueron sometidos a cambios controlados de temperatura en los que se pasó de 20°C a 28°C. El biofiltro con lecho de soporte de composta presentó un aumento en la CE después del incremento de temperatura. Sin embargo, la remoción disminuyó hasta valores de 50% después de 20 días de operar bajo la temperatura de 28°C. Esto se atribuyó a la compactación del material del lecho de soporte. La humedad de la composta se mantuvo en 54%. El biofiltro con esponja de poliuretano después del incremento de temperatura presentó una tendencia al aumento en la ER, pero ésta se vio afectada llegando a valores de solo 13% debido a que el biofiltro presentó un desprendimiento de biomasa. Para el biofiltro de poliuretano con adición de cobre no se observó una tendencia que permitiera relacionar los efectos del aumento de temperatura

Para evaluar el efecto de cambios de temperatura con diferentes tiempos de exposición, Gómez-Borraz (2017) operó el biofiltro de composta en continuo a una temperatura inicial de 20°C, la cual bajó hasta de 10°C durante periodos que mantuvo entre 1, 4, 8, 12 y 24 horas para después incrementar la temperatura a la condición inicial. El muestreo de gases se realizó cada 45 a 60 minutos y la temperatura fue monitoreada cada segundo. A mayor tiempo de exposición a una baja temperatura se observó un retardo en la recuperación de la capacidad de eliminación. Cuando el tiempo de exposición de 10°C duró 1 hora, la CE

pasó de  $40 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  a  $20 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  y se requirió de 2 horas después de subir la temperatura a  $20^\circ\text{C}$  para alcanzar nuevamente le CE de  $40 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . Respecto a la duración de exposición de 8 horas la CE pasó de  $50 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  a  $40 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  y se requirió de 3 horas para alcanzar la máxima CE. Para el mayor tiempo de exposición (24 horas) se requirieron de 5 horas para recuperar el sistema. Gómez-Borraz (2017) concluye que existe una importante relación entre la temperatura y la capacidad de eliminación del sistema de biofiltración; así mismo, resalta que existe un periodo de inhibición reversible en el metabolismo de los microorganismos cuando se exponen a bajas temperaturas y que es posible recuperar la CE antes del cambio de temperatura, pero requeriría de un tiempo según la duración del cambio de temperatura.

Estudios como Fedrizzi et al. (2018), Gómez-Borraz (2017) y Hettiarachchi et al. (2011), concluyen que variaciones de temperatura en ciclos cortos, como los presentados durante algunas horas del día y no prolongados (duración de días) no inciden en la eficiencia de remoción de  $\text{CH}_4$ . Se podría considerar que variaciones de temperatura en corto tiempo son amortiguadas por el biofiltro y, por lo tanto, la remoción no se ve afectada. Situación contraria se presentaría con cambios de temperatura prologados como los relacionados con las estaciones del año.

En la Tabla 1.2 y Tabla 1.3 se presentan diversas investigaciones realizadas sobre la biofiltración de  $\text{CH}_4$  y la evaluación de aspectos como el tipo de lecho de soporte, sistema de aireación, concentración de nutrientes y validación de modelos matemáticos. Resalta que el estudio de la variación de temperatura al interior del lecho de soporte por efectos del calor metabólico y su comportamiento en función de la altura y/o el radio no ha sido el eje principal de las investigaciones. Algunos estudios reportan el valor máximo de temperatura alcanzado por el sistema en algún momento de la operación o las diferentes temperaturas obtenidas con lechos de soportes orgánicos e inorgánicos. Si bien hay mediciones de temperatura en algunas de las investigaciones a distintos niveles del lecho de composta, estos registros no son presentados en los artículos y la discusión y conclusiones se basan en la disminución de la CE al tener bajas temperaturas ambientales o al secado del lecho de soporte cuando se tienen temperaturas altas.

Tabla 1.2 Recopilación de investigaciones realizadas orientadas a la eliminación biológica de CH<sub>4</sub> utilizando biofiltros a escala laboratorio (menor a 20 litros)

| Objetivo  | Tipo de biofiltro       | Dimensiones Biofiltro                             | Lecho de soporte   | Sitio de medición T.            | [CH <sub>4</sub> ] Inicial  | TRLV (min)                  | Flujo (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) | T. máxima alcanzada por el sistema  | CA (g CH <sub>4</sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | CE (g m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )      | ER (%)  | Autor                |
|---|-------------------------|---|--|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|---|---|--|---|----------------------|
| Evaluar el efecto de mezcla de materiales en la degradación de emisiones de CH <sub>4</sub> de rellenos sanitarios y cálculos para dimensionamiento de biofiltros | Biofiltro de lecho fijo | 0.24 m Ø<br>64 L lecho total                      | Fibra de madera de abeto, turba y composta                                   | No reporta el sitio de medición | 0.3% - 3.2%                 | 12.8                        | 0.3                                     | No reporta  | 12-130  | Biofiltro con mezcla<br>Lab: 40              | Biofiltro con mezcla<br>Lab: 39.5                       | Streese et al., 2003 |
|   |                         |   |  |                                 |                             |                             |   |   |   | Biofiltro multicapa<br>Lab: 30               | Biofiltro multicapa<br>Lab: 29.6                        |                      |
|   |                         |   |  |                                 |                             |                             |   |   |   | Biofiltro composta<br>Lab: 62                | Biofiltro composta<br>73.5                              |                      |
| Observar el efecto de la concentración de NO <sub>3</sub> en la oxidación biológica de CH <sub>4</sub>  | Biofiltro de lecho fijo | 1.35 m h<br>0.15 m Ø<br>0.65 cm e<br>18 L lecho   | Composta madura y material inorgánico  | Cada 22.5 cm de altura          | 4.6 a 4.9 g m <sup>-3</sup> | 4.3                         | 0.25                                    | Lecho de composta entre 24°C a 25°C ± 2.8°C.<br>Medio inorgánico 23°C a 27°C. | 65 a 70   | 12.5 lecho orgánico<br>29.2 lecho inorgánico | 19% lecho orgánico<br>41% lecho inorgánico              | Nikiema et al., 2005 |
| Estudiar la biofiltración de CH <sub>4</sub> con mezclas de lecho de soporte de materiales orgánicos e inorgánicos  | Biofiltro de lecho fijo | 1.2 m h<br>0.1 m Ø<br>1.0 m lecho<br>7.85 L lecho | Composta, Anillos plásticos con esponja, Escoria de alto horno y Vermiculita | -----                           | 0.17% a 3.63%               | 7.4<br>19.6<br>29.5<br>42.8 | -----                                   | -----   | 3.0 a 148.8   | -----  | Vermiculita 95% a 12.7%<br>Esponja y Escoria 56% a 3.5% | Brandt et al., 2016  |



| Objetivo   | Tipo de biofiltro       | Dimensiones Biofiltro                 | Lecho de soporte               | Sitio de medición T.           | [CH <sub>4</sub> ] Inicial | TRLV (min) | Flujo (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) | T. máxima alcanzada por el sistema  | CA (g CH <sub>4</sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | CE (g m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )   | ER (%)   | Autor                     |
|--|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------|---|---|---|---|----------|---------------------------|
| Determinar los fenómenos limitantes del proceso de biofiltración   | Biofiltro de lecho fijo | 0.54 m h<br>0.05 m Ø<br>1.1 L lecho   | Composta                       | 1 sensor al interior del lecho | 4%                         | 19         | 0.0036                                  | 16°C a 23°C   | 66  | 38 a 50   | 62 a 80% | Gómez-Borraz et al., 2017 |
| Estudiar los efectos de cambios de T ambiental y la aclimatación del lecho de soporte en la eficiencia de remoción | Biofiltro de lecho fijo | 0.45 cm h<br>0.45 cm Ø<br>7.6 L lecho | Diferentes mezclas de composta | 5, 20 y 40 cm                  | 0.22 g m <sup>-3</sup>     | 12.6       | 0.036                                   | 19°C en la base, 13°C en el medio.<br>T variable en el nivel superior por cambios de T externos a los que fueron sometidos los biofiltros | 1.05  | 1.68 µg CH <sub>4</sub> gdw <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> máx. para mezcla de composta con paja | 60%      | Fedrizzi et al., 2018     |

Tabla 1.3 Recopilación de investigaciones realizadas orientadas a la eliminación biológica de CH<sub>4</sub> utilizando biofiltros a escala piloto (mayor a 20 litros)

| Objetivo  | Tipo de biofiltro   | Dimensiones Biofiltro                                 | Lecho de soporte                                      | Sitio de medición T.                                 | [CH <sub>4</sub> ] Inicial | TRLV (min) | Flujo (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) | T. máxima alcanzada por el sistema   | CA (g CH <sub>4</sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | CE (g m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | ER (%)   | Autor                  |
|---|---|---|---|--|----------------------------|------------|---|--|---|---|--|------------------------|
| Evaluar el efecto de mezcla de materiales en la degradación de emisiones de CH <sub>4</sub> de rellenos sanitarios y cálculos para dimensionamiento de biofiltros | Biofiltro de lecho fijo con adición de agua a escala piloto | 4000 L lecho  | Fibra de madera de abeto, turba y composta            | No reporta el sitio de medición                      | 0.2%-2.5%                  | 12.8       | 24.96                                   | >50°C  | 9-112.5   | Biofiltro con mezcla Piloto:20          | Biofiltro con mezcla Piloto:22<br>Biofiltro composta Piloto:44 | Streese et al., 2003   |
|   |   |   |   |  |                            |            |   |  |   | Biofiltro multicapa Piloto:40           |  |                        |
|   |   |   |   |  |                            |            |   |  |   | Biofiltro composta Piloto:40            |  |                        |
| Evaluación de un biofiltro con diferentes puntos de aireación   | Biofiltro de lecho escurrido                                | 1.5-2.0 m h<br>0.50 m Ø<br>0.85m lecho<br>167 L lecho | Mezcla de Composta madura, papel y astillas de madera | Cuatro niveles a lo largo de la altura del biofiltro | 30%                        | -----      | 0.001<br>2 a<br>0.006                   | 50°C en el soporte de composta y 47°C en el soporte de astillas de madera con composta | 5.1 a 28  | -----                                   | 90 a 100%  | Haubrichs et al., 2006 |

| Objetivo   | Tipo de biofiltro   | Dimensiones Biofiltro                           | Lecho de soporte   | Sitio de medición T.                                      | [CH <sub>4</sub> ] Inicial                                  | TRLV (min)   | Flujo (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) | T. máxima alcanzada por el sistema | CA (g CH <sub>4</sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | CE (g m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | ER (%)         | Autor                      |
|--|---|---|--|---|---|--------------|---|------------------------------------|---|---|----------------|----------------------------|
| Calibración de un modelo matemático unidimensional considerando y operación de un biofiltro.   | Biofiltro de lecho fijo, abierto y sin control de precipitación | 0.35 m h<br>2000 L lecho                        | Composta madura  | 0.05, 0.20 y 0.35 m de la altura y en 16 puntos por nivel | Valor para simulación 400 g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> | -----        | 0.144                                   | 40°C en época de verano            | 3.5 m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>                     | -----                                   | 60 a 90%       | Hettiarachchi et al., 2011 |
| Evaluar el rendimiento de un biofiltro a escala piloto que trata emisiones de CH <sub>4</sub> de un estanque de efluentes lácteos durante 16 meses                         | Biofiltro de lecho fijo   | 1 m h<br>0.35 m Ø<br>70 L lecho                 | Suelo volcánico y perlita  | En la parte superior a 5 cm de profundidad                | 8%  | >120         | -----                                   | 32°C                               | 2 a 37  | 0 a 16                                  | 46%            | Pratt et al., 2012         |
| Operación de un sistema piloto para desorción de CH <sub>4</sub> en el efluente de un reactor UASB y oxidación del CH <sub>4</sub> recuperado por medio de un biofiltro de | Biofiltro de lecho fijo   | 1 m h<br>0.85 m Ø<br>0.6 m lecho<br>340 L lecho | Mezcla de composta fresca, madura y aclimatada en otro biofiltro | 0.25 m de altura y 0.06 m hacia el interior               | 2.7% y 4.3%   | 23           | 0.9                                     | 42°C                               | 35 y 56   | 60                                      | 70%            | Huete et al., 2018         |
| Tratamiento de emisiones diluidas de un relleno sanitario  | Biofiltro de lecho fijo y abierto                               | 4.85 m lecho<br>1400 L lecho                    | Composta madura  | 2 sensores por nivel a 20,50 y 70 cm                      | 8%  | De 114 a 840 | De 0.996 a 7.36                         | 50 a 60°C<br>46 a 49°C en invierno | De 3 a 22   | 2.68 a 13.4                             | Entre 55 a 73% | Fjelsted et al., 2020      |

### 1.3.2.1 Conductividad térmica de la composta

La conductividad térmica de la composta es una propiedad que se relaciona con la conducción de calor y por consecuencia con la temperatura que se pueda presentar al interior de un biofiltro. Adicionalmente, las propiedades térmicas son necesarias para desarrollar modelos de transferencia de calor y masa que puedan usarse para predecir las variaciones de temperatura dentro de un sistema de biofiltración.

Para la conducción de calor hay cuatro factores que afectan la tasa a la cual un material conduce calor ( $Q, W$ ); la constante de conductividad térmica ( $\lambda, W m^{-1}K^{-1}$ ), la sección transversal del material ( $A, m^2$ ), el grosor del material ( $L, m$ ) y la diferencia de temperatura entre un lado y otro ( $\Delta T, K$ ). Estos factores se relacionan en la ecuación de Fourier para la transferencia de calor (Ecuación 3).

$$Q = \lambda \cdot \frac{A}{L} \cdot \Delta T$$

Ecuación 3

En forma general, la constante de conductividad térmica de los sólidos es mayor que la de los líquidos, la que a su vez es mayor que la de los gases. Es decir, es más fácil transmitir calor a través de un sólido que a través de un líquido. Los sólidos que tienen altas conductividades térmicas son denominados conductores y aquellos con bajas conductividades o malos conductores de calor son denominados aislantes (Kern, 1992). Algunos valores de referencia de constantes de conductividad térmica son: Aluminio  $209.3 W m^{-1} K^{-1}$ , hierro  $80.2 W m^{-1} K^{-1}$ , agua  $47$  a  $58 W m^{-1} K^{-1}$ , vidrio  $0.60 W m^{-1} K^{-1}$ , alcohol  $0.16 W m^{-1} K^{-1}$ , madera  $0.13 W m^{-1} K^{-1}$  y aire  $0.024 W m^{-1} K^{-1}$

La conductividad térmica de la composta depende de factores como el contenido de materia orgánica, contenido de agua y densidad aparente (Waszkielis et al., 2014). Es una propiedad que puede cambiar con el tiempo. Por ejemplo, la compactación aumenta la conductividad térmica porque aumenta la densidad aparente al reducirse la porosidad. Respecto al contenido de agua y la conductividad térmica, es mejor un suelo con vacíos llenos de agua a un suelo con vacíos llenos de aire, debido a que la conductividad es mejor en líquidos que en gases. Chandrakanthi et al. (2005) en un estudio que evaluó la conductividad térmica de muestras de composta con diferentes densidades aparentes y contenidos de humedad, identificaron que la conductividad térmica de la composta es mayor cuando se presenta un aumento de la fracción volumétrica que contiene agua y disminuye cuando la fracción volumétrica de aire es mayor, lo que se relaciona directamente con el grado de saturación de agua ( $\phi$ ) de la muestra. El grado de saturación se define como la fracción volumétrica de agua en el total de volumen de vacíos (Ahn et al., 2009). Lo anterior expresa que a mayor grado de saturación mayor fracción de vacíos es ocupada por agua y por lo tanto la conductividad térmica de la muestra se incrementa, exponiendo una relación lineal entre ambos parámetros. Con el trabajo de Chandrakanthi

et al. (2005) se puede por lo tanto determinar un valor de conductividad térmica en función del contenido de humedad el cual a su vez se relaciona con el grado de saturación.

En la Tabla 1.4 se presentan valores de conductividad termina reportados para diferentes tipos de composta, densidad, contenidos de humedad y grados de saturación.

Tabla 1.4 Valores de conductividad térmica ( $\lambda$ ) para composta reportados en literatura

| Autor   | Muestra de composta  | Constante de conductividad térmica ( $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ )                                 |
|---|--|--|
| <b>Waszkielis et al. (2014)</b><br>*Valor de $\lambda$ según $\omega$               | Lodo de agua residual (40%) y ensilaje de paja de maíz (60%)           | $\lambda = 0.27, 0.37, 0.45, 0.31$<br>$\omega = 66, 68, 69, 71$                            |
| <b>Klejment et al. (2008)</b><br>*Valor de $\lambda$ según $\rho$ humedad constante | Residuos municipales   | $\lambda = 0.25$ y $0.30$<br>$\rho = 442$ y $600\ kg\ m^{-3}$<br>$\omega = 40\%$ aprox.    |
| <b>Klejment et al. (2008)</b><br>*Valor de $\lambda$ según $T$ densidad constante   | Residuos municipales   | $\lambda = 0.20, 0.25$ y $0.30$<br>$T = 40, 50$ y $60^\circ C$<br>$\rho = 600\ kg\ m^{-3}$ |
| <b>Chandrakanthi et al. (2005)</b><br>*Valor de $\lambda$ según $\phi$              | Abono de hojas mezclado con estiércol de un zoológico municipal        | $\lambda = 0.15$ a $0.64$<br>$\phi = 0.25$ a $0.80$  |
| <b>Agnew et al. (2003)</b>  | Abono de lodos   | $\lambda = 0.21$ a $0.80$  |
| <b>Agnew et al. (2003)</b>  | Abono de aserrín con cascarilla de arroz y estiércol de pollo y ganado | $\lambda = 0.69$   |
| <b>Iwabuchi et al. (1999)</b><br>*Valor de $\lambda$ según $\omega$                 | Aserrín con estiércol de lechería                                      | $\lambda = 0.05$ y $0.20$<br>$\omega = 0$ y $44.2\%$                                       |

$\lambda$  conductividad térmica,  $\rho$  densidad,  $\phi$  grado de saturación,  $\omega$  humedad,  $T$  temperatura

### 1.3.3 Oxígeno

Como se mencionó anteriormente, las mezclas de aire/metano son explosivas entre los valores de 5% y 15% de  $CH_4$ , por lo que este aspecto debe ser considerado, independientemente de las características cinéticas y estequiométricas de la reacción. Haubrichs et al. (2006) indican que una adecuada aireación en el proceso de biofiltración

permite mayores tasas de oxidación de CH<sub>4</sub>. En su investigación se manejó una relación de 2.5 moles de O<sub>2</sub> por cada mol de CH<sub>4</sub>, obteniendo una remoción del 92%, situación que cambió al suministrar 2 moles de O<sub>2</sub> por mol de CH<sub>4</sub> conforme a la relación estequiométrica, lo cual permitió una eficiencia de remoción del 88%.

Una aireación en múltiples niveles fue evaluada a escala laboratorio en columnas de flujo continuo por Farrokhzadeh et al. (2017) mediante un diseño de superficie de respuesta en que se hicieron combinaciones de uno, dos o tres puertos de inyección y flujos de CH<sub>4</sub> entre 6 a 15 ml min<sup>-1</sup> (Carga de CH<sub>4</sub> de 22 a 66 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>). Los resultados obtenidos indican que una columna de biofiltración con composta como material de soporte, con dos niveles de aireación y TRLV de 67.6 min presenta un rendimiento constante durante el tiempo de operación, obteniendo eficiencias de remoción promedio de 85%.

#### 1.3.4 Nutrientes

Los nutrientes son compuestos adicionales a la fuente de carbono necesarios para permitir el metabolismo de los microorganismos. Los más importantes son nitrógeno, fósforo y azufre, además de ciertos metales traza. Su adición puede realizarse por aspersion en la parte superior en el caso de biofiltros de composta o con un flujo continuo en el caso de biolavadores o biofiltros de lecho escurrido. El suministro de nutrientes es determinante en el caso de usar lechos de soporte inorgánicos, mientras que, en el caso de uso de soportes orgánicos, como la composta, que son en sí fuente de nutrientes, se puede hacer adición controlada y con frecuencias determinadas para garantizar la presencia de nutrientes durante la operación a largo plazo del sistema.

En un sistema con nutrientes limitados, pero con una fuente continua de carbono, la población activa de microorganismos dirigirá las rutas metabólicas hacia el catabolismo para usar la energía en mantenimiento y se restringirá el crecimiento. En caso de existir una ventaja aparente, o condiciones que aumenten los requisitos de mantenimiento, los microorganismos podrían asignar la fuente de carbono y recursos hacia vías metabólicas en las que el objetivo sea la producción de SPE (Bordoloi et al., 2019). Las SPE son sustancias de alto peso molecular que consisten principalmente en polisacáridos. Se ha supuesto que los SPE se producen para evitar la acumulación de formaldehído en caso de falta de nutrientes (Streese et al., 2003). En un lecho empacado, la acumulación de SPE contribuirá a la reducción de la porosidad y por lo tanto a un incremento en la caída de presión.

Los lechos de soporte orgánicos son una fuente de nutrientes para el proceso de oxidación, sin embargo, se puede hacer una adición ocasional de alguno de los nutrientes con el objetivo de mantener activos los microorganismos presentes en el biofiltro. La frecuencia y cantidad de solución nutritiva debe considerar el efecto de inhibición que pueda ocasionar el exceso de alguno de los nutrientes suministrados.

### 1.3.5 Caída de presión, tipos de empaque y distribución del gas

Las tasas de crecimiento microbiano y la capacidad de oxidación del  $\text{CH}_4$  se ven afectadas por las propiedades del material del lecho de soporte. El tipo de material (orgánico o inorgánico), el tamaño y la forma de los elementos estructurales del material determinan la porosidad total, la capacidad de retención de agua, el área de superficie específica disponible para el crecimiento de microorganismos y la capacidad de adhesión o retención de éstos. La selección del material del lecho de soporte para biofiltros debe facilitar el flujo de la corriente gaseosa permitiendo la difusión del contaminante hasta los microorganismos y tener una compactación reducida por efectos de secado (Pawlowska et al., 2011).

La caída de presión es un parámetro de seguimiento de la operación de biofiltros al ser un indicador de la circulación del flujo de gas a través del medio filtrante. Al mantenerse constante el flujo y TRLV se pueden comparar los valores de caída de presión en el tiempo y asociarse a la formación de taponamientos, canalizaciones de flujo preferente, compactación o exceso de humedad que dificulte el paso de la corriente gaseosa. Existen arreglos que reducen estos fenómenos, buscando mantener una caída de presión relativamente constante a lo largo de la operación del biofiltro (Gómez Cuervo et al., 2016): dividir la altura del lecho en dos o más secciones en serie, mezclar materiales orgánicos e inorgánicos, adoptar una distribución de partículas del material de soporte, aplicar cierta frecuencia y forma de adición de agua, invertir el sentido del flujo de agua y gas, entre varias.

La mezcla de diferentes materiales orgánicos en un mismo biofiltro fue evaluada por Streese et al. (2003) a nivel laboratorio. Se usaron tres columnas, cada una dividida en dos secciones que contenían  $0.018 \text{ m}^3$  de lecho de soporte. El material del lecho de soporte consistió para un biofiltro en una mezcla de volúmenes iguales de fibras de madera de abeto, turba y composta de desechos de jardín. La fibra de madera fue seleccionada como agente estructural para evitar la obstrucción del lecho y mejorar la distribución del gas, la turba para el almacenamiento de agua y la composta para el suministro de nutrientes. Para el segundo biofiltro, el material de lecho de soporte consistió en composta con capas de 2 cm distribuidas cada 15 cm entre capas de fibras de madera, identificado como biofiltro multicapa; las capas de fibras de madera se usaron como capas de distribución de gas. Adicionalmente se operó un biofiltro de control que consistía en solo composta como material de lecho de soporte. Cada biofiltro se operó a un TRLV de 14 min, un flujo saturado en agua de  $0.15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  y una concentración de  $\text{CH}_4$  de 0.3 a 3.2% (Carga de entrada 12 a  $130 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ). El flujo fue suministrado de forma descendente, lo cual según comentan los autores, resultó favorable respecto a la distribución uniforme de la humedad del material. Después de 2 meses de aclimatación, todos los biofiltros mostraron CE estables entre 15 y  $20 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  a una concentración de 1.8% de  $\text{CH}_4$ . El biofiltro de mezcla de materiales después de los 100 días de operación alcanzó CE de  $30 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  y el biofiltro multicapa de  $25 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . El biofiltro de sólo composta presentó las máximas CE pasado los 100 días de operación con un valor de  $40 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . A los 200 días de operación los

biofiltros de mezcla de materiales y el biofiltro multicapa tenían una CE de  $30 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , el biofiltro de sólo composta registró una disminución de su CE al tener valores de  $15 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , situación que atribuyen los autores a la formación de sustancias exopoliméricas (visibles dentro del biofiltro) que pudieron generar obstrucciones en el material e impedir el flujo de gas. Hacia el final de la operación (día 300) la CE en el biofiltro de mezcla de materiales fue de  $20 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , en el biofiltro multicapa de  $15 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  y en el de control de  $10 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . El biofiltro con mezcla de materiales produjo resultados más satisfactorios que las otras configuraciones, al presentar una CE estable a largo plazo lo que se puede atribuir a que la mezcla de materiales impidió la obstrucción. Dentro de los resultados presentados por los autores no está el comportamiento de los biofiltros respecto a la caída de presión, información que sería de gran utilidad considerando la operación a largo plazo que tuvieron los biofiltros.

Pawlowska et al. (2011) a escala laboratorio operaron durante seis meses cuatro columnas de biofiltración de 1 m de altura y 0.05 m de diámetro interno, las cuales fueron llenadas hasta una altura de 0.80 m con diferentes materiales de lecho de soporte: composta de residuos sólidos urbanos, sustrato hortícola orgánico, composta con zeolita y perlita y composta con bentonita y perlita. En la parte inferior de las columnas se colocó una capa de grava para garantizar que el gas tuviera un ingreso uniforme al lecho de soporte seguida de una rejilla plástica. Cada columna contaba con 8 puertos de muestreo distribuidos cada 10 cm a lo largo de la columna. Estos puertos fueron usados por los autores para reportar el promedio de las mediciones de tres meses del cambio de concentración de gases ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ) respecto a la altura de la columna. En este estudio, el aire (fuente de  $\text{O}_2$ ) y el gas  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  ingresaban por la parte inferior de las columnas de biofiltración. Los biofiltros operaron sin una tapa lo cual hubiera permitido la difusión del oxígeno atmosférico para un biofiltro alimentado pasivamente; sin embargo, el gas ascendente lo impedía. El flujo de gas para cada columna fue de  $0.0012 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  con 7.5% de  $\text{CH}_4$  y 1.3 h de TRLV (Carga de entrada  $62 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ). La capacidad de eliminación de todas las columnas de biofiltración mostró una tendencia a aumentar con el tiempo y el proceso no se inhibió después de ser operado por seis meses. El biofiltro con sólo composta a los tres meses de operación alcanzó una CE de aproximadamente  $52 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  y a los seis meses aumentó a  $62 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  (ER del 100%). En el caso del biofiltro con sustrato hortícola la CE a los tres y seis meses fue  $44 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  y  $52 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  respectivamente, siendo el material que mostró menores eficiencias. Los biofiltros de mezcla de composta con zeolita y perlita y composta con bentonita y perlita tuvieron CE similares entre ellos y constante de  $53 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . Pawlowska et al. (2011) comentan que después de los seis meses de operación no se observó una disminución de la CE lo cual se pudo deber a la no formación de SPE. Este estudio no reporta si los biofiltros presentaron variación en la caída de presión.

En tres biofiltros, cada uno de  $0.078 \text{ m}^3$  (1.2 m de altura y 0.1 m de diámetro) y con diferentes materiales de soporte que consistieron en mezclas de 60% de composta de residuos sólidos y 40% de material inorgánico: anillos plásticos con esponja, escoria de alto



horno de acería o vermiculita expandida (los detalles de flujos, concentraciones, TRLV y CE se presentan en la sección 1.3.1) Brandt et al. (2016) controlaron la caída de presión durante 283 días de operación mediante medidores de presión diferencial utilizando agua como fluido manométrico. Determinaron la permeabilidad del medio de empaque mediante la ecuación de Darcy, la cual relaciona la caída de presión, longitud del medio de empaque, viscosidad del fluido y la velocidad superficial. Los autores reportan que durante toda la operación de los biofiltros se observó una compactación gradual del lecho de soporte. Al final del experimento el biofiltro con composta y anillos plásticos se compactó 163 mm por metro, el de composta y escoria de alto horno 102 mm por metro. El biofiltro con mezcla de composta y vermiculita expandida presentó la mayor compactación, 224 mm por metro y la caída de presión en este biofiltro varió entre 2.9 a 19.5 cm columna de agua  $m^{-1}$ . En el biofiltro de composta y escoria de alto horno, la caída de presión máxima fue de 1.0 cm columna de agua  $m^{-1}$  y en el de composta con anillos plásticos el manómetro no registró cambios de caída de presión.

Huete et al. (2018) operaron durante 168 días un biofiltro de composta de 0.34  $m^3$  (0.60 m de altura de lecho y 0.85 m de diámetro) que trató concentraciones de  $CH_4$  a la entrada de 2.3 a 4.3% (carga de entrada entre 35 y 56  $g CH_4 m^{-3} h^{-1}$ ) con un TRLV de 23 min obteniendo una capacidad de eliminación promedio de 42  $g m^{-3} h^{-1}$ . El control de la caída de presión se hizo por medio de un manómetro diferencial de agua. El biofiltro operó con una caída de presión total de 29.4 cm de columna de agua  $m^{-1}$  los 12 primeros días y posteriormente aumentó a 37.2 cm de columna de agua  $m^{-1}$  debido a la compactación del lecho filtrante. Huete et al. (2018) hacen referencia al efecto de adición de agua por la parte superior del biofiltro, la cual se realizó con el objetivo de mantener la humedad del medio y que sin embargo no resultó en una humectación homogénea en todo el medio filtrante. Además, se menciona que pruebas de granulometría llevadas al final de la operación del sistema mostraron que la granulometría tuvo cambios con respecto a la inicial. El tamaño de partículas del material ubicado en la parte superior fue mayor ( $> 9mm$ ) al de la parte inferior (0.42 mm). Por lo tanto, la humedad no homogénea pudo generar una fragmentación de las partículas de composta, cambiando la porosidad del medio en diferentes zonas y aumentando por consiguiente la caída de presión.

Nikiema et al. (2005) operaron durante seis meses dos biofiltros de 0.018  $m^3$  (1.35 m de altura de lecho y 0.15 m de diámetro). Cada biofiltro incluía tres capas idénticas de 0.45 cm de alto. El flujo de entrada fue 0.25  $m^3 h^{-1}$  (detalles sobre el lecho de soporte, concentraciones, temperatura, TRLV y CE se presentan en la sección 1.3.2). Ambos biofiltros tuvieron un material de lecho de soporte diferente, uno orgánico que consistió en composta y otro inorgánico que por confidencialidad no es especificado. Las caídas de presión durante la etapa inicial fueron nulas en ambos biofiltros. Posteriormente el biofiltro de material orgánico mantuvo caídas de presión inferiores a 0.03 cm de columna de agua  $m^{-1}$  hasta finalizar el tiempo de experimentación. Respecto al biofiltro con material inorgánico durante el tiempo de experimentación no se registró una caída de presión significativa,

situación que Nikiema et al. (2005) toman como beneficiosa para considerar que este material es adecuado para la biofiltración.

Adicional a la caída de presión, se debe considerar el sistema de distribución del gas para que éste llegue a todo el volumen útil del biofiltro. Trabajos realizados por Fjelsted et al. (2020) a escala piloto para tratar gases de un relleno sanitario, consideraron un sistema de distribución de gas que consistió en una capa de grava de 0.30 a 0.50 m de espesor, construida de manera irregular con pendientes de 2:1, para drenar y minimizar el efecto capilar del agua de lluvia que pudiera infiltrarse debido a que el biofiltro era abierto (14 m<sup>3</sup> de composta). Dentro de la capa de grava se instalaron tres tuberías de alimentación horizontales a lo largo del biofiltro, de las cuales derivaban tres puntos de liberación de gas espaciados 1 m entre cada uno. Por otra parte, este sistema de biofiltración contó con cuatro niveles de placas horizontales de poliestireno expandido, instaladas contra las paredes del biofiltro con el fin de evitar efectos de pared en el flujo del gas, por ser las zonas que menor resistencia al paso del gas.

### 1.3.6 Humedad

El contenido de agua del material de empaque es fundamental para la actividad microbiana y por ende para la reducción del contaminante a biofiltrar. Los cambios en el contenido de agua del material de lecho de soporte son resultado en mayor medida de parámetros operativos (i.e. adición de agua, velocidad de la corriente gaseosa, grado de saturación de la corriente gaseosa) y en menor medida por la cinética microbiana (generación de calor y producción de agua por la reacción de oxidación) (Bordoloi et al., 2019).

Debido al calor generado durante la oxidación de compuestos orgánicos hay una elevación de temperatura al interior del biofiltro. Si la temperatura del aire aumenta, la humedad relativa del aire baja, aumentando la capacidad del aire para extraer agua, la cual es obtenida del material de empaque ocasionando el secado en el biofiltro. La corriente gaseosa de salida del biofiltro puede estar saturada como lo está al momento de la entrada, pero esto se debe a que globalmente existe remoción del agua que hay en el biofiltro (agua suministrada por riego y agua producida por la reacción de oxidación) y por ende un secado del medio (Morales, 1999).

El agua necesaria para aumentar el contenido de humedad se puede suministrar por aplicación superficial controlada en la parte alta del lecho y con la saturación de agua de la corriente de mezcla gaseosa. Parte del agua también es suministrada por la actividad microbiana y es determinada mediante la cuantificación de moles generadas por moles oxidadas; sin embargo, esta generación en algunas ocasiones es considerada como despreciable (Hettiarachchi et al., 2011). Si bien, el volumen de agua generado durante la reacción de oxidación puede ser de un orden de magnitud menor al volumen de agua que se suministra de manera externa, considerarlo como despreciable ignoraría parte del proceso de biofiltración y un adecuado balance tanto de agua como de carbono. Así mismo,

no considerar el agua generada por la reacción, ignoraría el efecto de alivio a la limitación de agua para la actividad microbiana (Ng et al., 2015).

La humedad del medio es importante porque, para que la reacción biológica pueda ocurrir debe existir un contenido de humedad adecuado (humedad relativa en equilibrio con el soporte húmedo) (Gómez Borraz, 2017). La actividad biológica desarrollada en el biofiltro está condicionada en una parte por la actividad del agua en el sistema. La actividad del agua ( $A_w$ ) indica el agua químicamente disponible de una sustancia, en este caso del medio filtrante. Para los procesos biológicos existe un valor de  $A_w$  a partir del cual puede haber crecimiento de microorganismos.  $A_w$  no es igual al contenido de agua en el medio, sino que es un concepto termodinámico relacionado con la disponibilidad de agua en un ambiente para actuar como solvente y participar en reacciones químicas o bioquímicas (Desai et al., 2021).

El crecimiento microbiano ocurre en una  $A_w$  de agua entre 0.85 y 0.99 (Morales, 1999). Para valores de 40% y 60% de humedad en materiales de composta se tienen valores de  $A_w$  correspondientes al rango de 0.97 y 0.997, los cuales se han reportado como óptimos para el metabolismo bacteriano (Morales et al., 2003).

Porcentajes de humedad en la composta de 40% a 65% han sido considerados como adecuados para la operación de biofiltros (Huete et al., 2018). Un contenido de agua mayor al 70% debe evitarse con el fin de no promover zonas anaerobias y no disminuir el área superficial, lo cual produce problemas de transferencia de masa en el biofiltro (Bian et al., 2021; Soreanu et al., 2020; Morales, 1999).

En trabajos realizados por Huete (2017) en un biofiltro de composta que recibió una corriente gaseosa de  $0.9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  con concentraciones de 2.7% y 4.3% de  $\text{CH}_4$  se informa que durante los 30 primeros días de operación se adicionaron 2 ml por  $\text{m}^3$  de gas tratado. Después de esos días se requirió aumentar la adición de agua en un rango de 20 a 40 ml por  $\text{m}^3$  de gas tratado para conservar una humedad del 40% y evitar una reducción de la capacidad de eliminación de  $\text{CH}_4$ .

#### *1.3.6.1 Ecuación de Antoine*

La presión de vapor es una característica dependiente de la temperatura de líquidos puros y de mezclas. Esta propiedad termodinámica se puede caracterizar a través de varios modelos, siendo la Ecuación de Antoine la que mayor destaca. La Ecuación 4 es la ecuación de Antoine y representa la relación termodinámica no lineal entre la presión de vapor de equilibrio ( $P_v$ ) y la temperatura ( $T$ ). Los parámetros A, B y C (Tabla 1.5) son constantes numéricas relacionadas con la entalpía y entropía de vaporización (Calle Arroyo et al., 2021)

Por medio de la Ecuación 4 y la ecuación de gases ideales, es posible determinar la masa de agua presente en una corriente de gas a diferentes temperaturas. La determinación de la masa presente en el gas puede ser usada a nivel de operación de biofiltros para realizar

balances de masa y llevar un control de los requerimientos de agua durante la biofiltración de CH<sub>4</sub>.

$$\log_{10}P_v = A - \frac{B}{(T + 273.15) - C} \quad \text{Ecuación 4}$$

Tabla 1.5 Presión de vapor y parámetros de correlación (Poling et al., 2000)

| Compuesto        | A       | B        | C      | Pv min (Bar) | T min (K) | Pv máx (Bar) | T máx (K) |
|------------------|---------|----------|--------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| H <sub>2</sub> O | 5.11564 | 1687.537 | 230.17 | 0.01         | 273.20    | 16           | 437.20    |
| N <sub>2</sub>   | 3.61947 | 255.680  | 266.55 | 0.08         | 60.81     | 2            | 83.65     |
| O <sub>2</sub>   | 3.81634 | 319.0130 | 266.70 | 0.02         | 64.29     | 2            | 97.20     |
| CH <sub>4</sub>  | 3.76870 | 395.7440 | 266.68 | 0.15         | 92.64     | 2            | 120.59    |

#### 1.4 Modelos matemáticos para biofiltros

El desarrollo de expresiones matemáticas que permitan predecir el comportamiento de sistemas biológicos en reactores, requiere de una comprensión de los fenómenos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en el sistema y de la capacidad de expresar esto mediante funciones matemáticas. Al considerar un mayor número de variables en los modelos se espera una mayor exactitud en las predicciones de capacidad de eliminación, eficiencia o cambios de temperatura, humedad y evaporación, entre otros. Sin embargo, la complejidad del modelo se incrementa.

La modelación de los sistemas se puede abordar desde una descripción molecular donde los átomos y moléculas son una consideración básica y el modelo se considera fundamental o desde el enfoque en el que se considera el fluido y sólido como un continuo y no como partículas individuales generando un modelo fenomenológico, en el que la mayor importancia del estudio está en la cuantificación del fenómeno y no en sus causas fundamentales (Lobo Oehmichen, 2007).

El desarrollo de modelos matemáticos requiere la formulación de supuestos, delimitación de las dimensiones de análisis y determinación de condiciones iniciales que simplifiquen el proceso biológico a modelar. Supuestos como el número de fases que hay en el sistema (gaseosa, sólida, líquida y biopelícula), existencia de un equilibrio térmico, sitio de la reacción química y biológica, ausencia o consideración de limitación por fenómenos de transferencia de masa, condiciones de crecimiento de biomasa, análisis en una, dos o tres

dimensiones, estado del proceso biológico (estacionario o transitorio) y consideración del efecto del tiempo, son algunos de los criterios que se tienen presentes al momento de la formulación de los modelos. Estos supuestos y delimitaciones dependerán del objetivo de la modelación.

Adicional a la expresión matemática y su aplicación para la simulación de los procesos biológicos, se requiere previamente de la calibración y validación de los modelos desarrollados. Esta se realiza mediante un conjunto de experimentos que permiten la obtención de datos iniciales que serán usados para la calibración y experimentos independientes cuyos datos permitirán la validación de las predicciones que el modelo es capaz de realizar.

Se han desarrollado modelos para biofiltros de composta que tratan diferentes compuestos y con diferentes objetivos de modelación. Morales et al. (2003) desarrollaron un modelo para describir el proceso de secado y su efecto sobre el rendimiento del biofiltro al tratar tolueno como contaminante y con turba como material de soporte. Se consideraron aspectos como el calor generado por la reacción química y por evaporación, así como la tasa de evaporación y la generación de agua durante el proceso de oxidación. Como resultado de esta investigación se obtuvo una relación para estimar la velocidad máxima de secado bajo diferentes condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad de flujo, así como la capacidad de eliminación. El modelo de Morales et al. (2003) considera dos fases, una fase gaseosa que comprende al contaminante (Tolueno), vapor de agua y aire seco, y una segunda fase que agrupa el lecho de soporte, agua y el contaminante disuelto. Este conjunto de fases sólido y líquido se considera biológicamente activo debido a que la población microbiana está en ellas y no se considera como una fase independiente. De los supuestos de este modelo es considerar un flujo pistón y la biomasa constante durante todo el periodo.

Para la validación del modelo, Morales et al. (2003) ejecutaron dos experimentos en columnas de biofiltración de 0.13 m de alto con una altura de lecho de 0.08 m. El experimento uno (Exp 1) tuvo un TRLV de 0.8 min,  $3 \text{ g m}^{-3}$  de concentración de tolueno,  $32^\circ\text{C}$  de temperatura del gas de entrada y humedad relativa de 45%. Las condiciones del segundo experimento (Exp 2) tuvieron los mismos valores de TRLV y de concentración de tolueno,  $38.5^\circ\text{C}$  de temperatura del gas de entrada y humedad relativa de 50%. Los resultados obtenidos mostraron que el contenido de agua del lecho de soporte disminuyó rápidamente en ambas condiciones. Se tuvo una reducción del 50% en un tiempo de 100 h cuando la humedad relativa fue del 45% y en 65 h cuando la humedad relativa fue de 50%. La tasa de evaporación del agua fue  $10 \text{ mg}_{\text{agua}} \text{ g}_{\text{turbaseca}}^{-1} \text{ h}^{-1}$  y  $18 \text{ mg}_{\text{agua}} \text{ g}_{\text{turbaseca}}^{-1} \text{ h}^{-1}$  para los experimentos 1 y 2, respectivamente. En ambos experimentos, el agua producida por la oxidación del tolueno fue 50 veces menos que la tasa de evaporación. La capacidad de eliminación inicial en el Exp 1 fue de  $30 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  y se mantuvo durante aproximadamente 75 h para posteriormente reducirse a  $20 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  después de las 150 horas de

experimentación y llegar a ser nula pasadas las 250 horas. En el Exp 2 la CE inicial fue de  $60 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  la cual se mantuvo hasta 50 h después de iniciar el experimento y se redujo rápidamente hasta ser nula antes de las 250 horas. El modelo predijo que la CE sería nula en el Exp 1 a las 300 horas y en el Exp 2 a las 190 horas.

Hettiarachchi et al. (2011) desarrollaron un modelo de una dimensión con el objetivo de contar con una herramienta para seleccionar el material de lecho de soporte, la altura del lecho y el área superficial requerida. El modelo consideró el flujo de calor, agua y gas, la evaporación e infiltración de agua. Los componentes gaseosos se estimaron a partir del transporte de gas en medios porosos. Se usó la ecuación de Fick para estimar el flujo difusivo y la ecuación de Darcy para estimar el flujo advectivo. El modelo incluye el calor de reacción de la oxidación del  $\text{CH}_4$  y la transferencia de calor tanto por conducción como por convección. Se supuso un equilibrio térmico entre el aire, el agua y la fase sólida. Para la modelación de la dinámica de humedad se usó la ecuación de Richard la cual describe el movimiento de la humedad en medios porosos insaturados y se adicionó a esta ecuación el término de agua producto de la reacción química y el flujo difusivo de vapor de agua. Se asume que el flujo advectivo de vapor de agua es insignificante comparado con la difusión. El flujo de evaporación se determinó con la fórmula de Penman modificada. Respecto a la reacción microbológica se describe la reacción de oxidación mediante la cinética de Monod de doble sustrato y la modifica con factores de corrección de humedad y temperatura. El modelo fue calibrado con datos experimentales realizados en columnas de biofiltración y validado con datos obtenidos en la operación de un biofiltro de  $2.13 \text{ m}^3$ .

Dentro del conjunto de simulaciones realizadas por Hettiarachchi et al. (2011) se tiene la simulación de eventos de lluvia. Los resultados del modelo indicaron que un evento aislado de lluvias fuerte disminuyó la ER al 63.3% y una lluvia continua durante un período de 3 días disminuyó la ER al 58.3%. Después de los eventos de lluvia, la ER aumentó al 91% debido a un contenido de humedad favorable. Otra simulación fue la realizada para determinar el efecto de bajas temperaturas. El primer escenario de simulación fue asumir una temperatura ambiental inicial de  $15^\circ\text{C}$  la cual bajó gradualmente a  $-20^\circ\text{C}$ , se obtuvo una ER simulada inicial de 90% que disminuyó a 0% cuando la temperatura fue de  $-20^\circ\text{C}$ . El segundo escenario fue considerar una temperatura ambiental inicial de  $15^\circ\text{C}$  y un descenso hasta  $-10^\circ\text{C}$ , para este caso la eficiencia varía de 90% a 50%. El último escenario fue una temperatura inicial de  $15^\circ\text{C}$  y un enfriamiento hasta  $0^\circ\text{C}$ , obteniendo una ER que varió de 90% a 70%. Los autores de este modelo no reportan información estadística comparando los datos obtenidos experimentalmente y los predichos en las simulaciones.

Gómez-Borraz et al. (2017) desarrollaron un modelo con el fin de comprender mejor los principales fenómenos que ocurren durante la biofiltración de  $\text{CH}_4$  e identificar el paso limitante a diferentes temperaturas. De manera general se considera que el proceso de biofiltración de  $\text{CH}_4$  se puede ver afectado por procesos externos de transferencia de masa, atribuidos principalmente a la baja solubilidad del  $\text{CH}_4$  en agua. Sin embargo, como concluye

Gómez-Borraz et al. (2017), también se presenta una limitación de transferencia de masa interna debido a la difusión de CH<sub>4</sub> del exterior al interior de la biopelícula. A nivel experimental se operó una columna de cloruro de polivinilo (PVC) de 0.05 m de diámetro y empacada con composta hasta 0.54 m de altura (1.1 litros de volumen de lecho) en continuo con una concentración de 4% mezcla aire/metano, flujo de 0.0036 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> y TRLV de 19 min. La columna descrita anteriormente se adecuó para tener una operación en batch y realizar en este modo ensayos de respirometría heterogénea a diferentes temperaturas (15, 20, 25, 30, 35 y 40°C) y así evaluar la incidencia de la temperatura en la biofiltración de CH<sub>4</sub>.

En el modelo desarrollado por Gómez-Borraz et al. (2017) se consideran balances de masa (oxígeno, metano, dióxido de carbono y formaldehído) en condiciones isotérmicas para las fases de gas y biopelícula, en las que se desarrolla de manera simultánea transporte de masa externo y de difusión. Se considera que no hay crecimiento de biomasa y que la concentración de formaldehído producido no conduce a una inhibición de los microorganismos. Se evalúa la concentración de O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CH<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> en función de la profundidad (espesor) de la biopelícula. Las ecuaciones estequiométricas incluidas en el modelo matemático corresponden a las de CH<sub>4</sub> a CH<sub>2</sub>O y de CH<sub>2</sub>O a CO<sub>2</sub>, así como la de respiración basal. Las expresiones cinéticas incluidas en el modelo consideran la ecuación de Monod de dos sustratos, la tasa máxima de absorción de oxígeno cuando se oxida CH<sub>4</sub>, CH<sub>2</sub>O, la respiración basal y las constantes de saturación de O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CH<sub>2</sub>O. Las ecuaciones de la cinética se modifican con el factor de corrección por temperatura que corresponde a una ecuación del tipo Arrhenius. El modelo pudo predecir la eficiencia de remoción y el análisis estadístico demostró que no existían diferencias significativas (valor de  $p = 0.34$ ) entre el modelo y los datos experimentales. Así mismo, el modelo identificó, bajo las condiciones aplicadas, que la etapa limitante la constituye el transporte por difusión de metano en la biopelícula, sobre la transferencia de masa externa de la fase gas a la fase líquida.

Jawad et al. (2021) desarrollaron un modelo para predecir la concentración de CH<sub>4</sub> a varias alturas en el biofiltro. El desarrollo del modelo de estado no estacionario asumió los siguientes supuestos: La dirección de flujo de gas es de forma ascendente y no hay un gradiente de concentración radial a través del biofiltro. El CH<sub>4</sub> es el único compuesto que es biodegradado, el O<sub>2</sub> no es un sustrato limitante y todos los nutrientes necesarios se encuentran en exceso y la reacción es del tipo irreversible de primer orden. Se asume que el espesor de la biopelícula es muy pequeño en comparación con el tamaño de las partículas. El tamaño del poro es muy pequeño por lo tanto la biopelícula sólo se desarrolla en la superficie de la partícula y no dentro de los poros, donde no habría por lo tanto reacción de oxidación. Para el supuesto de estado no estacionario, el término de acumulación de carbono es nulo. La validación del modelo se hizo por medio de experimentos realizados en columnas de biofiltración y se obtuvo un alto coeficiente de correlación ( $R^2=0.96$ ) entre las predicciones del modelo y los datos experimentales para la concentración de CH<sub>4</sub> a la salida. Por ejemplo, el modelo fue capaz de predecir la

concentración de CH<sub>4</sub> a la salida en el estado transitorio, donde la concentración inicial de CH<sub>4</sub> fue 0.35% y a las 3 horas de iniciar el experimento se registraron concentraciones a la salida de 0.15% y a las 6 horas, la concentración fue 0.11%. El estado estacionario comenzó después de seis horas de iniciar el experimento.

Respecto a las simulaciones realizadas por Jawad et al. (2021) para determinar la concentración de CH<sub>4</sub> a diferentes alturas del biofiltro, se obtuvo que a concentraciones de CH<sub>4</sub> a la entrada de 0.11%, 0.40%, 0.80% y 1.43%, el modelo fue capaz de predecir su concentración a alturas que variaron entre 0.05 m a 0.26 m (medición a nivel experimental a 0.05 m, 0.15m y 0.26 m de altura del biofiltro) con mayor exactitud para las concentraciones de entrada de 0.11% (R<sup>2</sup>=0.89), 0.40% (R<sup>2</sup>=0.80), 0.80% (R<sup>2</sup>=0.72) y en menor precisión para la concentración de 1.43% (R<sup>2</sup>=0.55). La CE del biofiltro aumentó con la altura del lecho filtrante y el modelo fue capaz de predecir su tendencia; sin embargo, a medida que se incrementó la concentración de entrada se observó un aumento de la desviación.

Para una escala mayor a las de columnas de biofiltración también se han desarrollado modelos, por lo general orientados a la biofiltración de CH<sub>4</sub> en cubiertas de rellenos sanitarios. Si bien, estos modelos consideran aspectos como la generación de CH<sub>4</sub> en el relleno, el sistema de drenaje o las diferentes capas de materiales, son modelos que aportan a la comprensión del fenómeno de biofiltración, en especial cuando se consideran aspectos ambientales como la presión, lluvia y temperatura y no se asumen como parámetros constantes ni en el tiempo ni en el espacio.

Bian et al. (2021) desarrollaron un modelo de una dimensión que incluye la transferencia de agua, calor y gas, así como el efecto de factores meteorológicos como la presión, lluvia y temperatura ambiente, con el objetivo de ver su relación en el transporte, oxidación y emisión de CH<sub>4</sub> en cubiertas de suelo de rellenos sanitarios. El desarrollo del modelo considera el transporte de gases (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) por difusión y advección, la velocidad del gas en el suelo determinada por la Ley de Darcy, la densidad seca del suelo y la tasa de oxidación de CH<sub>4</sub>. Respecto a la transferencia de agua se emplea la ecuación de Richard y se incluye la masa de agua aportada por lluvia y la generada durante la oxidación, pero no se considera la evaporación. Para la transferencia de calor, el modelo usa la convección y conducción del calor en suelos no saturados, la capacidad calorífica y conductividad térmica del suelo y el calor generado durante la oxidación. Finalmente, el modelo incluye la tasa de oxidación de CH<sub>4</sub> descrita por la ecuación cinética de Michaelis-Menten para dos sustratos (CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>) y que es modificada por un factor de temperatura y otro de humedad. Al usar el modelo bajo diferentes condiciones de presión atmosférica, Bian et al. (2021), concluyen que la presión atmosférica determina el mecanismo de transporte (difusión y advección) del CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>. Por ejemplo, en una presión baja (-20 kPa) el mecanismo dominante es la advección por una diferencia de presiones, pero a una presión alta (20 kPa) el mecanismo dominante de transporte es la difusión, es decir una diferencia de concentración. Respecto



al efecto de la lluvia durante la biofiltración de  $\text{CH}_4$ , Bian et al. 2021, después de evaluar el modelo a diferentes intensidades de lluvia y duración, indican que la lluvia tiene efectos combinados en la oxidación y emisión de  $\text{CH}_4$  a través de la cobertura de suelo del relleno. El contenido de agua puede inhibir o promover la actividad microbiana, así como puede reducir la transferencia del gas en la cubierta.

Como se indicó, el trabajo de Bian et al. (2021) estudió el efecto de factores ambientales como la temperatura, el cual fue evaluado bajo 4 temperaturas ambientales diferentes (5 °C, 22 °C, 33 °C y 40 °C) seleccionadas según las condiciones ambientales de la zona de estudio y las temperaturas óptimas de acuerdo al factor de corrección de temperatura. Adicionalmente, estos autores asumen dos condiciones experimentales, la primera considera que la temperatura en el nivel superior e inferior del medio filtrantes es la misma (espesor del medio 0.6 m), situación que sería similar según los autores a la presentada en columnas de biofiltración. La segunda consideración es que la temperatura en el nivel superior e inferior del medio filtrantes es diferente, como se presentaría a nivel real en los rellenos sanitarios. Para estas dos condiciones se obtiene que la temperatura alcanzada en la segunda condición es más alta que en la primera condición (Temperatura ambiente de 22°C, temperatura máxima en la primera condición 40°C y en la segunda condición 44°C) debido a los efectos combinados de generación de calor y la transferencia de calor desde el límite inferior a la parte superior de la cubierta. Los autores enfatizan que el efecto de la temperatura ambiental en la oxidación de  $\text{CH}_4$  es un proceso complejo que involucra la difusión y advección del gas, la actividad microbiana y la generación del gas en el relleno.

Ng et al. (2015) desarrollaron un modelo que considera el transporte de agua, gas y calor para cubiertas de suelos insaturados de rellenos sanitarios donde se llevan a cabo procesos de oxidación de metano. El modelo investiga la influencia del contenido de agua inicial, el agua generada y el calor que se produce durante la oxidación de  $\text{CH}_4$ , aspectos que según indican los autores de ser ignorados puede resultar en una diferencia significativa en la eficiencia de remoción que se prediga con los modelos de biofiltración. El modelo de Ng et al. (2015) considera tres fases que se encuentran en equilibrio térmico. Las fases corresponden a la mezcla de gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ), agua y suelo. La transferencia de agua se considera por efecto de advección y es modelada con la ecuación de Richards y ley de Darcy para considerar la velocidad de flujo. La transferencia de gases se modela para la disolución en agua líquida, advección y difusión. Para la modelación de los gases se considera la concentración molar de cada componente y su cambio al consumirse o generarse algún gas producto de la reacción de oxidación, así mismo se considera la solubilidad de los gases mediante el coeficiente de Henry y se incluye el coeficiente de difusión del gas a través del suelo. Respecto a la transferencia de calor se considera que sucede mediante mecanismos de convección en el líquido y en el gas y mecanismos de conducción en el medio filtrante, involucrando la conductividad térmica como una función del contenido del agua y la capacidad calorífica de las partículas de suelo, del agua y el gas. Al igual que en otros modelos, como el de Bian et al. 2021, el modelo de Ng et al. (2015)

describe la reacción de oxidación mediante la cinética de Michaelis-Menten de doble sustrato y la afecta por factores de corrección de humedad y temperatura. En este modelo se supone una oxidación incompleta del  $\text{CH}_4$  al considerar que por cada mol de  $\text{CH}_4$  se consumen 1.5 moles de  $\text{O}_2$  y se producen 0.5 moles de  $\text{CO}_2$ . Respecto a la humedad del suelo, Ng et al. (2015) mencionan que cada tipo de suelo tiene un valor de humedad de decaimiento, la cual corresponde al contenido de agua donde la actividad microbiana es insignificante, y una humedad de capacidad de campo, que corresponde al contenido de agua que se mantiene constante después de periodos de drenaje. Para el suelo usado en su experimentación (marga arenosa), la humedad de decaimiento corresponde al 5% y la humedad de capacidad al 15%. Estos valores de humedad son usados como valores iniciales para las simulaciones de generación de agua.

El modelo de Ng et al. (2015) se aplicó para simular la temperatura de una columna de acrílico de 0.6 m de alto y 0.14 m de diámetro, con material franco arenosa como lecho de soporte y alimentada a  $13.4 \text{ mol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ . En las simulaciones se consideraron tres escenarios: no hay generación de calor; hay generación de calor y se permite su transferencia por las paredes del biofiltro; y hay generación de calor durante la oxidación, pero se considera el sistema aislado térmicamente al no permitirse la transferencia de calor por las paredes y por ende se da una acumulación. Por otra parte, cada escenario se simuló bajo cinco condiciones de temperatura ambiente que fueron:  $10^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$ ,  $22^\circ\text{C}$ ,  $33^\circ\text{C}$  y  $40^\circ\text{C}$ . Como resultados principales se tiene que el modelo fue capaz de predecir la concentración de los diferentes gases a diferentes profundidades de la columna de biofiltración, la tasa de oxidación simulada fue mayor (5%) a la experimental, lo cual según los autores se debe a que el modelo no tiene en cuenta el crecimiento de la biomasa metanotrófica. Las simulaciones en que se considera la generación de agua y que partían de un contenido de humedad del 5% mostraron que la eficiencia de remoción aumenta de 21% a 92%. Para las simulaciones en que el contenido de humedad inicial era 15% se observó que la generación de agua inducía a una reducción de la eficiencia de remoción (de 100% a 85%) debido a que el agua reduce el espacio vacío para la transferencia de gas. Finalmente, respecto al efecto de la temperatura y los diferentes escenarios simulados, los autores concluyen que no se debe considerar que la temperatura del biofiltro sea la misma que la del ambiente y que la temperatura diferirá según la altura del biofiltro y su cercanía a la pared o zona de transferencia de calor.

Gómez-Borraz et al. (2021) desarrollaron un modelo matemático que evalúa la variación de la temperatura en el medio filtrante de un biofiltro de composta y su efecto sobre la eficiencia de remoción del sistema. El modelo 2D desarrollado y solucionado con el software COMSOL, incluye balance de masa, calor y momento, en condiciones de estado no estacionario. Respecto al balance de calor, este considera el calor producto de la oxidación del  $\text{CH}_4$  y el intercambio de calor en la pared del biofiltro, resultado de las variaciones diarias de la temperatura ambiente y radiación solar. La calibración y validación del modelo de Gómez-Borraz et al. (2021) se hizo con la operación de un biofiltro de composta de  $0.34 \text{ m}^3$

de lecho filtrante, alimentado con un flujo de  $\text{CH}_4$  de  $0.9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (2% v/v). Algunas de las principales consideraciones del modelo son: no hay crecimiento de biomasa, la variación de la temperatura se evalúa a nivel axial y radial, el contenido de humedad de la composta se considera constante, las propiedades térmicas que dependen de la temperatura se aproximaron a las del aire saturado en agua y no hay limitación interna ni externa para la transferencia de  $\text{CH}_4$  a la biomasa. En ese trabajo, se simularon ocho casos de operación del biofiltro, los cuales variaron en la concentración de  $\text{CH}_4$  (0%, 0.04%, 0.2%, 1.8% y 20%), carga de alimentación (0, 2.5, 23, 260 y  $1200 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) e incidencia de la radiación solar (sin radiación, con radiación, con sombra y paredes aisladas) y TRLV (0.5 y 23 min). El modelo fue capaz de reproducir perfiles de temperatura al interior del biofiltro en los que se resaltó la baja capacidad del sistema de transferir calor y en consecuencia presentar mayor acumulación de calor a nivel axial que a nivel radial. Respecto a los casos de simulación de diferentes condiciones de operación del biofiltro se presentan las diferentes eficiencias de remoción del sistema y cómo la radiación solar afecta al sistema. En la simulación de 1.8 %  $\text{CH}_4$ , CA de  $23 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , 23 min TRLV y con radiación solar, la ER simulada fue de 84%. Cuando la simulación consideró 1.8 %  $\text{CH}_4$ , CA de  $23 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , 23 min TRLV y sombra, la ER aumentó hasta 92%. En el caso de la simulación de paredes aisladas térmicamente con el ambiente (1.8 %  $\text{CH}_4$ ,  $23 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , 23 min TRLV y sin radiación solar) la ER se reduce hasta 45% debido a las elevadas temperaturas registradas al interior del biofiltro que afecta la actividad de los microorganismos metanótrofos. La simulación de una alimentación con 1.8 %  $\text{CH}_4$ ,  $1200 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , 23 min TRLV y con radiación solar, produce una ER de 5%; estas condiciones, si bien permitirían una mayor remoción del calor, el TRLV no es suficiente para la transferencia de  $\text{CH}_4$  de la fase gaseosa a la líquida. Adicional a la simulación de la ER del biofiltro y de la temperatura axial y radial al interior del sistema, el modelo de Gómez-Borraz et al. (2021) permite la simulación de la zona donde se produce el calor, es decir donde se lleva a cabo la oxidación del  $\text{CH}_4$ . Contario a lo que se podría relacionar, la zona dónde se genera el calor está en los primeros centímetros del lecho filtrante y esta zona no corresponde a la zona de mayor temperatura, debido a que el calor se produce en la parte inferior del biofiltro y se transporta a los niveles superiores por conducción y convección. Gómez-Borraz et al. (2021) concluyen que las condiciones ambientales (radiación solar) tienen una incidencia negativa en el rendimiento del biofiltro y, por lo tanto, es recomendable operar el biofiltro en sitios en los que se pueda reducir la radiación solar y utilizar mecanismos que permitan una mayor transferencia de calor.

## CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

### 2.1 Justificación

En el caso del tratamiento anaerobio directo de aguas residuales municipales, el  $\text{CH}_4$  producido en pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales (menor a  $25 \text{ L s}^{-1}$ ), usualmente es liberado sin quemar, contribuyendo al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero. La producción de  $\text{CH}_4$  en pequeñas plantas no es suficiente para justificar la inversión necesaria y aprovecharlo como fuente de energía. Esto se debe a la baja concentración de materia orgánica presente en las aguas residuales domésticas y al reducido flujo tratado. En el caso de rellenos sanitarios la reducción de la concentración de  $\text{CH}_4$  en el tiempo debido a la degradación de la materia orgánica existente y a la falta de nueva materia orgánica, limita la implementación de equipos para generación de energía a partir de biogás considerando que éstos, después de un tiempo estarán sobredimensionados (Haubrichs et al., 2006). El tratamiento de agua residual y los rellenos sanitarios deben ir por lo tanto acompañado de un tratamiento de emisiones gaseosas que ayude a disminuir el impacto ambiental de estos sectores.

Como alternativa a la quema de pequeños flujos de biogás en antorchas o a su liberación sin tratamiento, se pueden emplear sistemas de biofiltración. La biofiltración de  $\text{CH}_4$  produce calor al momento de su oxidación. El calor generado puede afectar las condiciones de operación si no es adecuadamente liberado y como consecuencia, presentarse una disminución en la capacidad de eliminación del sistema. Dentro de ciertos límites y condiciones, a mayor carga de  $\text{CH}_4$  se tendrá una mayor generación de calor al interior del biofiltro. Este calor puede aumentar la temperatura llegando a ser superior al valor en la que los microorganismos llevan a cabo su metabolismo en condiciones adecuadas. Si esto sucede, la oxidación del  $\text{CH}_4$  presente en el medio puede inhibirse, reduciendo la capacidad de eliminación del biofiltro.

Debido a la baja solubilidad del  $\text{CH}_4$  ( $22.7 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ atm}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$ ), para la biofiltración de corrientes gaseosas se requieren tiempos de retención altos que permitan la transferencia de masa desde la fase gaseosa hacia fase líquida de la biopelícula. Este tiempo de contacto elevado se traduce en una baja velocidad de la corriente gaseosa y por lo tanto en una baja velocidad de remoción de calor por convención, lo cual permite que el calor producido se acumule en el biofiltro y se afecte la capacidad de eliminación del sistema.

El calor producido también puede provocar un secado del medio filtrante debido a la evaporación del agua, lo cual reducirá la transferencia de masa y la actividad del agua en la composta. Adicional a esta limitante, el secado del medio puede generar variaciones en la estructura del medio filtrante, siendo este efecto de gran impacto en medios orgánicos, los cuales sufren compactación y reducción del espacio vacío por el cual fluye la corriente gaseosa. Esta compactación produce una reducción de la capacidad de eliminación, debido

a una reducción del volumen útil para la oxidación y a mayor resistencia a la transferencia de masa del sistema.

La relación de la temperatura al interior del biofiltro con la capacidad de eliminación del sistema debe ser estudiada para comprender el proceso biológico bajo condiciones variables de temperatura. El conocimiento de los cambios de temperatura en el interior del medio filtrante permitiría contribuir con los estudios existentes sobre el efecto de los cambios de temperatura ambientales y considerar nuevos parámetros de diseño y operación de biofiltros.

## 2.2 Hipótesis

Mediante el monitoreo y control de la temperatura al interior de un biofiltro de composta que trata metano será posible reducir zonas de inhibición y por consiguiente incrementar la capacidad de eliminación de metano comparada con la obtenida en un biofiltro de composta convencional.

El conocimiento del perfil de temperatura en el medio filtrante de un biofiltro de composta que trata metano permitirá relacionar los procesos biológicos y fenómenos de transporte que ahí se desarrollan, así como identificar los efectos inhibitorios y las medidas para superarlos.

## 2.3 Objetivos

### 2.3.1 Objetivo general

Determinar el perfil de distribución de temperatura de un biofiltro de composta que trata concentraciones de metano (2%, 4% y 8% volumen en aire) y su relación con la capacidad de eliminación del sistema.

### 2.3.2 Objetivos específicos

- Identificar la distribución del calor metabólico al interior de un biofiltro de composta en cuatro niveles de altura para tres condiciones de alimentación de metano.
- Relacionar la capacidad de eliminación de un biofiltro de composta con sus condiciones internas de temperatura al tratar tres diferentes concentraciones de metano.
- Proponer un arreglo para controlar la acumulación excesiva de calor al interior de un biofiltro de composta, que permita aumentar la capacidad de eliminación de metano.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Experimentación

La parte experimental de esta investigación se llevó a cabo en la azotea del edificio 5 del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es importante mencionar que el trabajo experimental se realizó en los meses de octubre y diciembre de 2020, en periodo de pandemia de Covid 19, con las correspondientes restricciones de acceso al laboratorio.

#### 3.1.1 Condiciones de operación del biofiltro

Este trabajo consistió en la operación y evaluación de un sistema de oxidación biológica de  $\text{CH}_4$  en un biofiltro piloto empacado con composta, alimentado bajo tres concentraciones diferentes. Las concentraciones de  $\text{CH}_4$  evaluadas fueron 2%, 4% y 8% (v/v en aire), empleando para ello cilindros de  $\text{CH}_4$  con pureza del 99% (metano 2.0) de la marca *Praxair-Linde*. Los tiempos de evaluación de cada concentración se muestran en la Tabla 3.1. El inicio de operación del biofiltro se realizó con la alimentación de una corriente de aire saturado en agua y concentración 0% de  $\text{CH}_4$ . El objetivo de esta primera etapa fue la activación de la composta mediante el agotamiento de eventuales sustratos remanentes, considerando que estuvo almacenada durante un periodo superior a un año, y el establecimiento de un equilibrio de humedad entre el flujo de aire saturado y la composta. Su duración estuvo asociada al tiempo de suministro del primer cilindro de  $\text{CH}_4$ . El tiempo de evaluación en estado estacionario de las siguientes etapas se consideró a partir del momento en que la capacidad de eliminación del sistema fue constante. Las fases de transición fueron debidamente monitoreadas, ya que podían aportar valiosa información para la caracterización del sistema.

Respecto al TRLV de cada una de las etapas, este se aumentó a 23 min cuando se comenzó a suministrar  $\text{CH}_4$ , porque era necesario permitir un mayor tiempo de transferencia de masa y de contacto del  $\text{CH}_4$  con la biomasa metanotrófica.

Tabla 3.1 Tiempos de evaluación para cada concentración de  $\text{CH}_4$  y condiciones de alimentación

| <b>Etapas</b> | <b>Concentración de <math>\text{CH}_4</math><br/>(v/v en aire)</b> | <b>Duración<br/>(Días)</b> | <b>Flujo gaseoso<br/>(<math>\text{m}^3 \text{h}^{-1}</math>)</b> | <b>TRLV<br/>(min)</b> |
|---------------|--|----------------------------|--|-----------------------|
| 1             | 0%   | 15                         | De 1.02 a 1.14   | 18-16                 |
| 2             | 2%   | 12                         | 0.78   | 23                    |
| 3             | 4%   | 3                          | 0.78   | 23                    |
| 4             | 8%   | 6                          | 0.78   | 23                    |
| 5             | 0%   | 1.5                        | 0.78   | 23                    |

El biofiltro estuvo bajo condiciones de protección de la irradiación solar (exposición directa), lo que se logró mediante una cubierta realizada con malla sombra, que según las

especificaciones del material, impide el 75% del impacto de los rayos del sol (Figura 3.1). Adicional fue necesario colocar una lona plástica en el costado sur, eje oriente a occidente para dar una mayor protección de la irradiación, debido a que los rayos del sol incidían en esa cara en mayor medida. Las pruebas de operación se ejecutaron bajo condiciones controladas de humedad mediante el suministro de aire saturado y la adición de agua de forma manual en la parte superior del biofiltro, bajo un patrón inicial de 2 ml por m<sup>3</sup> de gas tratado, según lo reportado con Huete (2017) que empleó un biofiltro de volumen y flujo similar.

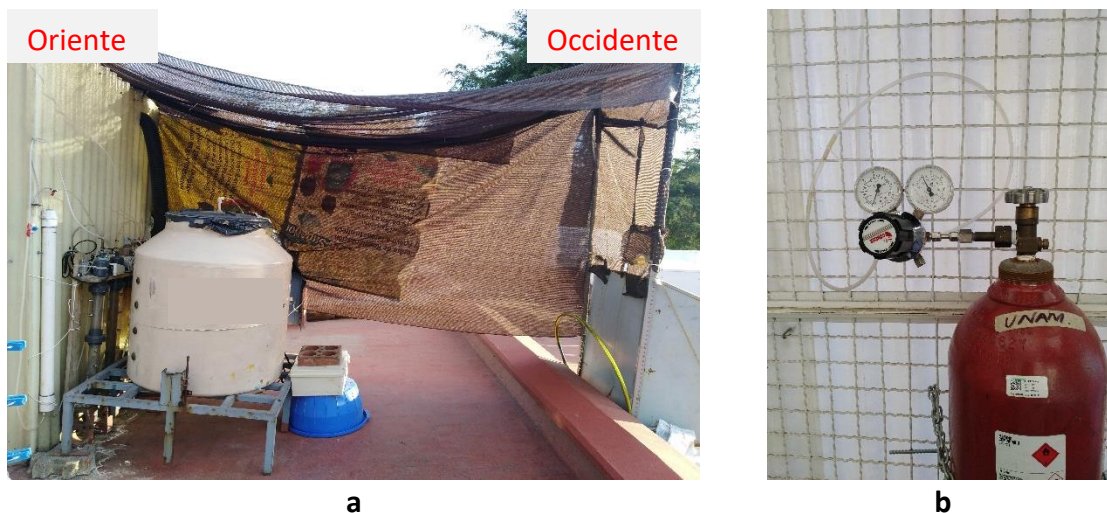


Figura 3.1 a) Sistema de biofiltración y b) Cilindro de gas CH<sub>4</sub>

La Figura 3.2 es una representación esquemática del sistema experimental empleado en esta investigación. El flujo de aire fue suministrado mediante dos bombas de aire tipo diafragma (Alita) modelo AL-80 (1) funcionando de forma simultánea, el cual fue regulado permitiendo el desfogue de aire en exceso mediante una válvula de aguja. El flujo de aire requerido pasó por dos columnas de humidificación en serie de 0.90 m de altura para saturar la corriente de aire. Cada columna tenía material rocoso (tezontle) hasta una altura de 0.30 m para mejorar el contacto aire-agua y agua hasta 0.65 m (3). Posterior a las columnas de humidificación, la corriente de aire saturada pasó por una trampa de agua de 0.90 m de altura para condensar el exceso de agua (4). La corriente de aire junto con la de CH<sub>4</sub> se mezclaron en una columna de 1.12 m de altura (5) la cual contaba con un punto de muestreo a la salida para medir la concentración de CH<sub>4</sub> en la mezcla ([CH<sub>4</sub>]). Esta válvula para muestrear (6) no se usó dado que la concentración medida en esta zona era inferior 0.6% a la media antes de la entrada al biofiltro, sitio que se seleccionó para el monitoreo de concentración inicial o de entrada. Esta diferencia de concentraciones se pudo deber a que la longitud del mezclador o el tiempo de contacto de ambas corrientes no era suficiente para su total mezclado.

La corriente de CH<sub>4</sub> provenía de un cilindro de gas comprimido (7) con su válvula de regulación. El flujo de CH<sub>4</sub> era además regulado mediante una válvula de aguja (8) y una

bomba peristáltica (9) marca Masterflex de 6-600 RPM con cabezal N° 16 y N° 18 según el flujo necesario para obtener la concentración de CH<sub>4</sub> a evaluar. Para llevar un control del flujo de CH<sub>4</sub> suministrado, se ubicó a la salida de la bomba peristáltica un rotámetro marca Cole-Parmer (10), además de un segundo rotámetro de la misma marca a la salida del mezclador de aire/CH<sub>4</sub> (11) con el que se registró el flujo que ingresaba al biofiltro. Antes de la entrada de la mezcla gaseosa al biofiltro se usó una válvula de paso (12) que conectaba con un manómetro diferencial de columna de agua (13) con el que se registró la caída de presión al interior del biofiltro. Esta válvula de paso (12) también se usó para recolectar en bolsas Tedlar de 10 litros la mezcla gaseosa a biofiltrar y medir la concentración de CH<sub>4</sub> a la entrada por medio de un equipo portátil (Biogás 5000 de la marca Landtec). La manguera hacia el biofiltro tenía una conexión "T" en la que se ubicó un sensor de temperatura (14). El biofiltro de composta (15) disponía de un falso fondo para hacer la distribución del gas al interior y para retener los lixiviados que se generaron (16). El gas tratado se evacuaba por la parte superior del biofiltro (17).

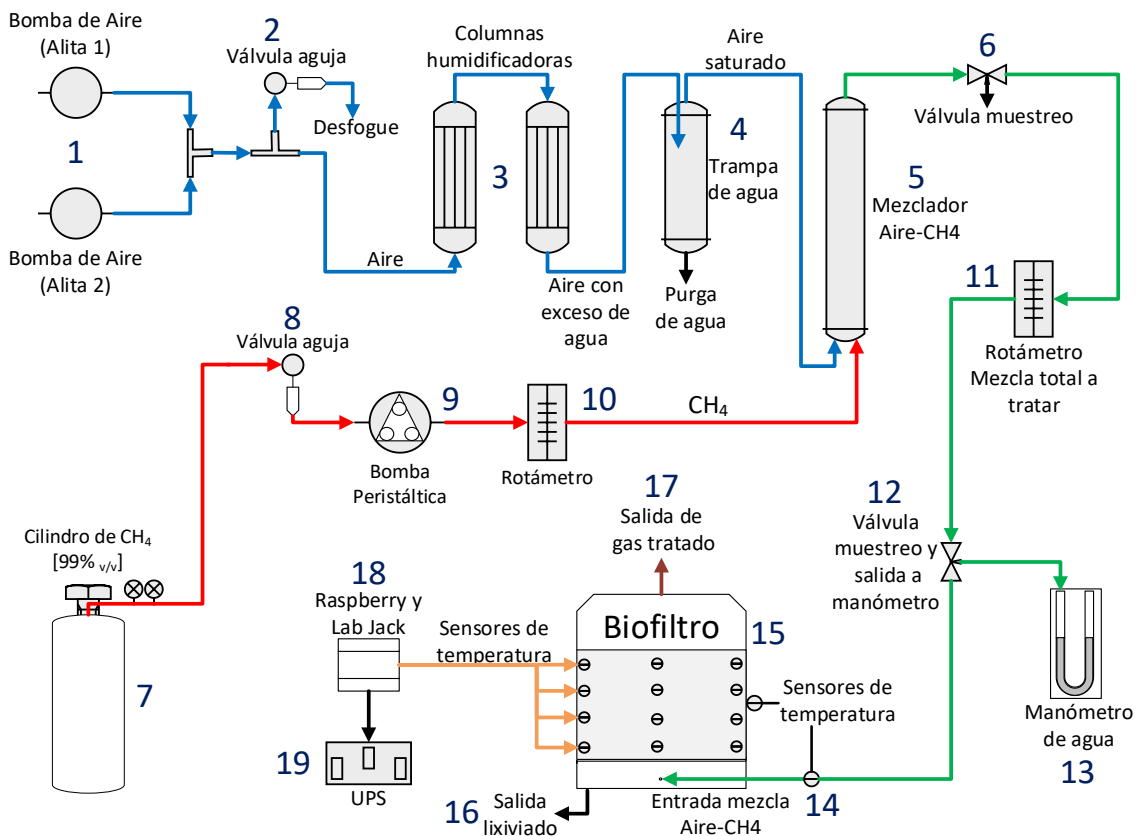


Figura 3.2 Representación esquemática de la instalación y alimentación del biofiltro



La Figura 3.3 y Figura 3.4 muestran el sistema de biofiltración detallando los nombres de los elementos y equipos usados.

Adicional al sensor de la entrada, se ubicaron 28 sensores en su interior y 1 en la pared externa para el monitoreo de la temperatura. La señal emitida por los sensores fue recibida por un sistema Lab Jack y almacenada en una microcomputadora Raspberry Pi (18) respaldado por un equipo UPS (19). La adquisición de datos de temperatura fue programada para realizarse cada 5 minutos y de manera continua durante toda la operación del biofiltro. Los sensores entraron al biofiltro por una perforación, debidamente sellada, ubicada en la parte superior y se colocaron en los sitios definidos para monitorear la variación de temperatura, como se describe más adelante. La corriente de aire saturada ingresó al mezclador al igual que la corriente de  $\text{CH}_4$  por la parte inferior (Figura 3.4).

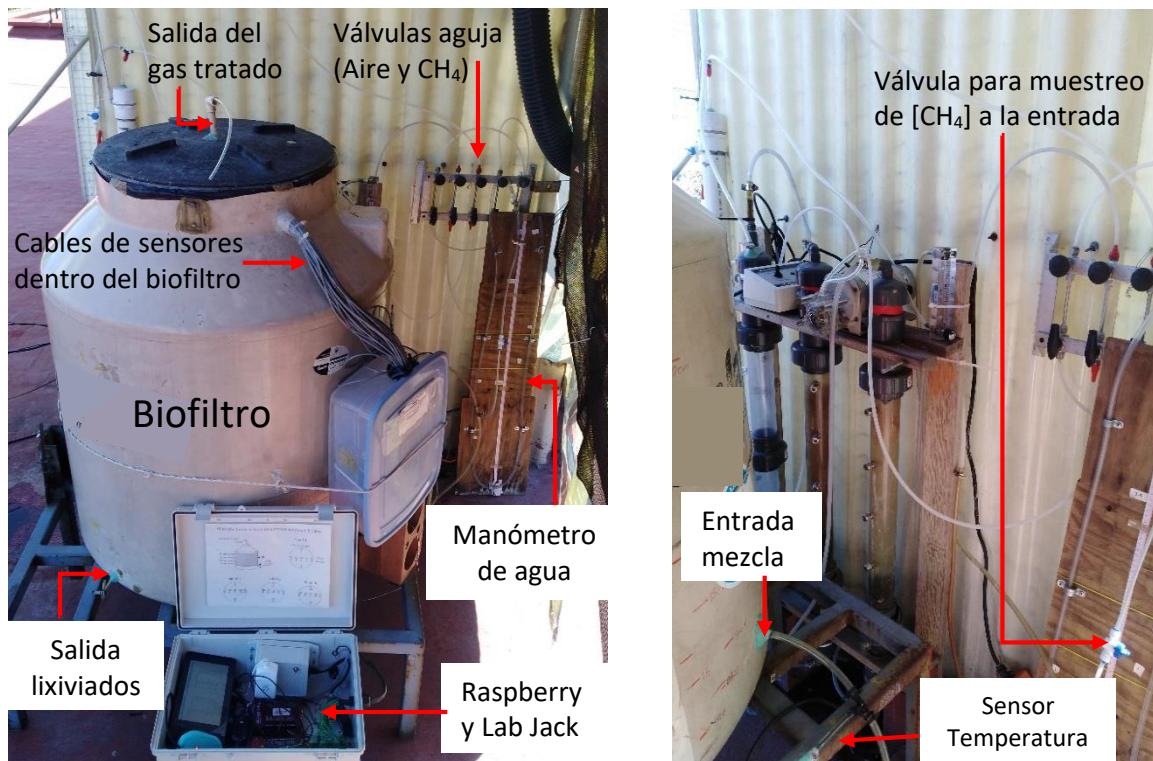


Figura 3.3 Sistema de biofiltración detalle 1

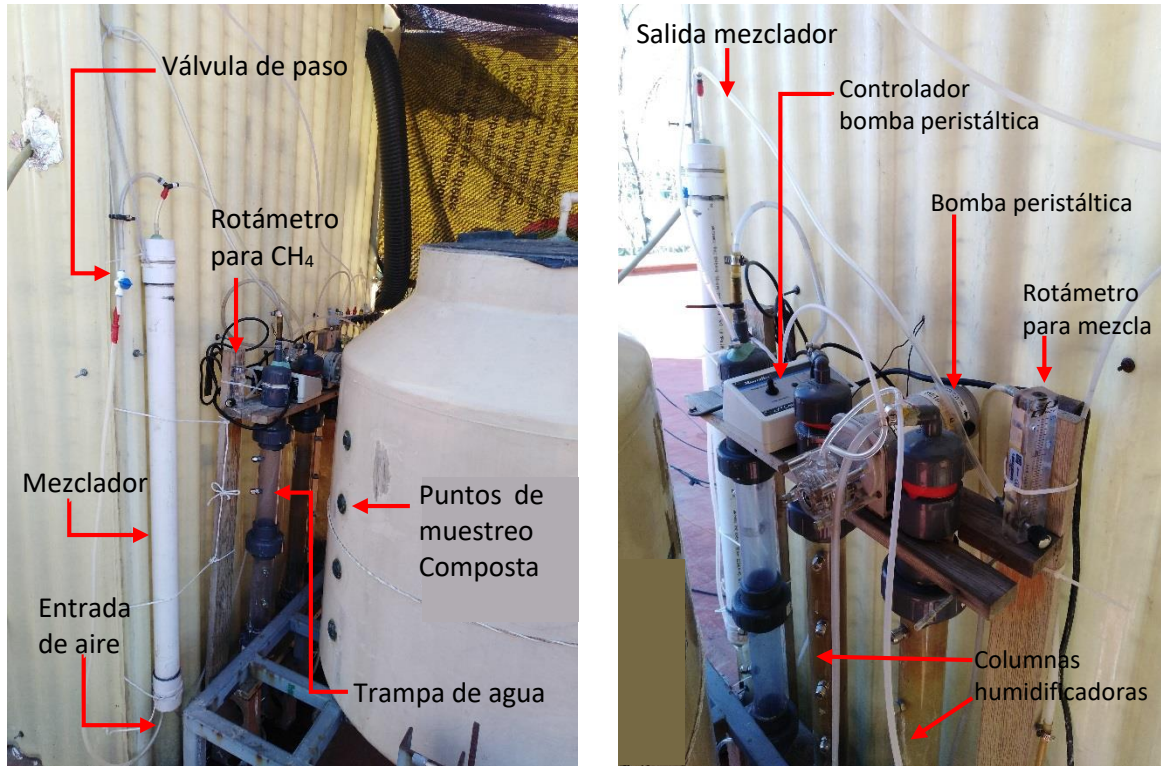


Figura 3.4 Sistema de biofiltración detalle 2

### 3.1.2 Biofiltro de composta

Para la oxidación biológica de  $\text{CH}_4$  se empleó un recipiente plástico con dimensiones de 1 m de altura y 0.85 m de diámetro (contenedor de agua comercial fabricado de polietileno de baja densidad con volumen de  $0.45 \text{ m}^3$ ). El volumen de composta fue de  $0.30 \text{ m}^3$  con una altura de 0.53 m para una relación altura/diámetro de 0.62. Las dimensiones generales del biofiltro se presentan en la Figura 3.5. La composta fue una mezcla en proporción de 4:1:1 respectivamente de, composta madura (6 meses en composteo), composta fresca (1 a 2 semanas en composteo) y composta aclimatada que fue tomada de un biofiltro usado anteriormente para tratar  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2\text{S}$  (Ramos, 2021), Esta mezcla de compostas fue almacenada en costales a la sombra por aproximadamente un año. Antes del llenado del biofiltro la composta fue homogenizada y humedecida, agregando agua durante el mezclado.

### 3.1.3 Deflectores en el biofiltro

Para direccionar el flujo de gas y reducir la formación de canalizaciones preferentes en la pared del biofiltro, se usaron franjas de película de polietileno de baja densidad sostenidas a presión con aros plásticos. Las dos franjas median 10 cm de ancho, de manera que 5 cm se apoyaron sobre la composta y los restantes en la pared del biofiltro. La ubicación de estos deflectores se muestra en la Figura 3.5, y en la Figura 3.6 se observa la secuencia de instalación de uno de estos deflectores.

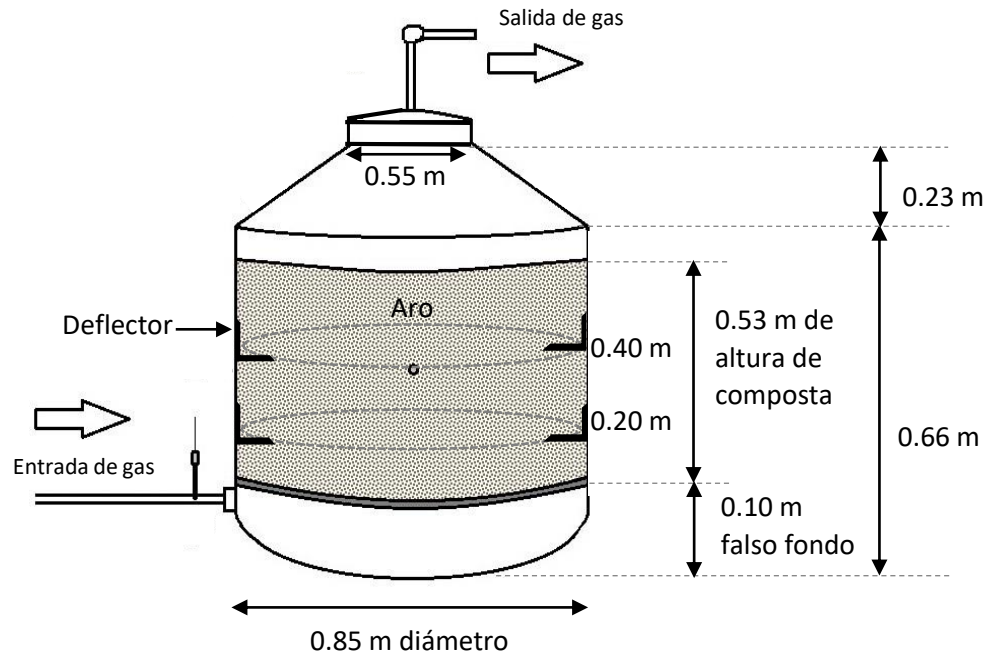


Figura 3.5 Ubicación de deflectores y dimensiones del sistema de biofiltración



Figura 3.6 Muestra de un deflector instalado al interior del biofiltro

### 3.1.4 Sensores de temperatura

El sistema de medición y registro de temperatura consistió en 30 sensores, descritos más adelante, ubicados en cuatro niveles del biofiltro de composta (Figura 3.7). Los sensores enviaron el registro de temperatura cada 5 minutos y esta información fue recibida por 4 equipos Lab Jack y almacenada en una microcomputadora Raspberry Pi (tarjeta y pantalla).

Adicional a los sensores ubicados al interior del biofiltro y distribuidos en los cuatro niveles, se ubicaron dos sensores en la parte externa: uno en la T de la manguera de entrada del gas y otro en la pared del biofiltro que mayor radiación solar recibía (cara sur).

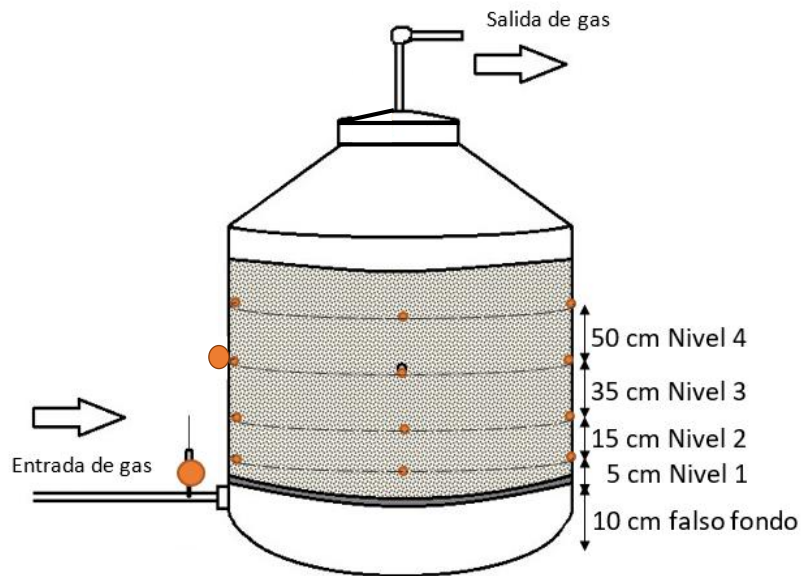


Figura 3.7 Niveles de ubicación de los sensores - Sensores en color naranja

Los sensores LM35 (Texas Instruments, USA) son sensores de temperatura analógicos con dimensiones de 4.3 mm x 4.3 mm (largo-ancho) capaces de detectar temperaturas entre  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$  con un error de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Para temperaturas de  $25^{\circ}\text{C}$ , el error es de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . La pendiente de temperatura es de  $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ . En la Figura 3.8 se presentan las dimensiones del sensor LM35. Una vez soldado el sensor a los cables de alimentación de corriente y señal con su cobertura aislante, el cuerpo del sensor midió en promedio 11 cm de largo. A los sensores que se iban a instalar en el perímetro del biofiltro se les colocó un fragmento de manguera de 3 cm de largo y 0.95 cm de diámetro para evitar el contacto directo del sensor con la pared del recipiente.

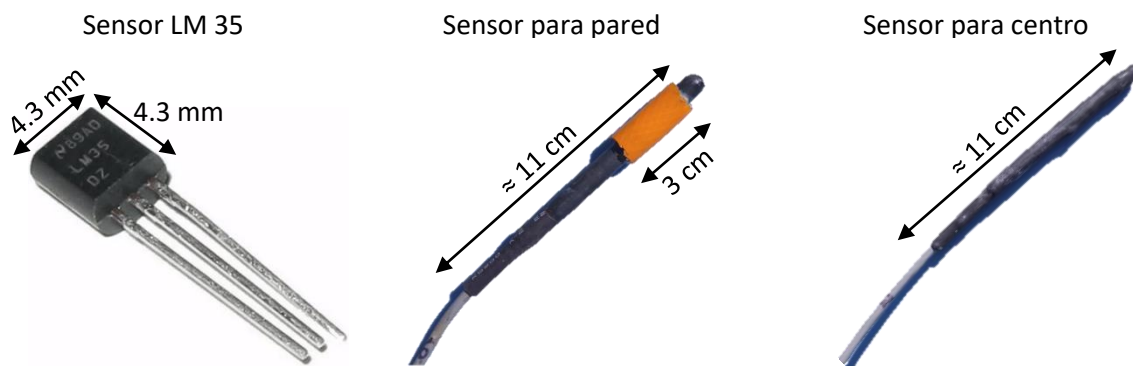


Figura 3.8 Dimensiones de los sensores instalados en el biofiltro

La distribución de los sensores en cada nivel y su número de identificación se muestran en la Figura 3.9. El sensor ubicado en la manguera de entrada del gas a tratar tiene el número de identificación 3, y el sensor pegado en la pared externa del biofiltro el número 30. La temperatura a la salida se registró en la tubería de salida al momento de medir la concentración por medio de un termómetro de alcohol introducido junto con la manguera del equipo biogás 5000.

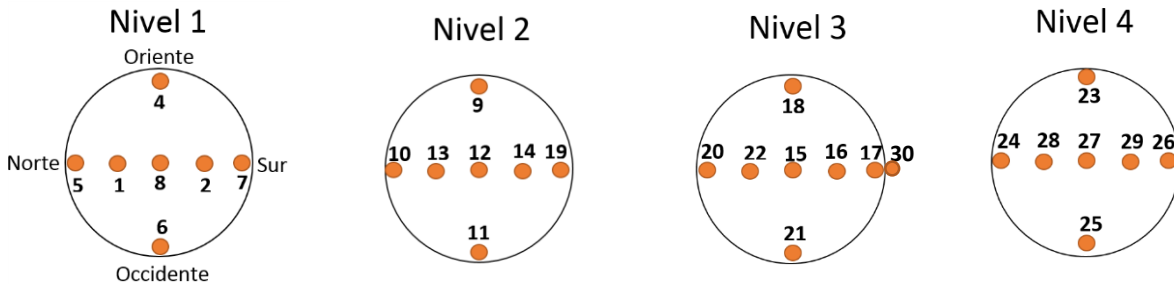


Figura 3.9 Distribución de sensores en cada nivel. El sensor 3 se ubicó en la entrada del gas y el 30 en la pared externa orientada al sur

En la Figura 3.10 se pueden observar, a manera de ejemplo, los sensores ubicados en el nivel 3 del biofiltro, nivel que corresponde a 0.35 m de altura con respecto a la entrada del gas. Los sensores asignados al monitoreo de la temperatura en el perímetro del biofiltro, adicional al trozo de manguera de plástico que se usó para protegerlos de la humedad tuvieron un fragmento de manguera plástica amarilla (Figura 3.8) usada como separador para que la cabeza del sensor no quedara directamente en contacto con la pared, sino a 0.5 cm de la misma y así considerar que la temperatura medida correspondía a la de la composta en esta zona.

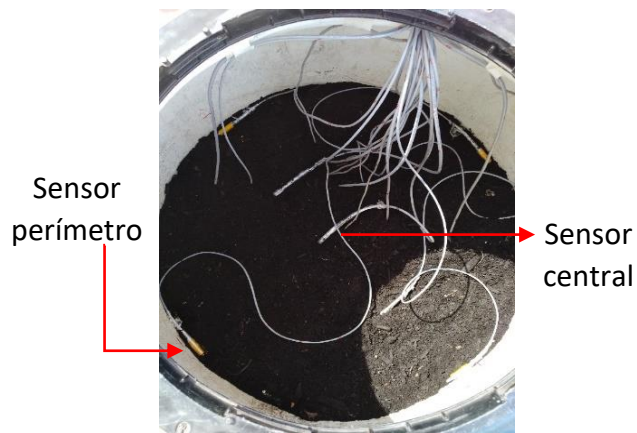


Figura 3.10 Sensores ubicados en el nivel 3 del biofiltro. Los sensores perimetrales muestran el separador amarillo para evitar el contacto del sensor con la pared

### 3.1.5 Muestreo

En la Tabla 3.2 se muestran los parámetros medidos en los diversos puntos, así como otros ensayos realizados a la composta antes de ser introducida al biofiltro. En la Figura 3.11 se indican los puntos de muestreo que se usaron durante la experimentación.

*Tabla 3.2 Parámetros físicos y químicos medidos*

| <b>Parámetro</b>  | <b>Punto de muestreo</b>  | <b>Método</b>                                     | <b>Frecuencia</b>  |
|---|---|---|--|
| <b>Composición del gas (CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>)</b> | Punto 1-2. Entrada, y salida del biofiltro.   | Equipo portátil Biogás 5000                       | Varias veces en 8 horas  |
| <b>Flujo de gas a biofiltrar</b>  | Punto 1. Entrada del biofiltro.   | Rotámetro   | 2 en 8 horas   |
| <b>Humedad de la composta</b>   | Composta inicial.<br>Parte superior del biofiltro (final).<br>Punto 3 al centro y pared del biofiltro (final) | Gravimetría                                       | 1 vez al inicio y al final                                       |
| <b>pH</b>   | Muestra inicial de la composta y lixiviado del biofiltro  | Potenciómetro                                     | 1 vez  |
| <b>Temperatura</b>  | Punto 1-2 y en los 28 puntos al interior de la composta según distribución de sensores                        | Sensor LM35 y termómetro de alcohol (solo salida) | Cada 5 minutos durante todo el tiempo de operación del biofiltro |
| <b>Caída de presión</b>   | Punto 1   | Manómetro de agua                                 | 1 vez al día   |
| <b>Densidad y espacios vacíos</b>   | Composta inicial  | Agnew et al. (2003)<br>Huete (2017)               | 1 vez al inicio  |

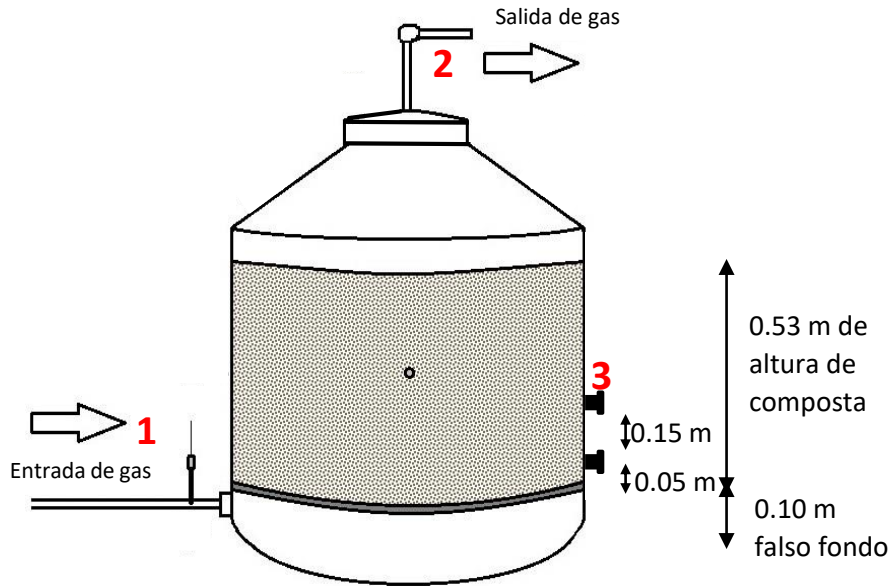


Figura 3.11 Puntos de muestreo

### 3.1.5.1 Muestreo de la composta al interior del biofiltro

La humedad al interior del biofiltro, una vez finalizadas las pruebas con  $\text{CH}_4$ , se determinó a 0.20 m del fondo (Punto 3 en la Figura 3.11) por medio de un nucleador (Figura 3.12) de PVC de 0.60 m de longitud con dos espacios de 0.17 m de apertura (Ramos, 2021) los cuales permitieron tomar muestras en el centro y pared del lecho de composta.



Figura 3.12 Nucleador para toma de muestras de composta

De las muestras de composta recolectada se tomaron 15 g, los cuales se secaron en capsulas de porcelana a  $105^\circ\text{C}$  durante 24 a 36 horas y posteriormente por mediciones gravimétricas obtener su contenido de humedad.

## 3.2 Evaluación de la operación del biofiltro de composta

Con la medición de los parámetros físico - químicos del biofiltro de composta se pueden determinar las siguientes condiciones de operación y eficiencia.

- Capacidad de eliminación de metano

$$CE = \frac{F \cdot ([CH_4]_i - [CH_4]_f)}{V} \quad \text{Ecuación 5}$$

- Carga de alimentación de metano

$$CA = \frac{F \cdot [CH_4]_i}{V} \quad \text{Ecuación 6}$$

- Tiempo de residencia de lecho vacío

$$TRLV = \frac{V}{F} \quad \text{Ecuación 7}$$

- Eficiencia de remoción de metano

$$ER = \frac{[CH_4]_i - [CH_4]_f}{[CH_4]_i} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

- Consumo de oxígeno

$$C-O_2 = \frac{F \cdot [O_2]_i - [O_2]_f}{V} \quad \text{Ecuación 9}$$

- Consumo de metano

$$C-CH_4 = \frac{F \cdot [CH_4]_i - [CH_4]_f}{V} \quad \text{Ecuación 10}$$

- Producción de dióxido de carbono

$$P-CO_2 = \frac{F \cdot ([CO_2]_f - [CO_2]_i)}{V} \quad \text{Ecuación 11}$$



- Tasa de calor metabólico generado

$$Q_{rx} = \frac{F \cdot ([CH_4]_i - [CH_4]_f)}{V} \cdot \Delta H_{rx} \quad \text{Ecuación 12}$$

Para la determinación del calor metabólico generado, la concentración de CH<sub>4</sub> debe estar en mol m<sup>-3</sup>. Valor de ΔH<sub>rx</sub>=-889 kJ mol<sup>-1</sup>.

- Acumulación de carbono

$$A_C = ([CH_4]_i - [CH_4]_f) - ([CO_2]_f - [CO_2]_i) \quad \text{Ecuación 13}$$

Para la determinación del carbono acumulado, la concentración de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> debe estar en mol m<sup>-3</sup>. Este tipo de balance se usa generalmente para estimar la generación de biomasa por medio de una medida directa de concentración de gases (Bordoloi et al., 2019).

### 3.2.1 Cálculo de la conductividad térmica en función del grado de saturación

Para la determinación de la conductividad térmica en función del grado de saturación se usa la expresión presentada por Chandrakanthi et al. (2005).

$$\phi = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V \cdot \varepsilon} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\lambda = -0.0669 + 0.8843\phi \quad \text{Ecuación 15}$$

### 3.3 Simulación de eficiencia de remoción y temperatura al interior del biofiltro

Basados en el modelo desarrollado por Gómez-Borraz et al. (2017) y Gómez-Borraz et al. (2021), se simuló en el software COMSOL Multiphysics 3.5a, las condiciones de operación del biofiltro para obtener la eficiencia de remoción y la temperatura al interior del biofiltro en las mismas zonas donde a nivel experimental se instalaron los sensores de temperatura.

Los días seleccionados para la simulación corresponden a tres días en que la concentración de CH<sub>4</sub> fue 2%, 4% y 8% y en los que se consideró que el sistema había logrado una fase estacionaria debido a que la ER era constante.

En la Figura 3.13 se presenta el algoritmo que explica los pasos llevados a cabo para desarrollar la simulación.

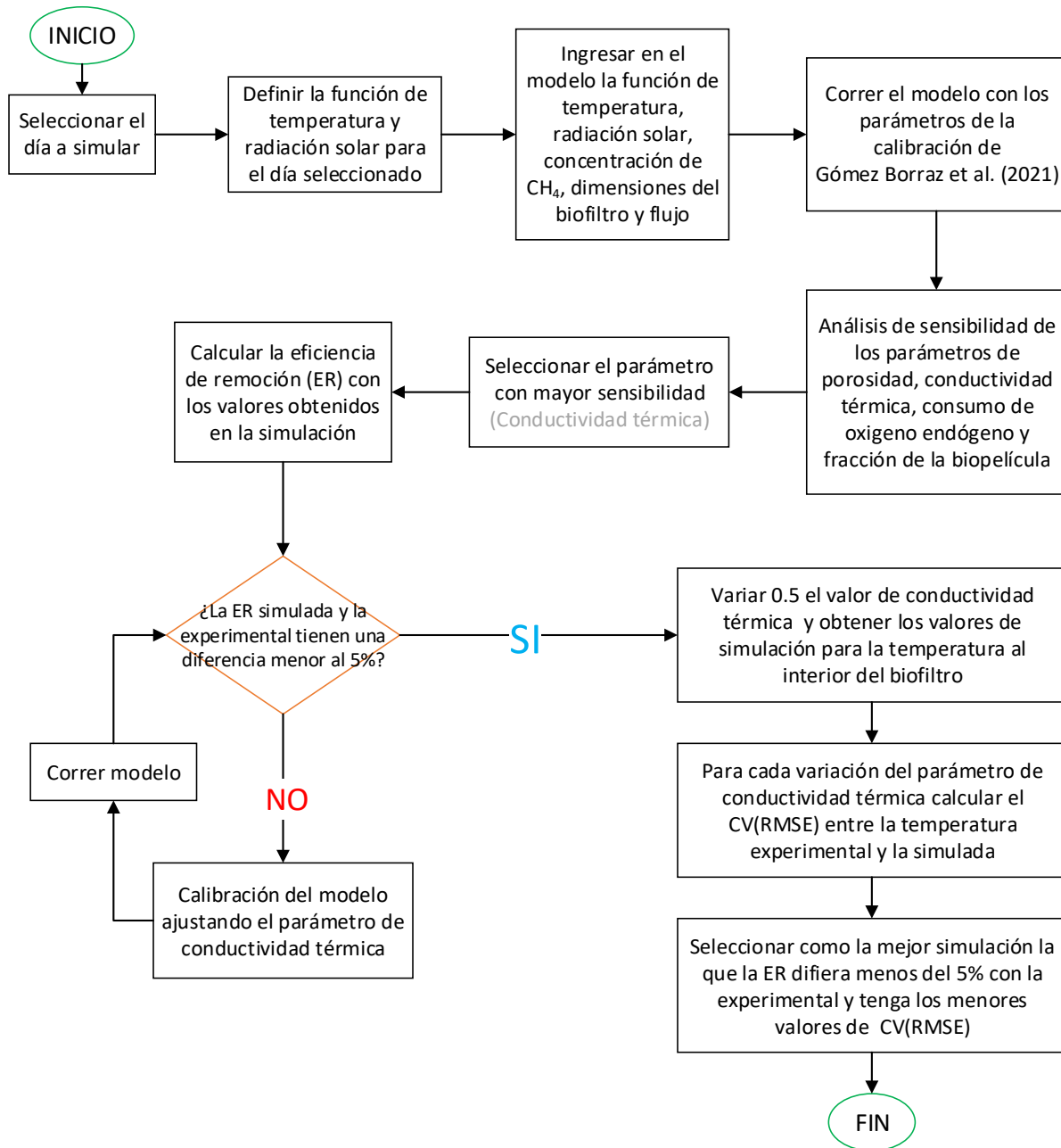


Figura 3.13 Algoritmo para simulación de la operación del biofiltro. CV RMSE: coeficiente de varianza de la raíz del error cuadrático medio

Después de calibrar el modelo para las condiciones de operación del biofiltro y obtener la eficiencia de remoción y una aproximación de la temperatura interna, se procedió a simular condiciones en que se presentaría un cambio de temperatura al interior del biofiltro por estar en contacto con elementos que permitieran el enfriamiento. En las simulaciones se consideró que por la zona de enfriamiento pasara un fluido que tuviera una temperatura constante de 10°C, 20°C o 30°C, o que la temperatura variara según la temperatura

ambiental. Adicional, se simuló que la temperatura del fluido dentro fuera de 40°C, 50°C y 60°C. Estas temperaturas elevadas se simularon como método de verificación de los datos obtenidos al comprobar si los resultados eran coherentes con lo que se observó a nivel experimental. Estas zonas de enfriamiento se evaluaron para la condición de operación de 8% de CH<sub>4</sub> a la entrada, al ser considerada como la condición crítica y que a nivel real y operativo en planta requeriría de una modificación del biofiltro con el fin poder tratar concentraciones elevadas de CH<sub>4</sub> y obtener una buena eficiencia de remoción.

Para las condiciones de enfriamiento se usó la capacidad del modelo de simular y graficar en una superficie laminar o corte axial y radial como es la distribución de temperatura al interior del biofiltro, la concentración de CH<sub>4</sub> y las zonas donde se genera el calor.

### 3.3.1 Error estadístico de datos experimentales y simulados

Como referencia de la buena previsibilidad de un modelo, se utilizan métricas para cuantificar su confiabilidad. Entre las más utilizadas se encuentran el error relativo, el coeficiente de varianza de la raíz del error cuadrático medio (CV RMSE), el error medio absoluto y el error cuadrático medio. Para la comparación de los datos experimentales de esta investigación y los obtenidos por medio de la simulación se usó el CV RMSE. (Quemada Villagómez et al.,2021)

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\overline{Dato\ real}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (dato\ real - dato\ predicción)^2}{n - 1}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 16}$$

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización de la composta

#### 4.1.1 Porosidad

La porosidad inicial de la composta usada en el biofiltro fue de 0.5. El mismo valor lo reportó Gómez-Borraz et al. (2017), con composta generada a partir de residuos de jardinería y estiércol de caballo en una proporción 4:1.

Una porosidad mayor a la obtenida en este estudio, y para una composta de igual forma generada con residuos de jardinería fue reportada por Fjelsted et al. (2020), quienes reportan un valor de 0.62. Estos autores determinaron la porosidad considerando la relación de la porosidad con otros parámetros físicos característicos como la densidad.

La porosidad es un parámetro importante para la biofiltración. La actividad metabólica se desarrolla bajo condiciones aerobias, las cuales pueden cambiar con el tiempo debido a que los poros del lecho de soporte se pueden llenar de agua (exceso de suministro de agua al biofiltro) o se pueden reducir si se compacta. En un biofiltro para remover  $\text{CH}_4$ , ambas condiciones van a limitar la disponibilidad de  $\text{O}_2$  y de  $\text{CH}_4$  (Mancebo y Hettiaratchi 2015). En el presente trabajo, la porosidad de la composta al finalizar la experimentación se determinó de manera indirecta mediante la tasa de dilución y se explica en la sección 4.4.4.

#### 4.1.2 Densidad aparente

La densidad de la composta influye en propiedades como la resistencia, porosidad y facilidad de compactación (Agnew et al., 2003). Para obtener un valor representativo inicial de la composta, antes del llenado del biofiltro, se determinó la densidad aparente seca y húmeda, definida como la relación de masa seca sobre el volumen de composta húmeda y masa húmeda sobre el volumen de composta húmeda.

El valor de densidad aparente húmeda fue de  $0.64 \pm 0.06 \text{ g ml}^{-1}$  y la densidad aparente seca fue de  $0.33 \pm 0.02 \text{ g ml}^{-1}$ . Estos valores son acordes a los reportados por Agnew et al. (2003) como valores típicos de la composta: 0.5 a  $0.9 \text{ g ml}^{-1}$  para densidad aparente húmeda y 0.1 a  $0.4 \text{ g ml}^{-1}$  densidad aparente seca. De manera similar, Morgan-Sagastume et al. (2003) y Gómez-Borraz et al. (2017) reportan para composta una densidad aparente húmeda de  $0.59 \text{ g ml}^{-1}$ . Streese et al. (2003) para una composta producida a partir de desechos de jardín reportan una densidad aparente húmeda de  $0.86 \text{ g ml}^{-1}$  superior a la obtenida en este trabajo.

Respecto a la densidad aparente seca, Morgan-Sagastume et al. (2003) reportan  $0.53 \text{ g ml}^{-1}$ , un valor superior al obtenido en esta investigación y fuera de los valores típicos. Esto se puede deber a que el tiempo de secado de las muestras no fue suficiente, ya que Morgan-Sagastume et al. (2003) indican que el tiempo de secado en horno a  $105^\circ\text{C}$  fue de 2 horas, en contraste con esta investigación en donde las muestras se dejaron secar en horno a  $105^\circ\text{C}$  por 24 a 36 horas.

### 4.1.3 pH

La determinación del pH se aplica a disoluciones; por ello, se realizan mediciones de pH en suelos en suspensiones de suelo, mediante la adición de agua. Los valores obtenidos de pH en suelos pueden proporcionar correlaciones útiles con otras propiedades del suelo y es importante elegir adecuadamente las condiciones (humedad de la muestra, relación suelo: agua, agitación y tiempo de reposo) para su medición sistemática y tener presente las limitaciones de estas condiciones al interpretar los resultados (Blakemore et al., 1987).

La medición de pH de la composta con la que se llenó el biofiltro se realizó por duplicado y siguiendo la metodología de Blakemore et al. (1987), con una relación suelo:agua de 1:2.5, una muestra seca por 2 horas en horno a 105°C y usando agua de la llave. Esta metodología también indica que es posible usar una solución de 0.01 M de CaCl<sub>2</sub> en lugar de agua. El valor obtenido fue de 7.32 ± 0.04. Este valor es semejante al reportado por Morgan-Sagastume et al. (2003) de 7.48, para una composta generada con desperdicios orgánicos como la empleada en esta investigación. Un valor de pH para composta de 6.3 es reportado por Gómez-Borraz et al. (2017), el cual es inferior al obtenido en esta investigación, lo que puede deberse a que, en ese estudio, la composta provenía de un biofiltro para eliminación de olores (sulfuro de hidrógeno).

Valores de pH entre 5.56 y 8.29 se consideran dentro del rango tolerado por los microorganismos metanótrofos para llevar a cabo sus procesos metabólicos (Pawlowska et al., 2011).

### 4.1.4 Humedad

La humedad de la composta fue determinada por métodos gravimétricos al inicio, con la toma de una muestra representativa de la composta antes del llenado del biofiltro y al finalizar la experimentación en diferentes zonas como se detalla en el CAPÍTULO 3.

Las fuentes de entrada de agua al biofiltro fueron aire saturado en agua que ingresaba por la parte inferior después de pasar por dos columnas humidificadoras y la adición de agua de forma manual, suministrada por la parte superior. Las columnas humidificadoras se llenaban de agua cada 4 días para mantener su nivel (tasa de pérdida de agua 300 ml d<sup>-1</sup>). Por otra parte, para la adición manual de agua, no se siguió un patrón como inicialmente se había considerado (2 ml por m<sup>3</sup> de gas tratado según lo reportado con Huete (2017)), debido a la apariencia de la composta en la parte superior (color negro) y la presencia de gotas de agua condensadas en la tapa del biofiltro.

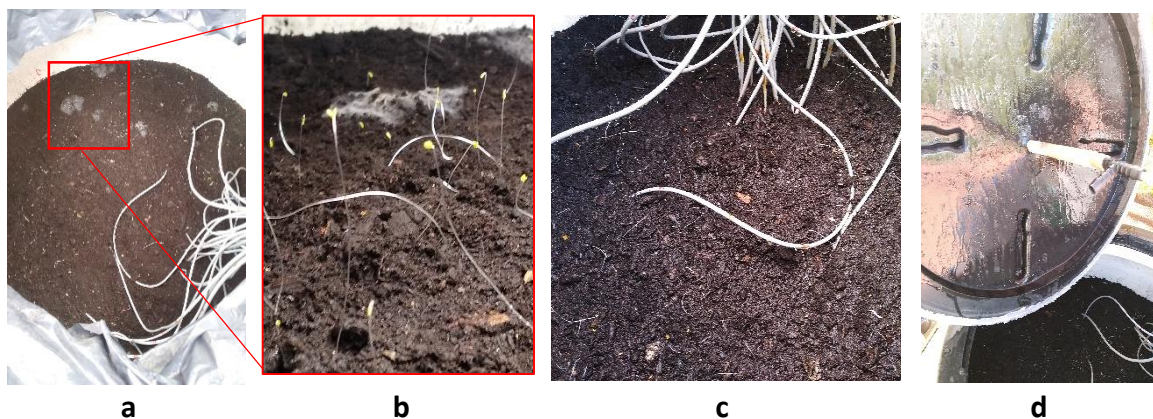
En la Tabla 4.1 se indica el día de operación y la cantidad de agua adicionada por la parte superior del biofiltro. Se reporta que contenidos de humedad inferiores al 40% son la causa del 75% de los problemas operativos en biofiltros (Soreanu et al., 2020), debido a que el secado del material de empaque resulta en canalizaciones y disminución de la actividad biológica. Por otro lado, un exceso de humedad, superior al 80%, promueve la formación de

zonas anaerobias y caídas de presión (Bian et al., 2021; Soreanu et al., 2020 y Morales, 1999).

*Tabla 4.1 Cantidad de agua adicionada en los días indicados, durante la operación del biofiltro*

| <b>Etapa</b> | <b>Concentración de CH<sub>4</sub> (%)</b> | <b>Día de operación</b> | <b>Cantidad de agua adicionada (ml)</b> | <b>Total de agua por etapa (ml)</b> |
|--------------|--|-------------------------|---|-------------------------------------|
| <b>1</b>     | 0  | 2                       | 220                                     | 220                                 |
| <b>2</b>     | 2  | 16 , 20 y 24            | 1000 -1000- 250                         | 2250                                |
| <b>3</b>     | 4  | 0                       | 0                                       | 0                                   |
| <b>4</b>     | 8  | 30 y 34                 | 250 - 1000                              | 1250                                |

En la Figura 4.1 se muestra el estado de la composta para dos días de operación diferentes y un ejemplo de como la tapa del biofiltro evitaba la pérdida del agua que se evaporaba durante la operación del sistema. En detalle, en la Figura 4.1a, se muestran algunos germinados de semillas viables (con un acercamiento en la Figura 4.1b) que había en la composta y hongos que crecieron durante la etapa 0 y hasta la etapa 1, etapa en la que se comenzó la alimentación del CH<sub>4</sub>, lo que eliminó su presencia. En la Figura 4.1c se observa que después de 5 días de haber iniciado el suministro de CH<sub>4</sub> no se observan hongos y los germinados ya no se mantienen verticales. La Figura 4.1d presenta la evidencia de agua condensada en la parte inferior (interna) de la tapa del biofiltro.



*Figura 4.1 a) Composta el día 15 de operación, b) acercamiento en el mismo día, c) el día 20 después de la adición de agua y ya con alimentación de CH<sub>4</sub> y d) agua condensada en la tapa el día 22*

En la Figura 4.2 se puede observar el estado de la composta al día 34, cuando el sistema ya llevaba 4 días recibiendo 8% de CH<sub>4</sub> en la corriente de gas a tratar. Como se observa en la imagen, la superficie de la composta tenía un color blanco en su mayoría, al tacto se sentía caliente y también era posible observar vapor en la superficie. Este día se adicionaron 1000 ml de agua, los cuales fueron dosificados en cuatro adiciones de 250 ml cada una, durante el transcurso del día. La dosificación del agua en cuatro aplicaciones se decidió porque al comenzar a adicionar el agua se observó que esta no drenaba con facilidad por compactación de la composta y en consecuencia se formaban acumulaciones de agua como las mostradas en la Figura 4.2b.



Figura 4.2 a) Estado de la composta el día 34 antes de la adición de agua y b) composta el día 34 durante la adición de agua

Los valores de humedad para la composta antes de iniciar la biofiltración de CH<sub>4</sub> y una vez finalizada la experimentación se muestran en la Tabla 4.2. Valores superiores a 40% son necesarios para llevar a cabo los procesos de biofiltración (Morales et al., 2003). La muestra inicial de composta tuvo una humedad cercana al límite inferior (47%); sin embargo, durante la etapa 0, en la que solo se suministró una corriente de aire saturado, se considera se pudo aumentar esta humedad y prepararse para las siguientes etapas en las que el calor generado por la oxidación de CH<sub>4</sub> iba a promover el secado de la composta.

El día 34 de operación, antes de adicionar agua al biofiltro (Figura 4.2a) dos días antes de finalizar el periodo experimental, se tomó una muestra de composta de la parte superior y se determinó su porcentaje de humedad. A pesar que esta zona se observaba de color blanco, el contenido de humedad fue de  $54.79 \pm 0.63$  %, valor superior al registrado en el nivel 2 del biofiltro al término de la experimentación, dos días después (Humedad de la zona central:  $27.20 \pm 0.73$  %). Se considera que la mayor humedad en la zona superior del biofiltro se debió a que esta recibía directamente el agua adicionada además del agua condensada en la tapa del recipiente.

El nivel 2 fue una zona del biofiltro que desde que se comenzó a oxidar biológicamente el CH<sub>4</sub>, registró temperaturas elevadas (51°C), en especial hacia el centro del biofiltro

(descripción detallada en la sección 4.4). La humedad registrada en esta zona central del nivel 2 fue inferior al 30% al finalizar la experimentación, razón por la cual se puede asumir que esta zona tenía una baja actividad metabólica desde que inició la alimentación de metano (etapa 2), al no tener una actividad de agua superior al 0.97 (valor asociado a un contenido de humedad del 40%), condición requerida para el crecimiento y metabolismo bacteriano (Morales et al., 2003).

En la zona de la pared del biofiltro en el nivel 2, la humedad ( $41.69 \pm 1.25 \%$ ) es superior a la del centro, lo que se puede relacionar con que las paredes del biofiltro presentaron menores temperaturas a las centrales (entre  $37^{\circ}\text{C}$  a  $43^{\circ}\text{C}$ ).

Tabla 4.2 Humedad y sólidos de la composta

| Momento de la determinación | Sitio de muestreo en el biofiltro | Humedad composta (%) | Fracción volátil del peso seco (g SV/g ST) |
|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------|--|
| Inicio de operación         | No aplica                         | $47.36 \pm 1.09$     | $0.40 \pm 0.01$                            |
| Fin operación               | Parte superior nivel 4            | $54.79 \pm 0.63$     | $0.43 \pm 0.02$                            |
|                             | Pared nivel 2                     | $41.69 \pm 1.25$     | $0.38 \pm 0.02$                            |
|                             | Centro nivel 2                    | $27.20 \pm 0.73$     | $0.43 \pm 0.02$                            |

#### 4.1.5 Grado de saturación y conductividad térmica

Para la determinación del grado de saturación según el trabajo realizado por Chandrakanthi et al. (2005), se usó el peso de las muestras de composta húmeda y seca con las que se determinó el contenido de humedad y con ello la masa de agua de cada muestra, así como el volumen de agua ( $V_w$ ) correspondiente. Posteriormente se calculó el volumen de vacíos ( $V_v$ ) considerando el volumen total de muestra por la porosidad ( $\varepsilon=0.5$ ). Los volúmenes  $V_w$  y  $V_v$  determinados se aplicaron en la Ecuación 14 para obtener el grado de saturación de la porosidad ( $\phi$ ) de la composta. La conductividad térmica se calculó con el valor de  $\phi$  obtenido, según la Ecuación 15. En la Tabla 4.3 se presentan los resultados para la muestra inicial de composta y los tres sitios de muestreo analizados al final de la operación del biofiltro.



Tabla 4.3 Grado de saturación y conductividad térmica

| Momento de la determinación | Sitio de muestreo en el biofiltro | Contenido de humedad (%) | Grado de saturación $\phi$ | Conductividad térmica calculada $\lambda$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------|---|
| Inicio de operación         | No aplica                         | $47.36 \pm 1.09$         | $0.61 \pm 0.01$            | $0.47 \pm 0.01$   |
| Fin de operación            | Parte superior nivel 4            | $54.79 \pm 0.63$         | $0.70 \pm 0.00$            | $0.55 \pm 0.00$   |
|                             | Pared nivel 2                     | $41.69 \pm 1.25$         | $0.53 \pm 0.01$            | $0.40 \pm 0.01$   |
|                             | Centro nivel 2                    | $27.20 \pm 0.73$         | $0.35 \pm 0.01$            | $0.24 \pm 0.00$   |

La conductividad térmica de la composta es el resultado de la interacción de diferentes condiciones físicas entre las que se resalta, además del tipo de material sólido, la porosidad y la presencia de aire o agua en los espacios vacíos. Como se muestra en la Tabla 4.3, a mayor porcentaje de humedad en la composta, mayor grado de saturación (mayor fracción de poros ocupada por agua, en sustitución de aire) y por lo tanto mayor es la conductividad térmica y la facilidad para conducir el calor.

La comparación de los valores de conductividad térmica obtenidos con otros materiales de empaque reportados en la literatura puede ser poco ilustrativa, ya que se trata de compostas generadas a partir de residuos diversos. Considerando que son varios aspectos los que deben coincidir, es difícil identificar una buena referencia de comparación. En ese sentido, Klejment et al. (2008) reportan una conductividad térmica de  $0.30 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  para una composta generada de residuos municipales con humedad de 47.3% y densidad aparente de  $0.64 \text{ g ml}^{-1}$ , parámetros cercanos a los de este estudio.

## 4.2 Operación del biofiltro

### 4.2.1 Flujo y caída de presión

La caída de presión del biofiltro fue registrada por medio de un manómetro diferencial de columna de agua. En la Figura 4.3 se presenta la relación entre el flujo y la caída de presión del sistema. Para flujos iguales, como es el caso de este trabajo en las etapas 2 a 5, la caída de presión puede ser un indicador de la compactación del lecho de soporte, de la formación de canalizaciones que permitan flujos preferentes o bien del crecimiento de biomasa que reduzca la porosidad. En la Figura 4.3 se muestran las cinco etapas de operación del biofiltro, las cuales diferían por la concentración de  $\text{CH}_4$  a la entrada y en el flujo alimentado (etapa 1 mayor que en el resto de las etapas). En la etapa 1 (día 0 a 14) el biofiltro operó a

un TRLV entre 16 y 18 min por lo cual el flujo y caída de presión fue mayor al registrado en las etapas posteriores, con TRLV de 23 min. Para la etapa 1 no se atribuye que la caída de presión se haya debido a un crecimiento de la biomasa, considerando que en esta etapa la concentración de CH<sub>4</sub> era 0%, y solo se realizaron ajustes de equipos, como las bombas de aire, instalación de columnas humidificadoras o cambio del tipo de mezclador de aire/metano. La compactación de la composta recién introducida al biofiltro pudo ser la causa del incremento de 8 cm en la caída de presión (de 19 cm al inicio, a 27 cm a los 11 días) en esa etapa. El flujo promedio de la etapa 1 fue de  $1.12 \pm 0.04 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  y la caída de presión  $22.4 \pm 2.67 \text{ cm H}_2\text{O m}^{-1}$

Para el inicio de la etapa 2, el TRLV fue ajustado a 23 min y se mantuvo hasta finalizar la etapa 4. El flujo promedio de la etapa 2 a 4 fue de  $0.77 \pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  y la caída de presión  $15.2 \pm 2.00 \text{ cm H}_2\text{O m}^{-1}$ , en un intervalo de 12.5 a 17.7 cm. Huete et al. (2018) para un biofiltro semejante de 0.3 m<sup>3</sup> con altura de lecho de composta de 0.6 m y TRLV de 23 min, reportan caídas de presión durante los 12 primeros días de operación de 29 cm H<sub>2</sub>O m<sup>-1</sup> y después incrementarse a 37 cm H<sub>2</sub>O m<sup>-1</sup>, lo que implica un aumento de 8 cm en 57 días de operación. Los valores de caída de presión inicial reportados por Huete et al. (2018) son mayores desde un inicio a los de este estudio y esto puede deberse a las condiciones de compactación del lecho en el momento del arranque.

Para la etapa 5, se registra una rápida disminución de la caída de presión, a pesar de mantener el TRLV y por ende el flujo ( $0.78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ). No se tiene claridad de la razón por la cual cambia la caída de presión, considerando que el único cambio realizado fue dejar de suministrar CH<sub>4</sub>. Como el objetivo de esta tesis no era hacer un seguimiento de la caída de presión, no se realizaron más mediciones ni se prolongó la etapa 5, lo cual pudiera haber dado información adicional que permitiera entender la razón de tal comportamiento.

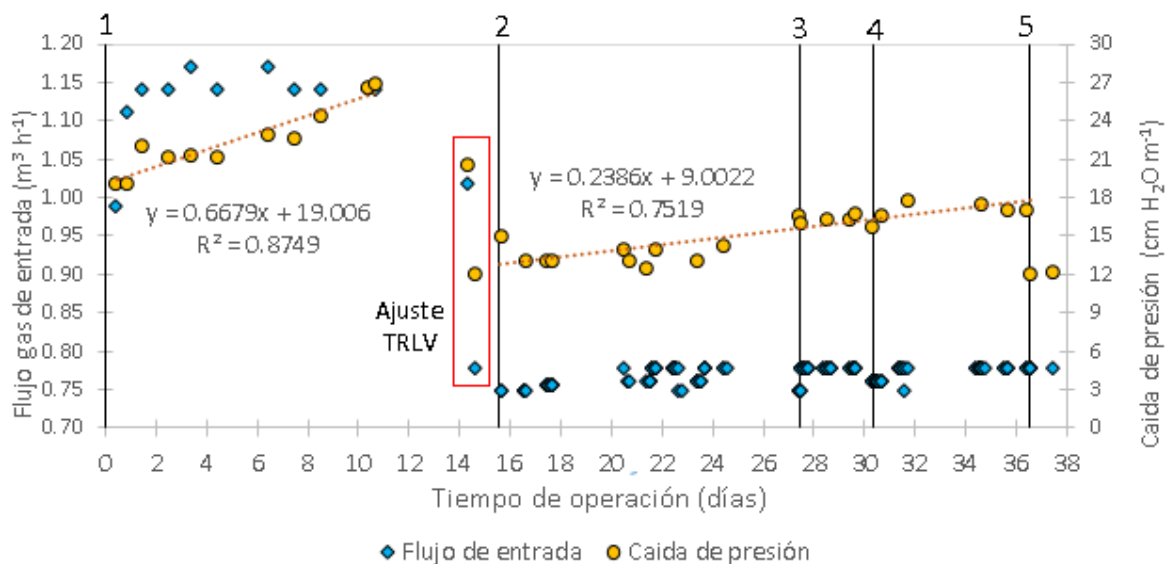


Figura 4.3 Relación entre el flujo de entrada y la caída de presión del sistema para la Etapa 1 (0% CH<sub>4</sub>), Etapa 2 (2% CH<sub>4</sub>), Etapa 3 (4% CH<sub>4</sub>), Etapa 4 (8% CH<sub>4</sub>) y Etapa 5 (0% CH<sub>4</sub>)

Se considera de manera general que el lecho de composta no presentó la formación de flujos preferentes debido a que no hubo una reducción de la caída de presión, por el contrario, la tendencia fue hacia el alza, lo que se asocia a la compactación del lecho y/o al crecimiento de biomasa.

Para identificar la relación de la caída de presión con el crecimiento de biomasa y la compactación de la composta, en la sección 4.2.3.1 se discute la acumulación de carbono (biomasa) y en la sección 4.4.4 la porosidad final de la composta.

#### 4.2.2 Capacidad de eliminación y carga de alimentación

En la Figura 4.4 se presenta la carga de alimentación, capacidad de eliminación y eficiencia de remoción para las etapas 2, 3 y 4.

Como se menciona en la metodología, el suministro de CH<sub>4</sub> se realizó después de 15 días en que el biofiltro sólo recibió una corriente de aire saturada. Posterior al inicio del suministro de CH<sub>4</sub>, se requirieron de seis días para registrar el arranque franco de la actividad biológica en el biofiltro. Es así que la oxidación biológica de CH<sub>4</sub> inició después del día 21, cuando se presentó un claro aumento de la CE pasando de 1.3 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> a 5.3 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> al finalizar el día 21 (ER del 5% a 18%). Durante el día 22 a 23, la CE aumentó rápidamente para alcanzar la total oxidación de la carga alimentada de 26.2 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> (ER 100%).

En un sistema biológico como es el biofiltro, durante los primeros días de funcionamiento, se presenta un periodo de aclimatación, para después establecerse la actividad metabólica durante un periodo de transición y llegar a un estado pseudoestacionario cuando los microorganismos se encuentran activos con capacidades de metabolizar la carga alimentada. La duración del periodo de aclimatación depende de las condiciones de operación, en especial de la CA y de si se realiza o no inoculación (Khabiri et al., 2021). En este trabajo de investigación no se hizo una inoculación externa, sino que se usó una composta ya adaptada a tratar una corriente con CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S.

Merece mención la puntual actividad metanótrofa que se dio el día 17, entre las horas de 10:40 am a 12:55 am, momento en que la ER pasó de 0% a 12.5% (10:40 am), posteriormente descendió hasta una ER de 10% (11:35 am) y finalmente la ER fue de 14.3% (12:55 am) para una CE de 3.7 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>; después de ese episodio puntual, la ER bajó al estado anterior (nula remoción) hasta el día 21. El incremento breve puede asociarse a una activación metabólica del consorcio microbiano, que, si bien no se mantuvo en los días siguientes, si pudo ser el antecedente del inicio de la actividad metanótrofa. Esta observación experimental será abordada posteriormente cuando se discutan los datos del monitoreo de temperatura en el interior del biofiltro (sección 4.4.2).

En la etapa 3, la ER se reduce a un 97.5 ± 1.7%, lo que representa una CE promedio de 50.1 ± 1.6 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> para una CA promedio de 51.4 ± 2.0 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>. Para la etapa 4, donde la CA fue cuatro veces mayor a la etapa 2, se registra que la ER promedio descendió drásticamente a 73 ± 8.7% con una CA de 102.6 ± 5.7 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> y CE de 75.8 ± 8.7 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>.

Como hace referencia Veillette et al. (2012), si la concentración de CH<sub>4</sub> se incrementa y el TRLV permanece constante, así como fue operado el biofiltro en este trabajo de investigación, se puede esperar una disminución de la eficiencia de remoción. Esto se debe a varios factores como el calor generado por la oxidación de CH<sub>4</sub> que incrementa la temperatura del lecho de soporte, lo cual inhibe la actividad microbiana. Además, un incremento de temperatura aumenta la evaporación del agua en el medio, disminuye la solubilidad de los gases en agua y con ello, la transferencia gas/líquido y la difusión del metano en la biopelícula (Bian et al., 2021; Gómez-Borraz et al., 2021).

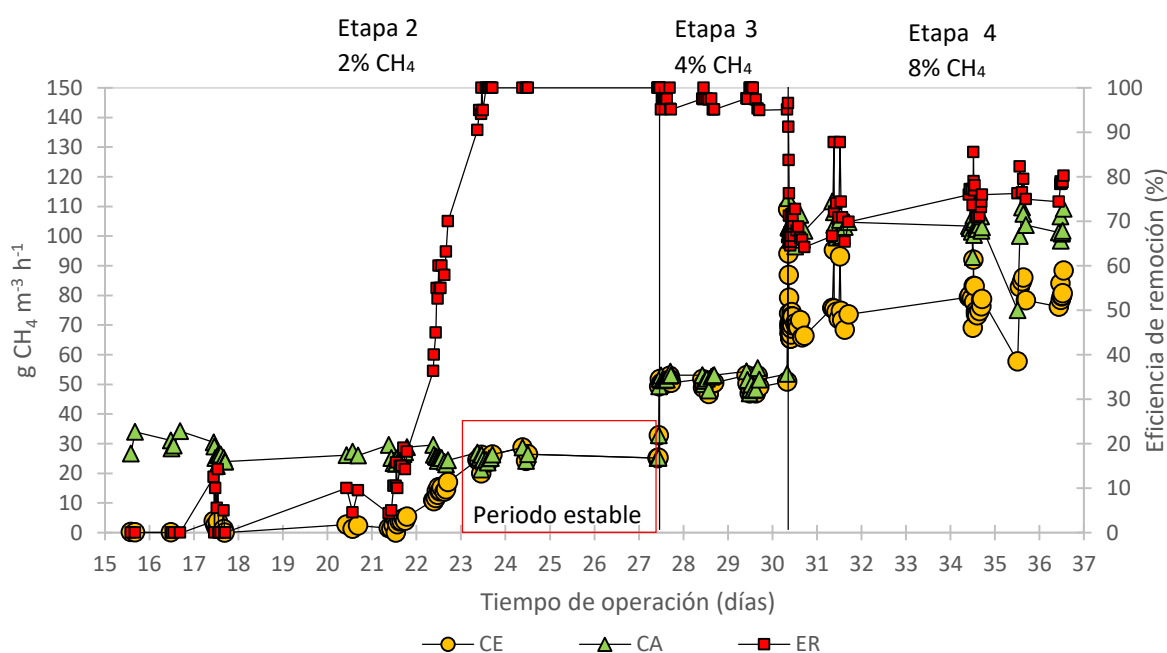


Figura 4.4 Carga de alimentación (CA), capacidad de eliminación (CE) y eficiencia de remoción (ER) del biofiltro

Con fines comparativos, puede mencionarse el trabajo de Pratt et al. (2012) que obtuvo una ER de 46% con un biofiltro con suelo volcánico y perlita como lecho de soporte, operado a una CA de 37 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>. Por su parte, Fjelsted et al. (2020) en un biofiltro de composta que operó a una CA de 22 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> obtuvo una ER de 73%. Estos resultados de ER son inferiores a lo obtenido en el presente trabajo.

En el caso de una mayor CA, 51.4 ± 2.0 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> (Etapa 3, ER 97.5%), Gómez-Borraz et al. (2017) a nivel laboratorio en columnas con composta operadas a una CA de 66 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> obtuvieron una ER entre el 65 a 80%. En el mismo sentido, Huete et al. (2017) en un biofiltro de composta similar en volumen al del presente estudio, operó a una CA de 56 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> alcanzando una ER del 70%. La eficiencia de remoción obtenida en este trabajo es superior a la de otras investigaciones, lo que pudo deberse a que el biofiltro tuvo mejores condiciones de humedad y distribución del flujo de gas. Otra diferencia fue que en el presente trabajo se utilizó una corriente de aire y metano controlada, lo que no fue el caso

para el estudio de Huete et al. (2017) que trabajaron en condiciones reales y en presencia de H<sub>2</sub>S.

Son pocas las investigaciones que reportan la operación de biofiltros a CA cercanas o superiores a 100 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>, como las realizadas por Brandt et al. (2016) y Streese et al. (2003). Brandt et al. (2016) reportan para un biofiltro con mezcla de composta y vermiculita que operó con una CA de 148 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> y TRLV de 19.6 min, una ER de 12%, inferior a la obtenida por este trabajo durante la etapa 4 la cual fue de 73 ± 8.7% para una CA 102.6 ± 5.7 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>. En otro estudio, Streese et al. (2003) para un biofiltro a escala piloto de 4 m<sup>3</sup> con composta como material de lecho de soporte y operado con una CA de 112 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> y TRLV de 14 min, reporta una ER de 40%.

En la Figura 4.5 se presenta una recopilación de los resultados de diferentes trabajos de investigación sobre biofiltración de CH<sub>4</sub> a escala laboratorio y a nivel piloto. Información adicional sobre los trabajos presentados en la Figura 4.5 se puede consultar en la Tabla 1.2 y Tabla 1.3.

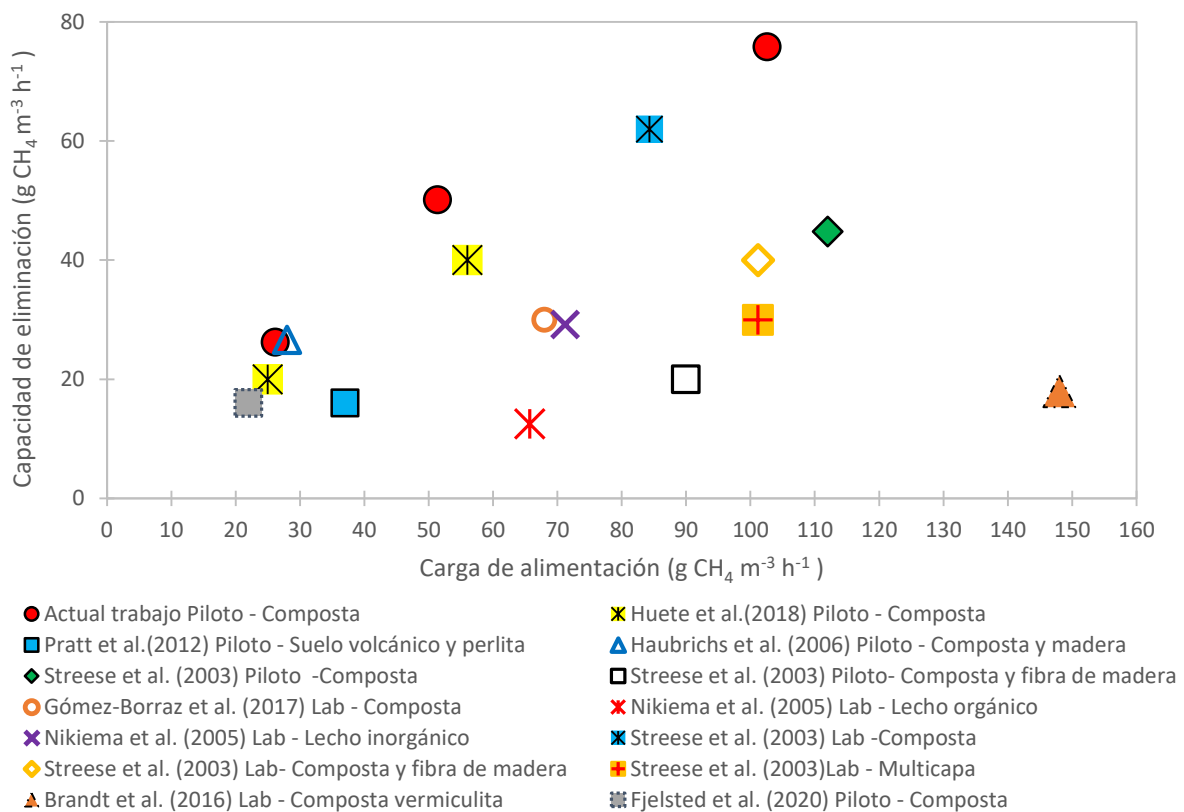


Figura 4.5 Carga de alimentación y capacidad de eliminación de trabajos de investigación de biofiltración de metano a nivel laboratorio y piloto.

#### 4.2.3 Relación CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>

Cuando hay una mineralización completa de CH<sub>4</sub> se cumplen dos relaciones molares, basadas en la estequiometría de la reacción: O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> igual a 2 y CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> igual a 1. Para

verificar estas relaciones estequiométricas durante la operación del biofiltro, se tomó la concentración de gases medida a la entrada y salida. Con base en ello, la determinación de consumo de  $O_2$  y  $CH_4$  se calculó con la Ecuación 9 y Ecuación 10, respectivamente. En la Figura 4.6 se muestran las relaciones de estequiometría de  $O_2/CH_4$  y  $CO_2/CH_4$  y su relación con la eficiencia de remoción.

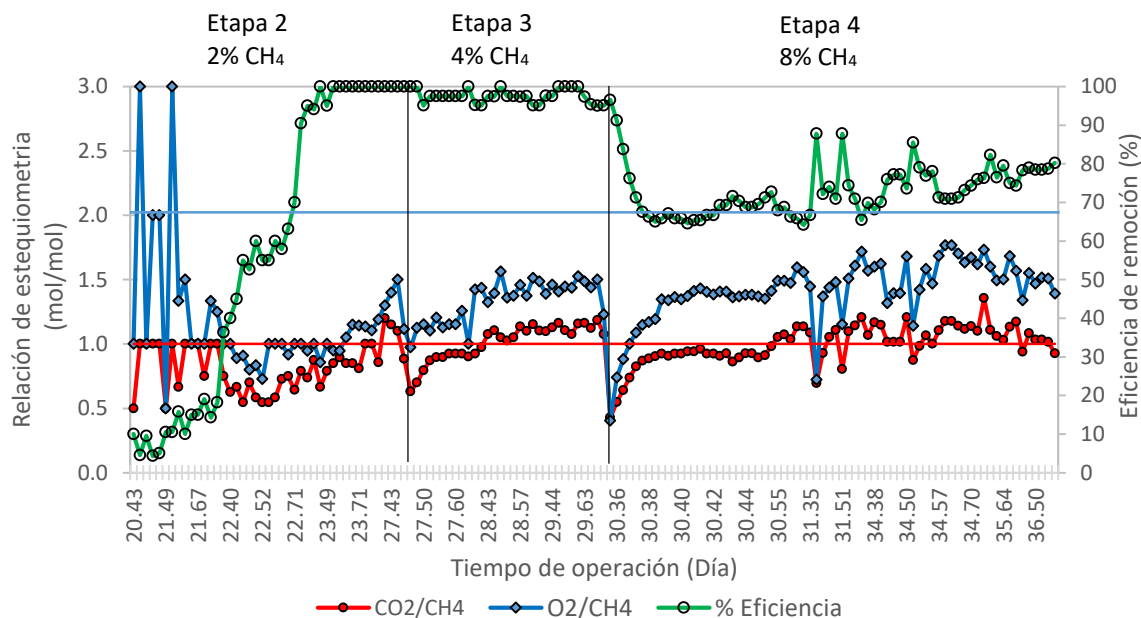


Figura 4.6 Relaciones de estequiometría y eficiencia de remoción. El eje de tiempo de operación solo muestra los momentos en que se hicieron mediciones de concentración de gases a la entrada y salida

Una relación  $CO_2/CH_4$  igual a 1, se interpreta como una mineralización completa del  $CH_4$  consumido. Por otra parte, que la relación  $CO_2/CH_4$  sea mayor a 1, indica que hay mayor presencia de  $CO_2$  a la salida de la que se esperaría si se considera como única fuente de  $CO_2$  la oxidación de moles de  $CH_4$ . Este caso mostraría que además del  $CH_4$  hay otras fuentes internas de carbono que producen  $CO_2$ . En el caso en que la relación es inferior a 1, se puede atribuir a que no todo el  $CH_4$  se está mineralizando, es decir, hay carbono de  $CH_4$  que se emplean en síntesis de celular, lo que representaría una acumulación de carbono debida al aumento de la biomasa al interior del biofiltro (en la sección 4.2.3.1 se presenta discusión sobre la acumulación de carbono). Los tres casos mencionados para la relación  $CO_2/CH_4$  se presentaron durante la operación del biofiltro (Figura 4.6). Respecto a la relación  $O_2/CH_4$ , si esta es igual a 2 se interpreta que el  $CH_4$  es oxidado completamente y el aceptor de electrones es el  $O_2$ . Una relación de  $O_2/CH_4$  mayor a 2, indica que hay una mineralización completa del  $CH_4$ , pero a su vez hay procesos paralelos que consumen  $O_2$ . Por otra parte, que la relación  $O_2/CH_4$  sea menor a 2, es el caso en el que hay una mineralización completa del  $CH_4$ , pero que existe otro aceptor de electrones además del  $O_2$ .

En la Tabla 4.4 se presentan algunas interpretaciones derivadas de revisar conjuntamente las dos relaciones de estequiometría  $O_2/CH_4$  y  $CO_2/CH_4$ .

Tabla 4.4 Interpretación de la combinación de las relaciones de estequiometría considerando el consumo de oxígeno y metano y la producción de dióxido de carbono en un biofiltro metanotrófico

| RELACIÓN                            | CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> =1  | CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> >1   | CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> < 1   |
|-------------------------------------|--|---|--|
| O <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> = 2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralización completa del CH<sub>4</sub></li> <li>• No hay otros procesos que consuman O<sub>2</sub></li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralización completa del CH<sub>4</sub></li> <li>• Hay otros procesos que producen CO<sub>2</sub> (p.ej. respiración endógena)</li> <li>• Hay un aceptor de e<sup>-</sup> diferente al O<sub>2</sub></li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralización incompleta del CH<sub>4</sub></li> <li>• Hay otros procesos que consumen O<sub>2</sub> y no producen CO<sub>2</sub></li> </ul> |
| O <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> > 2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralización completa del CH<sub>4</sub></li> <li>• Hay otros procesos que consumen O<sub>2</sub></li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralización completa del CH<sub>4</sub></li> <li>• Hay otros procesos que consumen O<sub>2</sub> y producen CO<sub>2</sub> (p.ej. respiración endógena)</li> <li>• El aceptor de e<sup>-</sup> es el O<sub>2</sub></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralización incompleta del CH<sub>4</sub></li> <li>• Hay otros procesos que consumen O<sub>2</sub> y no producen CO<sub>2</sub></li> </ul> |
| O <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> < 2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hay un aceptor de e<sup>-</sup> diferente al O<sub>2</sub></li> <li>• Mineralización completa del CH<sub>4</sub></li> <li>• No hay otros procesos que consuman O<sub>2</sub></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralización completa del CH<sub>4</sub></li> <li>• Hay otros procesos que producen CO<sub>2</sub> (p.ej. respiración endógena)</li> <li>• Hay un aceptor de e<sup>-</sup> diferente al O<sub>2</sub></li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralización incompleta del CH<sub>4</sub></li> <li>• No hay otros procesos que consumen O<sub>2</sub></li> </ul>                           |

Con las gráficas reportadas por Pawlowska et al. (2011) de los perfiles de concentración de gases (O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>), se calculó el CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub> consumido y el CO<sub>2</sub> producido, para posteriormente determinar las relaciones de estequiometría. En la Tabla 4.5 se reportan las relaciones de estequiometría determinadas para dos de los materiales usados como lecho de soporte. Como lo indicaron Pawlowska et al. (2011), la composta presentó una relación CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mayor a 1, sugiriendo una fuente adicional de carbono y para el caso de la composta mezclada con bentonita se obtiene una relación menor a 1, lo que los autores explicaron como asimilación de carbono por parte de las células, es decir carbono orientado hacia el anabolismo. Respecto a la relación O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, al igual que la presente investigación, ésta es menor a 2. De acuerdo a la Tabla 4.4, para esta situación habría otro aceptor de electrones, además del O<sub>2</sub>.

Brandt et al. (2016) en su trabajo a escala laboratorio (ver sección 1.3.5), discuten el consumo de CH<sub>4</sub> y producción de CO<sub>2</sub> con base en el coeficiente de rendimiento (Y<sub>CO<sub>2</sub></sub>), el

cual es de  $2.75 \text{ g CO}_2 \text{ g CH}_4^{-1}$  (valor teórico) cuando la relación  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  es igual a 1. Durante el arranque de operación (95 días) de los tres biofiltros evaluados (diferentes materiales de lecho de soporte) presentaron coeficientes de rendimiento superiores a 2.75, es decir, porcentajes de mineralización superiores al 100%. En ese trabajo, durante el periodo de arranque,  $Y_{\text{CO}_2}$  varió entre  $3.39 \pm 1.90 \text{ g CO}_2 \text{ g CH}_4^{-1}$  (biofiltro de composta con anillos plásticos con esponja) a  $3.79 \pm 1.75 \text{ g CO}_2 \text{ g CH}_4^{-1}$  (biofiltro de composta con vermiculita expandida), valores que superan el  $Y_{\text{CO}_2}$  teórico. En el estado estacionario,  $Y_{\text{CO}_2}$  varió entre  $2.75 \pm 1.32 \text{ g CO}_2 \text{ g CH}_4^{-1}$  (biofiltro composta con anillos plásticos con esponja) a  $2.83 \pm 1.30 \text{ g CO}_2 \text{ g CH}_4^{-1}$  (biofiltro de composta con escoria de alto horno), valores de  $Y_{\text{CO}_2}$  cercanos al valor teórico. Según Brandt et al. (2016), los valores de  $Y_{\text{CO}_2}$  obtenidos durante el arranque se pueden atribuir a la presencia de microorganismos no específicos para la oxidación de  $\text{CH}_4$  con actividad metabólica significativa. Por otra parte, para el periodo estacionario, los microorganismos metanótrofos predominarían sobre los inespecíficos, acompañado por una baja producción de biomasa, algo característico de sistemas en estado estacionario. Los mismos autores presentan perfiles de concentración promedio de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  a diferentes alturas de los biofiltros operados a una concentración de  $\text{CH}_4$  a la entrada de  $0.34 \pm 0.07\%$  y un TRLV de 42.8 min; con estos perfiles se determinaron las relaciones de estequiometría presentadas en la Tabla 4.5. Para las columnas de biofiltración de composta con anillos plásticos y esponja y la de composta con escoria de alto horno, la relación de  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  en el estado estacionario es mayor a 1, mientras que para la columna de composta y vermiculita expandida la relación es de 0.9. Esto se puede relacionar con los valores de coeficiente de rendimientos presentados y la desviación estándar asociada. Por falta de información en relación con la concentración de  $\text{O}_2$  a diferentes profundidades no fue posible determinar la relación  $\text{O}_2/\text{CH}_4$  para ese trabajo.

Gómez-Borraz (2017) (ver sección 1.3.2) presenta las curvas de consumo de  $\text{CH}_4$  y  $\text{O}_2$  y producción de  $\text{CO}_2$  con respecto al tiempo obtenidas mediante un respirómetro, las cuales se usaron para determinar las relaciones de estequiometría. La concentración inicial de los gases fue 2.2%  $\text{CH}_4$ , 0.8%  $\text{CO}_2$  y 18.9%  $\text{O}_2$ , la concentración final (después de 0.8 horas) fue de 0.1%  $\text{CH}_4$ , 2.2%  $\text{CO}_2$  y 16.7%  $\text{O}_2$ . Tabla 4.5 presenta las relaciones de estequiometría determinadas, las cuales no cumplen la relación.

Fjelsted et al. (2020) en un biofiltro a escala piloto (ver sección 1.3.5) hizo mediciones de concentración de gases al inicio y final de las etapas evaluadas. En la Tabla 4.5 se presentan las relaciones de estequiometría determinadas para tres etapas. En el trabajo de Fjelsted et al. (2020), al igual que la presente investigación (Figura 4.6), se puede observar como con el paso del tiempo las relaciones cambian. De igual forma, en los resultados de Fjelsted et al. (2020) no se cumplen las relaciones estequiométricas.

Para ninguno de los trabajos presentados en la Tabla 4.5 se cumplen las relaciones de estequiometría, si bien hay relaciones de  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  cercanas a 1 con valores de 0.9 (Brandt



et al., 2016 y Pawlowska et al., 2011), la relación O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> es la que mayor diferencia tiene con su valor teórico.

En el Anexo B, se muestran algunos ejemplos de cómo se determinaron las relaciones de CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> con la información reportada por otros autores y que se presenta en la Tabla 4.5. En estos trabajos de investigación, los autores no abordan las relaciones de estequiometría, por lo que fue necesario desarrollar los cálculos del Anexo B.

Tabla 4.5 Relaciones de estequiometría determinadas para diferentes trabajos de biofiltración de CH<sub>4</sub>

| Referencia                    | Medio filtrante y comentario   | CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub><br>Teórico: 1 | O <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub><br>Teórico: 2 |
|-------------------------------|--|--|---|
| <b>Pawlowska et al., 2011</b> | Composta   | 1.2  | 1.3   |
|                               | Composta con bentonita   | 0.9  | 1.0   |
| <b>Brandt et al., 2016</b>    | Composta con anillos plásticos y esponja   | 1.2  | N.D   |
|                               | Composta con escoria de alto horno   | 1.3  | N.D   |
|                               | Composta con vermiculita expandida   | 0.9  | N.D   |
| <b>Gómez Borraz, 2017</b>     | Composta (prueba en respirómetro batch)  | 0.6  | 1.0   |
|                               | Composta (Etapa 1 – día 11, 3 g <sub>CH<sub>4</sub></sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )    | 0.3  | 0.7   |
| <b>Fjelsted et al., 2020</b>  | Composta (Etapa 1 – día 62, 3 g <sub>CH<sub>4</sub></sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )    | 1.2  | 0.9   |
|                               | Composta (Etapa 2 – día 75, 4.5 g <sub>CH<sub>4</sub></sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )  | 2.3  | 2.1   |
|                               | Composta (Etapa 2 – día 109, 4.5 g <sub>CH<sub>4</sub></sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | 2.8  | 2.3   |
|                               | Composta (Etapa 3 – día 124, 9 g <sub>CH<sub>4</sub></sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )   | 3.0  | 2.8   |
|                               | Composta (Etapa 3 – día 192, 9 g <sub>CH<sub>4</sub></sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )   | 1.4  | 1.5   |
| <b>Actual trabajo</b>         | Composta (Etapa 2 – día 22 y día 23, 26.2 g m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )                  | 0.6  | 1.0   |
|                               |  | 0.7  | 0.9   |
|                               | Composta (Etapa 3 – día 27 y día 29 , 51.5 g m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )                 | 0.9  | 1.2   |
|                               |  | 1.2  | 1.5   |
|                               | Composta (Etapa 4 – día 30 y día 34, 102.6 g m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )                 | 0.9  | 1.4   |
|                               |  | 1.2  | 1.8   |

\*N.D= No determinada por falta de información en la referencia

#### 4.2.3.1 Acumulación de carbono

Adicional al análisis de las relaciones de estequiometría presentado en la sección 4.2.3, la concentración de CO<sub>2</sub> a la salida permite evaluar procesos de acumulación o liberación de carbono, los cuales se pueden asociar a síntesis celular o respiración endógena. La Figura 4.7 presenta la producción de CO<sub>2</sub> (P-CO<sub>2</sub> Ecuación 11) como una función de la CE. En un

biofiltro en el que no haya generación de biomasa la relación de  $P\text{-CO}_2/\text{EC}$  es igual a 2.75, resultado de la relación de las masas molares  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ , al ser la oxidación del  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$  una reacción equimolar. Para el biofiltro operado durante esta investigación, los datos experimentales de las etapas 2 y 3 ( $\text{CH}_4$  al 2% y 4%), se ajustan aproximadamente a la relación de la Ecuación 17. La pendiente es aproximada a la calculada cuando no existe crecimiento de biomasa (2.75). Respecto a los datos correspondientes a la etapa 4 (8%  $\text{CH}_4$ ), se observa que no se ajustan a la relación de estequiometría lineal (Ecuación 17). Se identifica que a medida que aumenta la CE, la tasa de producción de  $\text{CO}_2$  deja de tener una tendencia lineal clara.

$$P\text{-CO}_2 = 2.84 \text{ CE} - 7.34$$

Ecuación 17

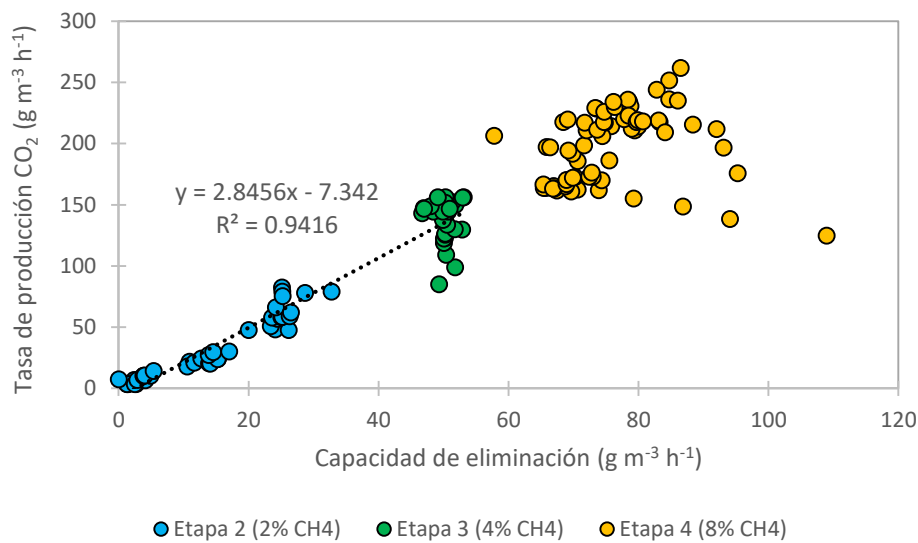


Figura 4.7 Producción de  $\text{CO}_2$  como una función de la capacidad de eliminación de  $\text{CH}_4$ . La línea punteada representa la relación de estequiometría de la oxidación de metano a dióxido de carbono (ecuación 17).

Como se menciona en el párrafo anterior, del valor de la pendiente de la recta que ajusta los datos de las etapas 2 y 3 en la Figura 4.7 se infiere que en ese tiempo no hubo crecimiento de biomasa. Sin embargo, tanto para ciertos momentos de la etapa 2 (alrededor del día 25), el final de la etapa 3 y toda la etapa 4, esta afirmación no se sostiene del todo. En tales momentos, podrían presentarse condiciones de acumulación (síntesis celular) o liberación (respiración endógena) de carbono y que pueden estar relacionados con cambios de concentración de  $\text{CH}_4$  a la entrada y variación de temperatura al interior del biofiltro.

Para poder hacer un análisis más detallado, se determinó la cantidad de carbono acumulado en el biofiltro por medio de la Ecuación 13 y luego estos valores fueron integrados con respecto al tiempo. En la Figura 4.8 se presenta la cantidad de carbono acumulado durante las fases 2 a 4. Los valores acumulados de carbono permiten una mayor comprensión de las

variaciones de las relaciones de estequiometría presentadas en la Figura 4.6 y la linealidad de la producción de CO<sub>2</sub> como una función de la CE (Figura 4.7).

En la Figura 4.8, se presentan valores positivos (carbono acumulado) en la parte intermedia de la experimentación, entre los días 22 y 31, para después volverse negativos (liberación de carbono que produce mayor CO<sub>2</sub> a la salida). Durante la etapa 2, del día 16 a 22, no hay acumulación de carbono y se puede inferir que no hay síntesis celular. Una vez que el sistema comienza a oxidar el CH<sub>4</sub> alimentado, la ER se incrementa de 40% a 100% (días 22 a 24) y el carbono inicia su acumulación en el sistema, indicando que el arranque de la actividad metabólica conlleva la síntesis celular. El incremento de la acumulación de carbono se presenta sólo durante dos días, para después, y hasta iniciada la etapa 3, mantenerse en una fase estacionaria.

El cambio de tendencia se da el día 29, cuando se inicia un descenso que en tres días (día 31) pasa a la zona de liberación de carbono. Este comportamiento de descenso puede significar que la biomasa acumulada durante el incremento de la actividad metanótrofa, cuando se ve expuesta a condiciones adversas de temperatura (60°C), pasa a una fase en la que la biomasa recurre a la oxidación de sus reservas (respiración endógena). En tales condiciones, no hay asimilación de carbono y el CH<sub>4</sub> se oxida para fines de catabolismo (demanda energética) y no de anabolismo (síntesis celular).

En la etapa 4, el biofiltro recibe la máxima carga de alimentación y de concentración de CH<sub>4</sub>, presentándose temperaturas que van desde los 31°C (nivel 1) y hasta los 67°C (nivel 3). El comportamiento mencionado para la etapa 3 se intensificaría en estas condiciones, al producir cambios en su metabolismo (estrés por temperatura y consumo de sus reservas celulares). Por otro lado, se presentarían condiciones favorables para un cambio de los microorganismos predominantes en el biofiltro, hacia metanótrofos termotolerantes y metanótrofos termófilos estrictos (Jäckel et al., 2005).

Durante la etapa 4, la ER es de 73%, siendo la menor registrada durante toda la operación del biofiltro. Los microorganismos no consumen todo el sustrato que reciben probablemente por cambios en su metabolismo provocados por la temperatura, que los lleva a consumir las reservas de carbono como estrategia de sobrevivencia. Como resultado, se produce mayor cantidad de CO<sub>2</sub> que el esperado por el CH<sub>4</sub> consumido y el balance de carbono se invierte. Como se describirá en la sección 4.4, el biofiltro presentó diferentes temperaturas en su volumen, por lo cual se puede considerar que algunos microorganismos oxidaban el CH<sub>4</sub>, aportando a la ER y otros microorganismos consumían sus reservas, en las zonas con mayor temperatura.

La discusión presentada anteriormente, se considera una hipótesis cuya prueba rebasa el objetivo de este trabajo de investigación. No obstante, se consideró importante iniciar un análisis y reportar el comportamiento del biofiltro en este aspecto. Para confirmar la hipótesis del cambio metabólico hacia la respiración endógena en las zonas expuestas a las

mayores temperaturas, se requeriría de mediciones adicionales para correlacionar los fenómenos de acumulación y liberación de carbono.

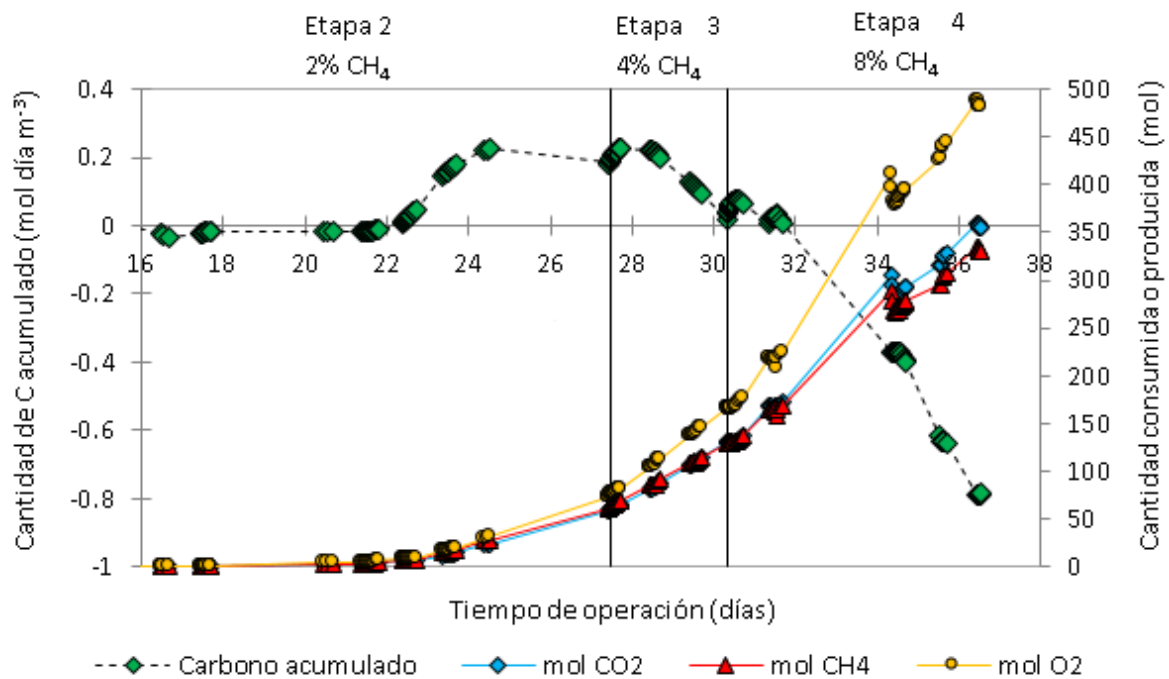


Figura 4.8 Relación de la acumulación de carbono, consumo de O<sub>2</sub>, y CH<sub>4</sub> y producción de CO<sub>2</sub> acumulados durante las etapas de biofiltración

Adicional a la cantidad de carbono acumulado presentado en la Figura 4.8, en la figura se presenta el consumo y producción acumulado de los gases de O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Al final de la operación del biofiltro, se obtuvo según el valor acumulado presentado en la Figura 4.8, que 329.97 moles de CH<sub>4</sub>, equivalentes a 5.29 kg de CH<sub>4</sub> fueron consumidas. De igual forma, el valor acumulado de las moles de CH<sub>4</sub> presentes en el gas de salida del biofiltro, es decir, el CH<sub>4</sub> que no se oxidó ni fue usado en el anabolismo, fue de 109.01 moles, equivalentes a 2.68 kg de CH<sub>4</sub>. Sumando el CH<sub>4</sub> consumido y el que sale, se tiene que 7.9 kg de CH<sub>4</sub> se suministraron durante los días de experimentación.

A nivel operativo se usaron dos cilindros de gas CH<sub>4</sub> comprimido de 99% de pureza, los cuales, según información dada por el proveedor, cada cilindro contenía 7.28 m<sup>3</sup> de gas. Determinando la masa de CH<sub>4</sub> equivalente al volumen de gas (ley de gases ideales a 25°C y 0.75 atm) se tiene que cada cilindro contenía 3.58 kg de CH<sub>4</sub>, es decir que en total se usaron 7.16 kg de CH<sub>4</sub> durante la experimentación. Si se aplica la pureza de los cilindros, el total de CH<sub>4</sub> usado sería de 7.08 kg de CH<sub>4</sub>.

Al comparar la masa total suministrada por los cilindros de gas y la obtenida con la integración de las mediciones de concentraciones de CH<sub>4</sub> a la entrada y salida, se tiene que el balance de masa para el CH<sub>4</sub> no ajusta por un 10%. Este desajuste de la masa de CH<sub>4</sub> usado, se puede atribuir a las variaciones inherentes de la operación del piloto y a una

posible desviación entre las mediciones puntuales de CH<sub>4</sub> a la entrada y a la salida, con su correspondiente cálculo integrado realizado al final de cada etapa, contrastado con la masa de CH<sub>4</sub> realmente suministrada por los cilindros.

Con relación a la biomasa, en este trabajo de investigación no se realizaron mediciones que permitieran evaluar un crecimiento celular. Sin embargo, por medio de la acumulación de carbono presentada en la Figura 4.8, la relación de estequiometría de CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> (Figura 4.6) y la cinética de crecimiento de microorganismos metanotróficos, se puede tener una aproximación de la posible biomasa que creció durante el inicio de operación del biofiltro.

Si se tiene mineralización completa del CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub>, no hay crecimiento de biomasa y la relación CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> es igual a 1, si esta relación es menor a 1, se puede suponer que el CH<sub>4</sub> se oxida hasta CH<sub>2</sub>O y se utiliza para procesos de anabolismo (Figura 1.2); tal situación se pudo presentar durante la etapa 2, cuando la relación CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> fue menor a 1. Como se mostró en la Figura 4.6, para el periodo del día 22.38 al 23.71, se presentó la mayor acumulación de carbono (Figura 4.8). En ese tiempo, el CH<sub>4</sub> consumido acumulado fue de 15.21 mol y el CO<sub>2</sub> producido acumulado fue de 11.71 mol, lo que indica que 3.5 mol de CH<sub>4</sub> no fueron oxidados completamente.

La cinética de crecimiento de microorganismos metanotróficos tipo I se reporta en 0.585 g<sub>sólidos totales</sub> g<sub>CH<sub>4</sub></sub><sup>-1</sup> (AlSayed et al., 2018). Si se asume que las 3.5 mol de CH<sub>4</sub> que equivalen a 56 g CH<sub>4</sub>, se usaron para síntesis celular, durante la etapa 2 se pudo tener un crecimiento de 32 g<sub>sólidos totales</sub>.

### 4.3 Balance de agua

Considerando la dinámica de suministro, condensación, evaporación y generación de agua que se puede presentar durante la operación de un sistema de biofiltración, realizar balances de agua, si bien es complejo, permitiría una mayor comprensión del proceso.

La Figura 4.9 representa el balance de agua calculado para el biofiltro, considerando el agua generada durante la oxidación de CH<sub>4</sub>. De acuerdo a la Ecuación 1, una mol de CH<sub>4</sub> produce 2 moles de agua. En el cálculo se tiene en cuenta la cantidad de agua que contenía la composta con que se empacó el biofiltro y la que conservó una vez finalizada la operación del sistema. Respecto a la cantidad de agua con que entraba y salía la corriente de gas, se usó la ecuación de Antoine (Ecuación 4) y se determinó la masa de agua que contenía el gas de acuerdo a la temperatura. Finalmente se tuvo en cuenta el agua que se adicionó esporádicamente por la parte superior del biofiltro y el limitado volumen de lixiviado que se recuperó al finalizar el experimento.

La Tabla 4.6 presenta la cantidad de agua acumulada durante toda la operación del biofiltro para cada una de las entradas y salidas. Respecto a la cantidad de agua determinada por la humedad final, como se comentó en la sección 4.1.4 el contenido de humedad era diferente para varias zonas del biofiltro (paredes, centro y parte superior). Debido a que no

se tiene certeza del volumen que representa cada una de estas zonas, se optó por promediar la humedad final y así determinar la cantidad de agua que conservaba la composta. El balance de agua, como se aprecia, no cierra y se tiene una diferencia del 12.6% entre las entradas y salidas.

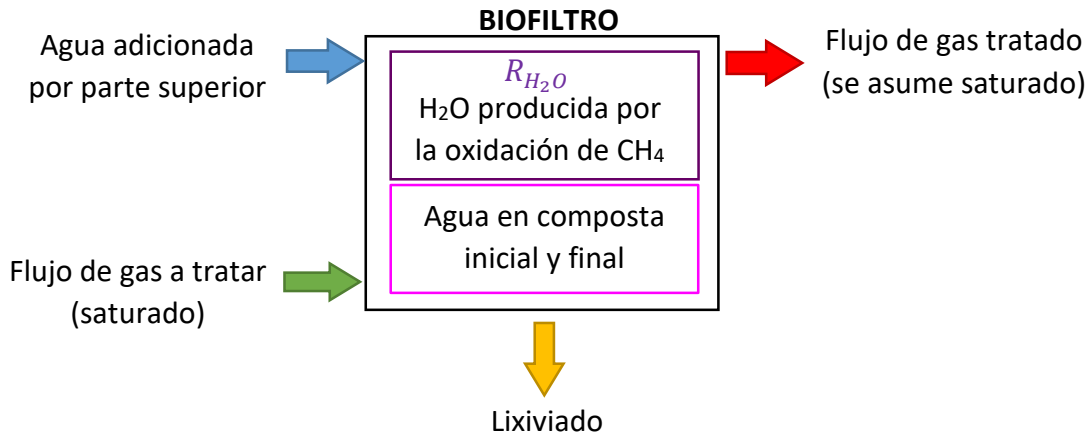


Figura 4.9 Representación del balance de agua en el biofiltro de composta

Tabla 4.6 Balance de agua

| Fuente de agua  | Cantidad de agua (Litros) |
|---|---------------------------|
| Agua en composta inicial (47.3% humedad)                      | 90.94                     |
| Flujo de gas a tratar (Saturado con columnas humidificadoras) | 14.56                     |
| Agua adicionada por parte superior                            | 3.72                      |
| Agua por reacción   | 11.8                      |
| <b>Total entrada</b>  | <b>121.02</b>             |
| Agua en composta final (41.2% humedad)                        | 79.15                     |
| Flujo de gas tratado (se asume que está saturado)             | 26.56                     |
| Lixiviado   | 0.06                      |
| <b>Total salida</b>   | <b>105.77</b>             |

La diferencia entre la cantidad de agua a la entrada y salida, se puede atribuir a diferentes fuentes de error. La estimación del contenido de agua en la composta parece ser el más importante, considerando que representa casi el 80% del agua del balance al final del experimento, además que el valor de humedad de la composta es un promedio que puede no ser plenamente representativo. Otra fuente de error se identifica en la estimación de la

cantidad de agua que sale con el gas tratado; como se indicó anteriormente, su cálculo se hace asumiendo que esta corriente está saturada. Adicional no fue posible determinar la cantidad de agua que salió del sistema por condensación y escurrimiento hacia afuera del recipiente. Si bien la mayoría del agua condensada cae sobre la composta y queda dentro del sistema, se observó en algunas mañanas, que el borde exterior de la tapa del biofiltro se encontraba mojado y en algunas ocasiones fue posible observar gotas de agua escurriendo. Esta situación fue más evidente y persistente durante el suministro de  $\text{CH}_4$  al 8%, cuando se alcanzaron temperaturas por encima de los  $60^\circ\text{C}$ .

Respecto a la cantidad de agua producto de la oxidación de  $\text{CH}_4$ , esta representa el 9.7% del total de agua que entra al sistema, siendo del mismo orden de magnitud del ingreso de agua con la que se satura el gas de entrada (12% a través de las columnas humidificadoras). Es evidente que el agua producida dentro del sistema contribuye a mantener la humedad de la composta.

La Figura 4.10 muestra el procedimiento de adición de agua al biofiltro por la parte superior y mediante las columnas humidificadoras. Para las columnas humidificadoras se muestra el nivel que alcanzaba el agua cuando se llenaban y cómo pasados 4 días, el nivel había descendido, siendo mayor en la primera columna, lo cual se explica ya que era en la columna 1 donde ingresaba el aire sin agua (máximo gradiente de concentración) y posteriormente pasaba a la columna 2 y tomaba de ésta la cantidad de agua que hacía falta para su saturación.

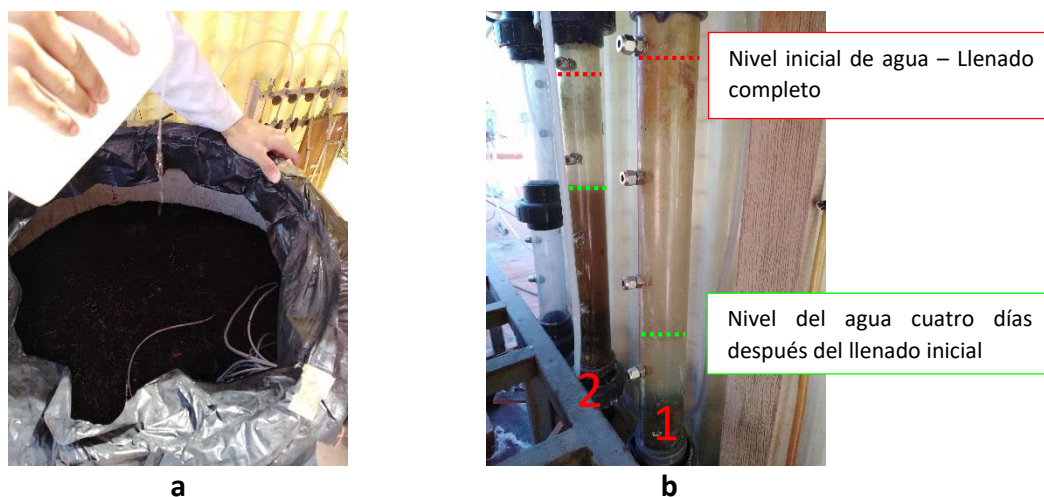


Figura 4.10 Adición de agua al biofiltro a) agua por la parte superior y b) columnas humidificadoras 1 y 2

En la Tabla 4.7 se presenta la cantidad aproximada de agua que fue suministrada al biofiltro por medio de las columnas humidificadoras. Es un valor aproximado debido a que no se llevó un control estricto del volumen de agua que se adicionaba a cada columna cuando el nivel descendía. El valor obtenido de agua adicionada a las columnas humidificadoras

(12 litros) es del mismo orden de magnitud que el obtenido para la corriente de gas de entrada (14 litros).

Tabla 4.7 Relación de agua aproximada adicionada a las columnas de humidificación

| Aspecto   | Valor          |                |
|---|----------------|----------------|
| Volumen columna (L)   | 1.7            |                |
| Volumen de agua en cada columna (L)   | 1.2            |                |
| Tasa de pérdida de agua por columna (L/d)   | Columna 1: 0.2 | Columna 2: 0.1 |
| Volumen de agua adicionado por columna cada 4 días (L)                                | Columna 1: 0.8 | Columna 2: 0.4 |
| Total de veces en que se llenaron las columnas  | 10             |                |
| Total volumen de agua adicionado durante operación (41 días desde la etapa 0 a 5) (L) | 12             |                |

Respecto al lixiviado, éste se pudo recuperar por una salida ubicada en el fondo del biofiltro (Figura 4.11a) y también por la manguera que conectaba al manómetro de agua, el cual al desconectarlo generó una despresurización del sistema y permitió que el agua que estaba en el fondo del biofiltro llegara a esta manguera (Figura 4.11b). El lixiviado se recuperó dos días después de dejar de suministrar  $\text{CH}_4$  al biofiltro (periodo de enfriamiento). Durante estos dos días se pasó aire saturado y se esperó a que la temperatura del biofiltro descendiera hasta una temperatura ambiente. El pH del lixiviado recuperado por la manguera del fondo tenía un pH de 8.22 y el pH del lixiviado recuperado en la manguera conectada al manómetro era de 8.97. Ambas muestras de lixiviado tenían un color café rojizo, color característico de la degradación de materia orgánica natural (composta), con un volumen total de 60 ml.

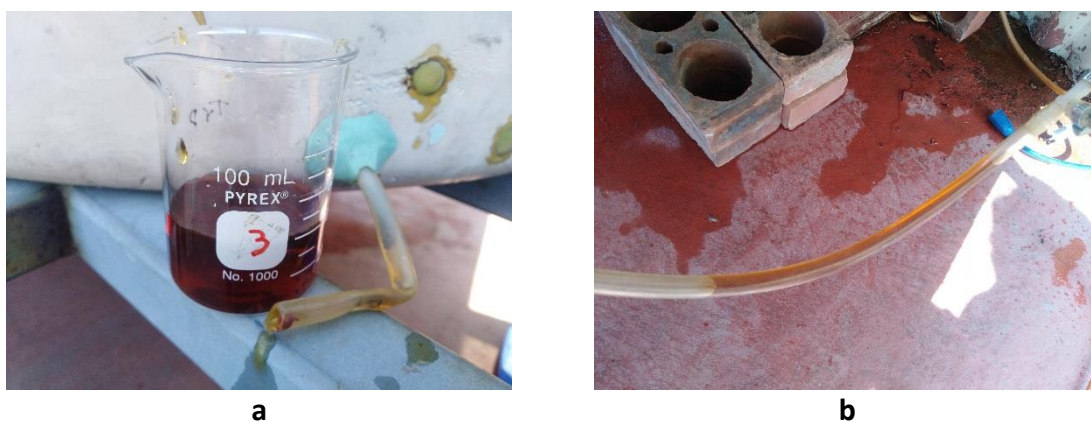


Figura 4.11 Lixiviado recuperado a) Manguera fondo del biofiltro y b) manguera conectada a manómetro de agua



#### 4.4 Variación de temperatura al interior del biofiltro

Para establecer la relación de la temperatura interna del biofiltro con respecto a la temperatura ambiental y radiación solar, se utilizaron los datos del Sistema de Estaciones Meteorológicas Automáticas EMA's (Comisión Nacional del Agua). Se obtuvo la información de la estación Ecoguardas, ubicada en la Ciudad de México en el Municipio de Tlalpan, a una distancia aproximada de 8 km en línea recta desde el lugar de experimentación.

La temperatura al interior del biofiltro se presenta para las cinco etapas de la experimentación (Tabla 3.1). Durante la etapa 1 (0% CH<sub>4</sub>) se pudo observar el efecto de la temperatura ambiente al interior del biofiltro, considerando que los únicos fenómenos de transferencia de calor que interferían con la variación de la temperatura interna del biofiltro eran: la radiación solar, la temperatura del gas de entrada y el intercambio de calor por las paredes del biofiltro.

Adicional a los procesos que influían en la etapa 1, para las etapas 2 a 4 (2% CH<sub>4</sub>, 4% CH<sub>4</sub> y 8% CH<sub>4</sub>) se incorpora el efecto del calor generado por la oxidación biológica de CH<sub>4</sub>. En la etapa 2 fue posible identificar el inicio de la actividad de los microorganismos metanótrofos por medio del registro del aumento de la temperatura interna del sistema y el aumento de la capacidad de eliminación. Para las etapas 3 y 4, la máxima temperatura registrada, así como los cambios de las zonas con mayor temperatura fueron los aspectos que se consideraron importantes.

Finalmente, en la etapa 5, en la que se retoma el paso de una corriente de gas con solo aire (0% CH<sub>4</sub>), se pudo observar cómo era el proceso de enfriamiento del biofiltro, qué zonas se enfriaban con mayor facilidad y cuánto tiempo se requería para que en todas las zonas del biofiltro la temperatura descendiera hasta aproximadamente la temperatura ambiental.

##### 4.4.1 Descripción de la etapa 1 - (0% CH<sub>4</sub>)

La primera etapa del trabajo experimental consistió en el paso de una corriente gaseosa con concentración de 0% CH<sub>4</sub>. Esta corriente de solo aire saturado en agua fue impulsada por dos bombas de diafragma (Alita) las cuales calentaban en cierto grado el aire.

Como se indicó en la sección 3.1.4, los sensores al interior del biofiltro se colocaron en 4 niveles de altura y en 7 puntos en cada nivel (Figura 3.7 y Figura 3.9), los cuales permitieron registrar los diferentes perfiles de temperatura con respecto al eje axial y radial.

En la Figura 4.12 se muestra la temperatura registrada por los sensores ubicados en el centro del biofiltro para siete de los catorce días de la etapa 1. El comportamiento de los días no mostrados fue similar. En la etapa 1, se identificó que los perfiles de temperatura en el centro del biofiltro en los niveles 1 y 4, niveles donde la composta está más cerca del exterior, siguen el patrón de oscilación asociado al cambio de temperatura ambiental, valles y picos, que se presentan con los cambios del día a la noche. Para el nivel 1 se considera que la temperatura de esta zona tiene mayor relación con la temperatura del gas de entrada

y en menor medida con la ambiental, contrario al nivel 4 donde hay una mayor relación con las variaciones de la temperatura ambiente. La parte superior del biofiltro tiene mayor área expuesta al contacto con el espacio vacío y por lo tanto con la temperatura del ambiente, permitiendo un mayor intercambio de calor entre el biofiltro y el exterior.

Los niveles 2 y 3, niveles medios de la composta dentro del biofiltro, presentan un patrón cercano al lineal, lo cual se produce por el reducido efecto de las variaciones de la temperatura ambiente sobre esta zona del biofiltro. Estos niveles, presentan una temperatura casi constante en el centro porque es la zona que menor gradiente de temperatura presenta con la zona a su alrededor, ya sea en el plano transversal o axial.

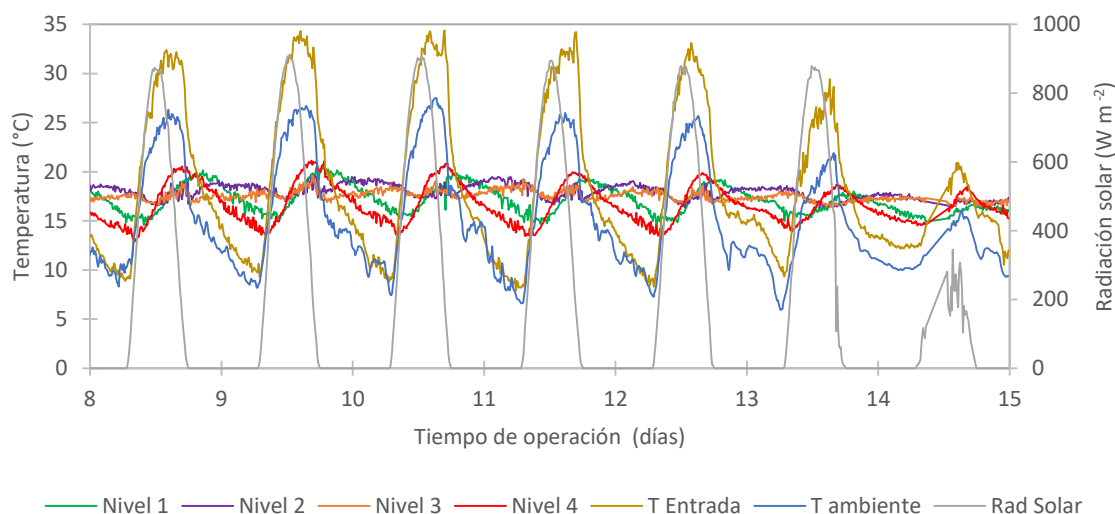


Figura 4.12 Temperatura registrada en el centro del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 1 (0% CH<sub>4</sub>).

En esta etapa, la temperatura máxima en los cuatro niveles fue similar, oscilando entre los 19°C a 21°C. Por el contrario, la temperatura mínima registrada difirió entre los niveles externos y centrales, lo cual tuvo relación con la incidencia de la temperatura ambiente y la facilidad de transferir o recibir calor. La temperatura mínima en los niveles 1 y 4 presentó valores entre los 11°C y 12°C. El centro del biofiltro (nivel 2 y 3) tuvo temperaturas mínimas constantes entre los 14°C. La temperatura ambiental máxima estuvo cercana a los 27°C y la mínima a los 6°C.

La zona central se puede considerar como la menos afectada por las condiciones externas al ser comparada con la zona de las paredes del biofiltro, las cuales se ven directamente influenciadas por la temperatura exterior, al registrar una mayor temperatura hacia el mediodía y disminuyendo con el paso del tiempo hacia la noche. En la Figura 4.13 se presentan los patrones de temperatura para tres días representativo de la etapa 1. Las temperaturas registradas en las cuatro caras del biofiltro presentan el mismo patrón, siendo diferentes únicamente en los grados centígrados alcanzados. La cara con más efecto de la

radiación solar fue la sur con temperaturas cercanas a los 30°C y la de menor efecto la oriente con temperaturas cercanas a los 26°C.

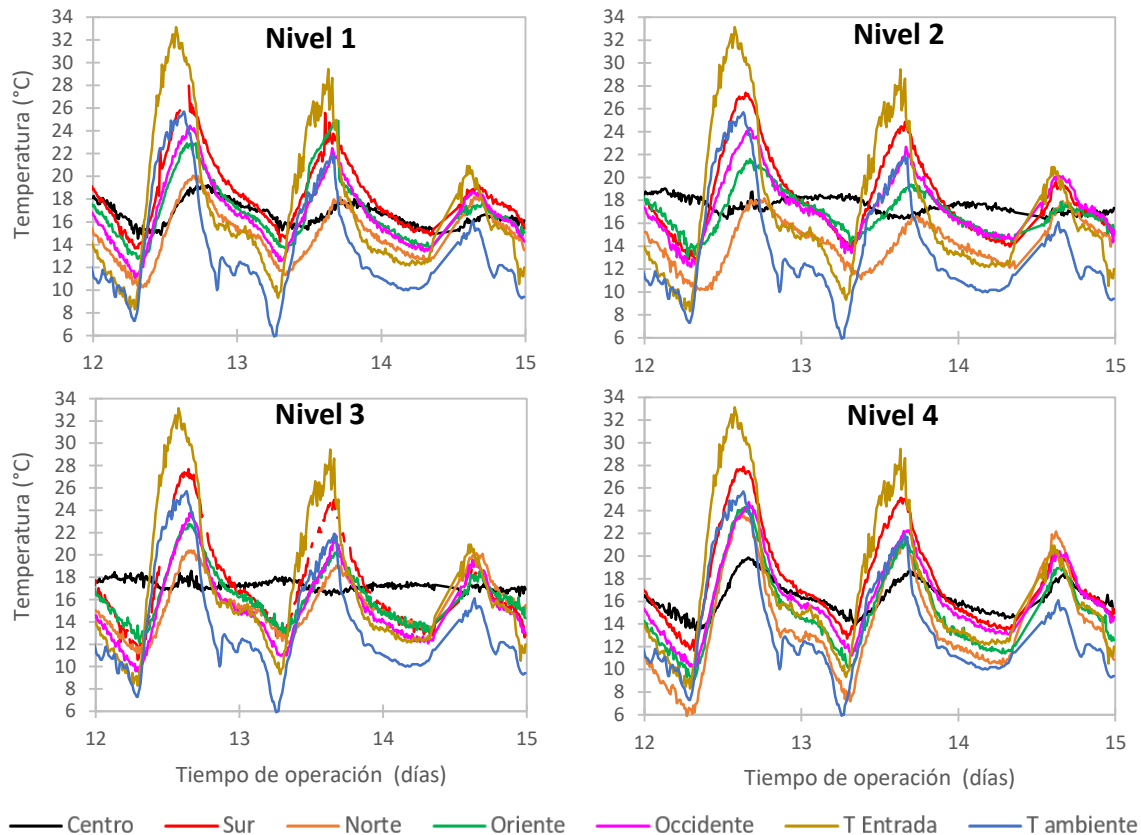


Figura 4.13 Temperatura registrada en el perímetro y centro del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 1 (0% CH<sub>4</sub>).

La importancia de la etapa 1, más allá de registrar temperaturas máximas y mínimas las cuales son una referencia que dependen directamente de las condiciones ambientales y operacionales, fue identificar los diferentes patrones de temperatura que se presentan en el sistema de biofiltración cuando la temperatura ambiental y radiación solar son las únicas fuentes de calor. Con base en ello, es posible realizar comparaciones con los patrones registrados cuando a las fuentes de calor ambientales se añade el calor producido por la oxidación de CH<sub>4</sub>. Además, esta etapa permitió reconocer que la zona central tanto axial y radial del biofiltro, es la zona con menor capacidad de transferencia de calor, aspecto con implicaciones importantes para introducir mejoras en el desempeño del biofiltro, como será discutido más adelante.

#### 4.4.2 Descripción de la etapa 2 - (2% CH<sub>4</sub>)

El biofiltro operó del día 15 a 27 con una concentración de CH<sub>4</sub> a la entrada entre 1.7 a 2.8% (valor objetivo: 2%) lo que equivale a una carga de alimentación promedio de  $26.35 \pm 2.93$

g CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>. El cambio de la concentración a la entrada se atribuye a la variación del flujo de CH<sub>4</sub> suministrado por la bomba peristáltica.

En esta etapa, los cambios de temperatura registrados al interior del biofiltro fueron, como era de esperarse, diferentes a los de la Etapa 1. El inicio de la oxidación biológica del CH<sub>4</sub> generó zonas de mayor temperatura al interior del biofiltro y por consiguiente cambios en los patrones antes registrados. La eliminación franca del CH<sub>4</sub> se registró seis días después de haber iniciado su suministro. El tiempo requerido para este arranque se atribuye a la aclimatación, reactivación y crecimiento de los microorganismos capaces de oxidar el CH<sub>4</sub>. A diferencia de otras investigaciones en las que el biofiltro se inoculó con lodos aerobios provenientes de plantas de tratamiento de aguas (Fjelsted et al., 2020 y Gómez-Borraz 2017), en este trabajo no se hizo una inoculación propiamente dicha. En su lugar, se utilizó una composta previamente empleada en un biofiltro que oxidó CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S, pero esta estuvo almacenada alrededor de un año bajo sombra.

En la Figura 4.14 se puede observar la temperatura registrada por los sensores ubicados en el centro del biofiltro y distribuidos a diferentes alturas, así como la eficiencia de remoción obtenida durante esta etapa.

La primera evidencia de eliminación de CH<sub>4</sub> se registró dos días después de iniciar la etapa 2, el día 17 entre las horas 10:40 am a 12:55 am. Durante este periodo de tiempo, la ER pasó de 0% a 14.3% y posteriormente volvió al valor previo (nula remoción), hasta el día 21. La ER registrada el día 17 no provocó un cambio de temperatura medido en el interior del biofiltro; sin embargo, este momento puede ser considerado como la activación de la biomasa que se prepara metabólicamente para las nuevas condiciones de alimentación. Para el día siguiente (día 21), la temperatura presenta un cambio rápido y de corta duración, aproximadamente de 2 horas y con un incremento de temperatura que paso de 12°C a 37°C en los sensores instalados en el centro del biofiltro y un incremento hasta 40°C para los sensores de la cara oriente (Figura 4.15). El cambio rápido de temperatura se registró en 23 de los 30 sensores instalados en el sistema de biofiltración y coincide con una menor concentración de CH<sub>4</sub> a la salida, alcanzando una ER del 19%. Los sensores que no registraron el cambio de temperatura son los ubicados en el primer nivel (T1, T2, T4, T5 y T6), el asignado para la temperatura del gas de entrada (T3) y el ubicado en la pared externa del biofiltro (T30). Los sensores T7 y T8 ubicados en el centro del primer nivel si registraron el incremento de temperatura. La ubicación de todos los sensores se presenta en la Figura 3.9).

Al parecer, el cambio rápido en la temperatura se debió a la repentina oxidación de CH<sub>4</sub>, probablemente en el nivel 1 y que generó calor, el cual fue transportado por el flujo de entrada a las zonas más altas del biofiltro. Esta explicación es corroborada por el cambio de pendiente de los perfiles de temperatura de los sensores ubicados en el centro, en especial el sensor ubicado en el nivel 3 del biofiltro. Este sensor después del pico presentado el día 21 aumenta su temperatura de manera lineal, pasando de una temperatura inferior a los

18 °C hasta llegar a los 33°C. Los otros sensores también aumentan su temperatura, pero su cambio se ve en días posteriores: nivel 2 un día después, y nivel 1 día y medio después con la mayor pendiente ascendente, mientras que el nivel 4 no presenta una variación tan clara, al mantener las oscilaciones debidas a la influencia de la temperatura ambiente, como ya fue explicado anteriormente.

Como se indicó, el nivel 3 es la zona del biofiltro que primero registra un aumento de temperatura. Sin embargo, para el día 23.5, cuando se alcanza el 100% de ER, los tres primeros niveles convergen en el mismo valor (34°C), a partir de ese día, el nivel 2 se incrementa sobre los demás, llegando a los 49°C al final de la etapa 2. El nivel 4 se mantuvo claramente debajo del resto de los niveles, en un patrón de valles y picos que no superaron los 33°C. El nivel 1 también presenta un patrón semejante, aunque más atenuado y con temperaturas máximas mayores (47°C). Estos valles y picos fueron característicos de la temperatura del gas de entrada y la influencia ambiental.

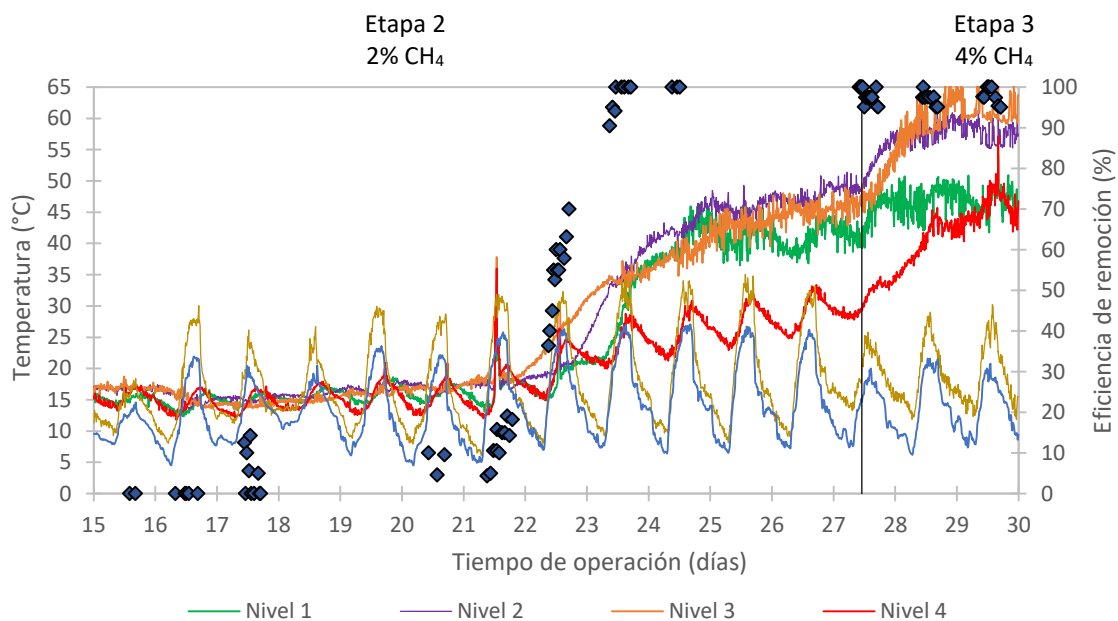


Figura 4.14 Temperatura registrada en el centro del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 2 (2% CH<sub>4</sub>).

Un comportamiento similar al descrito para el sensor del centro ubicado en el nivel 4, se presenta en los sensores ubicados en el perímetro del biofiltro a distintos niveles. En la Figura 4.15, se muestran los sensores correspondientes a la cara oriente, seleccionada para ejemplificar la variación de la temperatura en las paredes del biofiltro debido a que es una de las dos zonas en que la radiación solar tuvo menor incidencia (caras norte y oriente). Los perfiles de temperatura en la cara oriente del biofiltro, siguen patrones ondulatorios semejantes a los de la temperatura ambiente, por estar cerca a la pared. Los niveles 1 y 2

hasta el día 25 tienen un aumento similar de la temperatura, y para ese día los sensores de ambos niveles alcanzan una temperatura de 39°C para las horas del día con mayor intensidad del sol. En el nivel 2 se mantiene esta temperatura máxima hasta el final de la etapa 2, siendo el nivel que presentó las mayores temperaturas. Por el contrario, el nivel 1, después del día 25 se separa de esa tendencia y registra menores temperaturas máximas (33°C) hasta el término de esta etapa., momento en que se esperaba un nuevo aumento debido a una mayor concentración de CH<sub>4</sub> en el gas de entrada. Se considera, por lo tanto, que el nivel 1 no presenta acumulación de calor debido a que el calor es transportado por el flujo de gas de entrada. El nivel 3 sigue un patrón semejante al del nivel 1, mientras que el nivel 4 se mantiene como el de menor temperatura, con máximo de 28°C.

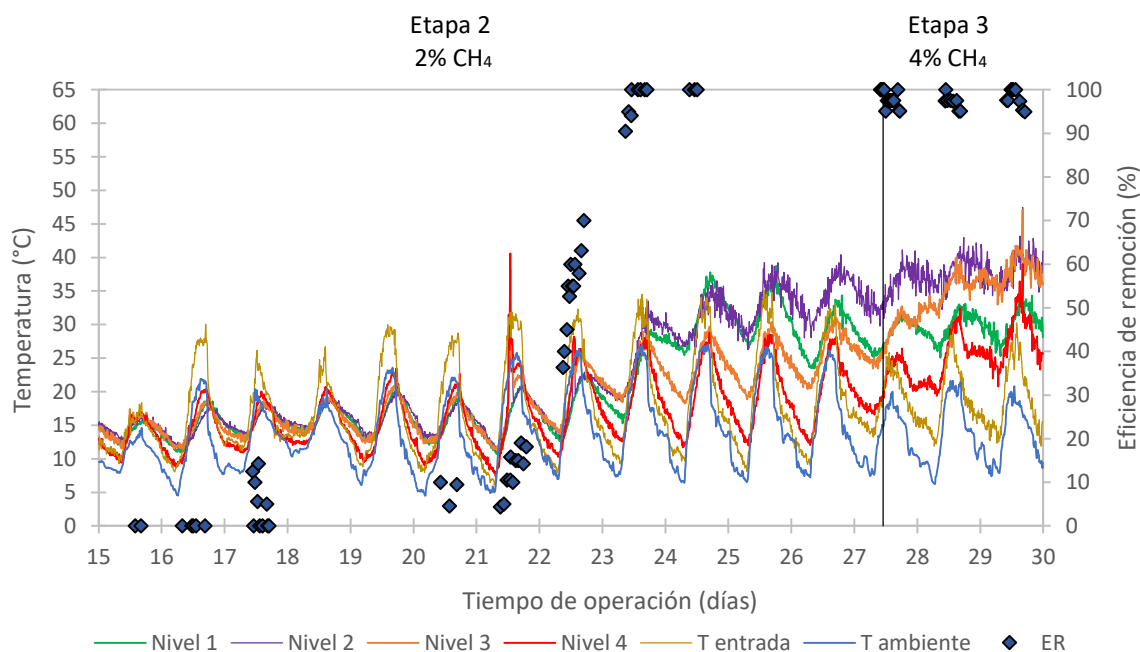


Figura 4.15 Temperatura registrada en el interior de la cara oriente del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 2 (2% CH<sub>4</sub>).

El periodo comprendido entre los días 23 a 27 (antes del cambio a 4% de concentración de CH<sub>4</sub>) se considera como el periodo estacionario de la etapa 2, al tener una ER constante (100%) y no presentarse aumentos de temperatura por arriba de las oscilaciones ya mencionadas. Para caracterizar este periodo se tomó como referencia la temperatura máxima registrada en cada uno de los sensores ubicados al interior del biofiltro. No se promedian las temperaturas de este periodo, porque la temperatura ambiental tiene un efecto sobre la temperatura interna del biofiltro. La temperatura ambiental es diferente cada día de manera que el promedio de la temperatura tendría altos valores de desviación. En la Tabla 4.8 se presenta la temperatura registrada al interior del biofiltro durante el periodo estacionario de la etapa 2. Se identifica que el nivel 2 es la zona del biofiltro que tiene mayor acumulación de calor (mayor temperatura registrada por los sensores). Respecto a la variación radial, el centro es la zona con mayor temperatura, lo cual no solo

depende de la concentración de CH<sub>4</sub> que se está oxidando, sino, como se observó durante la etapa 1, la temperatura registrada en esta zona se relaciona a la baja conductividad térmica de la composta.

Tabla 4.8 Temperatura máxima para diferentes ejes axiales y niveles de altura del biofiltro durante el periodo estacionario de la etapa 2 (2% CH<sub>4</sub>)

| Temperatura al interior del biofiltro (°C) |       |        |     |         |           |
|--|-------|--------|-----|---------|-----------|
| Zona del biofiltro                         | Norte | Centro | Sur | Oriente | Occidente |
| Nivel 1                                    | 37    | 47     | 43  | 38      | 38        |
| Nivel 2                                    | 42    | 51     | 43  | 40      | 37        |
| Nivel 3                                    | 32    | 45     | 38  | 31      | 31        |
| Nivel 4                                    | 28    | 33     | 33  | 28      | 29        |

La etapa 2 permitió registrar el inicio de la actividad biológica y el incremento y la variación de la temperatura al interior del biofiltro, procesos relacionados, pero poco presentados en la literatura. Como se mencionó anteriormente, el día 17 presenta un incremento puntual de la ER (hasta 14.3%) que no se mantuvo y no produjo un aumento de la temperatura. El día 21 se obtiene una ER de 19% y se registra el primer aumento de temperatura. Para el día 22, la temperatura sigue aumentando al igual que la ER. Este día se registra un rápido incremento lineal de la ER situándose sobre el 70%, y al día siguiente alcanza al mediodía el 100% de eliminación, manteniéndose en este valor durante todo el resto de la etapa 2. En esta etapa se pudo confirmar que el centro del biofiltro es la zona con mayor acumulación de calor debido a su menor capacidad de enfriamiento y se identifica que a nivel axial también se puede delimitar una zona con acumulación de calor, la cual en esta etapa corresponde a la zona del nivel 2, a 0.15m después de la entrada de la corriente de gas (Tabla 4.8).

#### 4.4.3 Descripción de la etapa 3 y 4 - (4% y 8% CH<sub>4</sub>)

Después de la estabilización del sistema, en que a concentraciones inferiores al 2% de CH<sub>4</sub> la eficiencia de remoción era del 100%, se aumentó la concentración de CH<sub>4</sub> a la entrada. El biofiltro operó del día 27 a 30 con una alimentación de CH<sub>4</sub> entre 3.7% a 4.3% (valor objetivo: 4%) lo que equivale a una carga de alimentación de  $51.4 \pm 2.0 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . Después de tres días de haber iniciado la etapa 3 y en los que se obtiene una eficiencia de remoción de  $97 \pm 1.7\%$ , se aumenta la carga de alimentación para operar durante los días 30 a 36 con una concentración de CH<sub>4</sub> a la entrada entre 7.7 y 8.4% (valor objetivo: 8%) lo que equivale a una carga de alimentación de  $102.6 \pm 5.7 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . La eficiencia de remoción de la etapa 4 fue de  $73 \pm 8.7\%$ .

Las etapas 1 y 2 permitieron identificar los patrones de temperatura que se establecieron en distintas zonas del biofiltro, así como los lugares en los que se presentaba una acumulación de calor. Para las etapas 3 y 4, adicional al objetivo de caracterizar la

distribución de calor, se tenía el de registrar la máxima temperatura alcanzada por el biofiltro al operar con concentraciones de  $\text{CH}_4$  superiores al 2% y asociarla a una eventual reducción de la ER.

En la etapa 3, los cambios de temperatura se registraron después de una hora de haber realizado el cambio de concentración de  $\text{CH}_4$ , esto como resultado del incremento en la actividad de la biomasa al recibir mayor cantidad de sustrato. Se considera, con base en los resultados obtenidos y presentados a continuación, que el incremento de concentración al 4% no fue inhibitorio y que el ambiente dentro del biofiltro cumplía con los requerimientos, por ejemplo, de humedad, nutrientes y temperatura, necesarios para que los microorganismos pudieran llevar a cabo la oxidación biológica de  $\text{CH}_4$ . La eficiencia de remoción entre la etapa 2 y 3 pasó de 100% a 97%. Respecto a la temperatura, como se puede observar en la Figura 4.16, entre la etapa 2 y 3 hubo incrementos de más de  $15^\circ\text{C}$  en algunas zonas del biofiltro. Por ejemplo, el nivel 3 pasó de una temperatura en el centro de  $45^\circ\text{C}$  a una entre  $60^\circ\text{C}$  y  $65^\circ\text{C}$  para ambas etapas, desplazando al nivel 2 como el de mayor temperatura (etapa 2).

En el momento del aumento de la concentración de  $\text{CH}_4$ , es de destacar cómo la zona central del nivel 4 (Figura 4.16) cambia el patrón registrado en las etapas anteriores (patrón de ondulaciones), a tener un comportamiento lineal ascendente que se tiene hasta el día 29. Esta zona pasa de tener una temperatura máxima de  $33^\circ\text{C}$  bajo la concentración de 2% a registrar temperaturas de  $49^\circ\text{C}$  (Tabla 4.9) durante la etapa 3 (4%  $\text{CH}_4$ ). Respecto a la temperatura registrada en el nivel 4 durante la etapa 4, se observa un incremento de la temperatura de más de  $10^\circ\text{C}$ . En la etapa 4, la temperatura máxima en el centro del nivel 4 fue de  $61^\circ\text{C}$  (Tabla 4.10) y no se presentan ondulaciones a pesar de ser un nivel expuesto a los cambios de temperatura ambiental. El aumento de temperatura en el nivel 4 durante la última etapa se atribuye al flujo de calor incrementado significativamente por la mayor actividad metabólica y el calor generado en los niveles inferiores, al que se adiciona el mayor gradiente de temperatura entre el seno de la composta y su capa superior, favoreciendo el transporte por conducción.

Adicional, en la Figura 4.16, se puede observar que la temperatura del centro del nivel 3 entre las etapas 3 y 4 presenta mínimas variaciones. La temperatura en el nivel 2 registra una disminución entre  $9^\circ\text{C}$  y  $11^\circ\text{C}$  durante la etapa 4, situándose por debajo de los niveles 3 y 4. Esto se atribuye a que el calor no se acumuló en esta zona, siguiendo una tendencia contraria a la del nivel 4. Finalmente, el nivel 1 presenta una temperatura similar desde la etapa 2. Se considera que el nivel 1, al ser el sitio donde se encuentra la mayor concentración de  $\text{CH}_4$ , genera la mayor cantidad de calor. Este calor no se acumula en ese primer nivel debido al transporte por convección forzada que provee el flujo de gas.



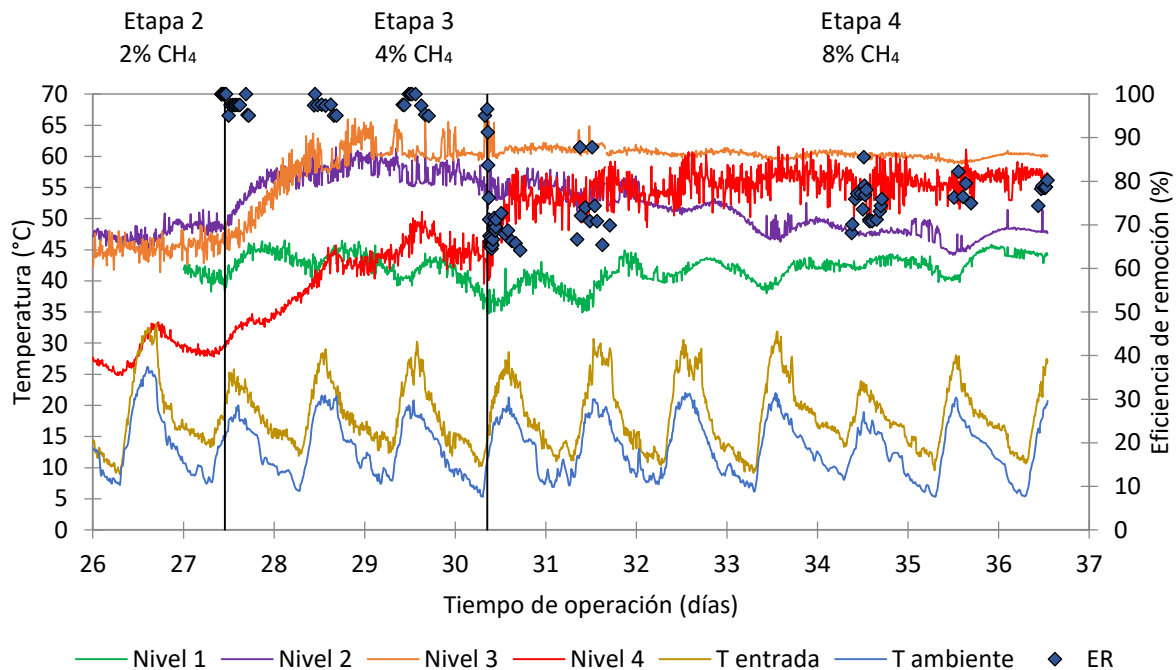


Figura 4.16 Temperatura registrada en el centro del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 3 y 4 (4% y 8%  $CH_4$ ).

En la Figura 4.17 se muestran los sensores correspondientes a la cara oriente, seleccionada como se indicó anteriormente por ser una de las dos zonas en que la radiación solar tiene menor incidencia. Al igual que en las etapas anteriores los perfiles de temperatura siguen patrones ondulatorios por estar cerca a la pared y afectarse con los cambios de la temperatura ambiente. Contrario a lo observado en los sensores del centro, en la pared oriente las mayores temperaturas siguieron asociadas al nivel 2 en ambas etapas. El nivel 4 pasó de tener la menor temperatura en la etapa 2 a igualarse con los niveles 1 y 3 en la etapa 3. En el nivel 4 se observa en los dos últimos días de la etapa 4 un descenso en su temperatura para igualarse a la del nivel 1.

La Tabla 4.9 presenta las temperaturas máximas alcanzadas en los diferentes niveles y caras del biofiltro para la etapa 3 ( $CH_4$  al 4%). La temperatura entre la etapa 2 y 3 aumentó de 6°C a 13°C para las distintas caras del biofiltro y en especial la zona correspondiente a la altura del nivel 3 (a 0.35 m de la entrada del gas). Bajo las condiciones de operación en esta etapa, el nivel 3 presentó los mayores valores de temperatura máxima, con excepción de la cara oriente, donde el nivel 2 la superó por 2°C (41 vs 43°C). Debido a que existe diferente temperatura alrededor del biofiltro porque la radiación solar lo impacta de manera distinta, los aumentos de temperatura registrados en las paredes serían mayores en el caso de las caras que reciben mayor radiación solar. Esto se debe a que la zona del biofiltro con mayor grado de sombra, genera un gradiente de temperatura mayor entre el biofiltro y el ambiente, al que puede generar una cara con mayor exposición solar.

La Tabla 4.10 muestra las temperaturas máximas en los diversos sitios del biofiltro, para la etapa 4. El cambio de condiciones de operación de las etapas 3 a 4 provocó aumentos de 7°C a 18°C. Por ejemplo, en el nivel 3, cara norte, la temperatura máxima de la etapa 3 fue 45°C y de la etapa 4 de 63°C, en el nivel 3 y cara sur la temperatura pasó de 48°C a 57°C. Bajo las condiciones de operación en esta etapa, nuevamente es el nivel 3 el que presentó los mayores valores de temperatura máxima, igualmente con excepción de la cara oriente, donde el nivel 2 la superó por 1°C (48 vs 49°C). En la etapa 4, un 85% del biofiltro registraba temperaturas mayores a 35°C, la cual corresponde al límite superior de la temperatura óptima para microorganismos mesófilos (Bian et al., 2021). Por otra parte, en la etapa 4 la ER de CH<sub>4</sub> fue de 73 ± 8.7%, la menor ER registrada durante toda la operación del biofiltro. Atribuir la disminución de la ER solo a las elevadas temperaturas registradas durante la etapa, omitiría otros aspectos como: limitación de O<sub>2</sub> (estar cercana a la máxima concentración de CH<sub>4</sub> a oxidar con solo O<sub>2</sub> disponible en el aire, Anexo A), de CH<sub>4</sub> en fase líquida considerando que la temperatura disminuye su solubilidad, así como de la compactación y secado del medio, entre otros.

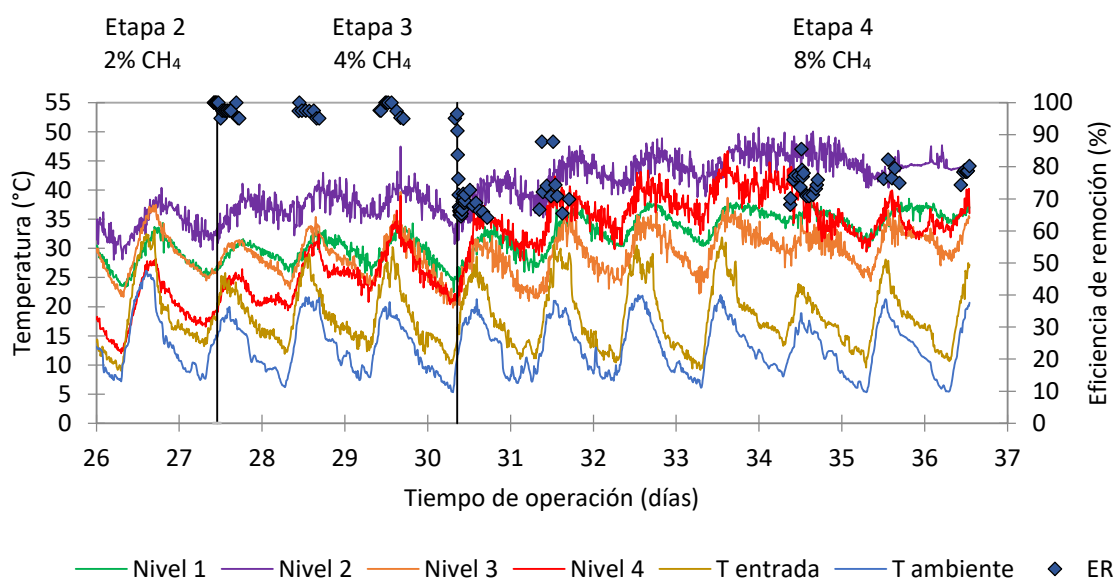


Figura 4.17 Temperatura registrada en el interior de la cara oriente del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) durante la etapa 3 y 4 (4% y 8% CH<sub>4</sub>).

Tabla 4.9 Temperatura máxima para diferentes ejes axiales y niveles de altura del biofiltro durante la etapa 3 (4% CH<sub>4</sub>)

| Temperatura al interior del biofiltro (°C) |       |        |     |         |           |
|--|-------|--------|-----|---------|-----------|
| Zona del biofiltro                         | Norte | Centro | Sur | Oriente | Occidente |
| Nivel 1                                    | 32    | 47     | 33  | 34      | 32        |
| Nivel 2                                    | 42    | 62     | 39  | 43      | 38        |
| Nivel 3                                    | 45    | 66     | 48  | 41      | 43        |
| Nivel 4                                    | 34    | 49     | 41  | 35      | 36        |

Tabla 4.10 Temperatura máxima para diferentes ejes axiales y niveles de altura del biofiltro durante la etapa 4 (8% CH<sub>4</sub>)

| Temperatura al interior del biofiltro (°C) |       |        |     |         |           |
|--|-------|--------|-----|---------|-----------|
| Zona del biofiltro                         | Norte | Centro | Sur | Oriente | Occidente |
| Nivel 1                                    | 35    | 45     | 33  | 37      | 31        |
| Nivel 2                                    | 46    | 58     | 38  | 49      | 44        |
| Nivel 3                                    | 63    | 67     | 57  | 48      | 52        |
| Nivel 4                                    | 45    | 61     | 51  | 46      | 47        |

Las etapas 3 y 4 permitieron registrar la temperatura alcanzada a tratar altas concentraciones de CH<sub>4</sub>, por encima del 3.7% y hasta el 8.4% con un TRLV de 23 min, condiciones que no son habituales en las investigaciones publicadas. La máxima temperatura registrada durante la operación del sistema fue de 67°C y se registró durante la etapa 4, la cual tuvo en promedio una ER de 73 ± 8.7%. En general después de la etapa 2, la temperatura del biofiltro registró en la zona central valores por encima de 45°C. La eficiencia de remoción alcanzada bajo estas condiciones permite suponer que en el sistema de biofiltración había presencia de microorganismos metanótrofos termófilos.

A diferencia de la etapa 2, en la que la zona central con mayor temperatura se registró en el nivel 2 (a 0.15 m), para la etapa 3 y 4, el nivel 3 centro (a 0.35 m) fue la zona en que hubo mayor acumulación de calor y por consecuencia temperaturas elevadas. Además, en estas dos últimas etapas se evidenció que el centro del nivel 4 del biofiltro, deja de verse afectado por las variaciones ambientales y mantiene casi constante su temperatura, lo cual se puede atribuir como el resultado de la cantidad de calor que se produce en el seno del biofiltro y que es liberado por convección forzada en esta zona de salida del dispositivo.

#### 4.4.4 Descripción de la etapa 5 – Enfriamiento del biofiltro

Después de finalizar la etapa 4 en la que el sistema recibió durante seis días una corriente de gas con concentraciones cercanas al 8% y se registraron temperaturas desde los 35°C y hasta los 67°C, se suspendió la alimentación de CH<sub>4</sub> y se introdujo una corriente de solo aire con el mismo flujo con el que se operaron las etapas anteriores, 0.78 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> y 23 min de TRLV. El objetivo de esta etapa final fue registrar el tiempo necesario para que la temperatura al interior del biofiltro alcanzara una temperatura cercana a la ambiental. Adicional se registró el tiempo requerido para que la concentración de CO<sub>2</sub> a la salida descendiera hasta una concentración cercana a la del aire (0.04%).

En la Figura 4.18 se presenta la temperatura registrada en el centro del biofiltro, la cual se seleccionó para hacer el seguimiento del enfriamiento, porque en las etapas anteriores fue la zona más caliente. El nivel 3 fue el nivel que mayor tiempo requirió para alcanzar la temperatura ambiental. En 46 horas la temperatura del nivel 3 descendió desde los 60°C hasta los 24°C. El enfriamiento de la zona comprendida en el nivel 3 presentó un patrón prácticamente lineal e independiente de las fluctuaciones de la temperatura ambiente.

A diferencia del nivel 3, la composta comprendida en los niveles 1 y 4 (a 0.05 m y 0.50 m respectivamente) presenta momentos en que aumenta la temperatura, los cuales coinciden con los incrementos de temperatura ambiente. Este efecto era de esperarse y se evidenció desde la etapa 1 (sección 4.4.1). En el caso del nivel 2, las variaciones ambientales no generan un aumento de temperatura, pero si un cambio de pendiente en la recta de enfriamiento.

El enfriamiento de la composta depende principalmente de la remoción de calor que provoca el flujo de aire (convección forzada). A ello, se adiciona el transporte por conducción, la cual depende de la conductividad térmica de la composta, del material del reactor (polietileno de baja densidad) y del gradiente de temperatura entre el interior y el exterior del biofiltro.



Figura 4.18 Temperatura registrada en el centro del biofiltro en los niveles de altura 1 (0.05m), 2 (0.15m), 3 (0.35 m) y 4 (0.50m) con y sin alimentación de CH<sub>4</sub> en la corriente de aire

Durante el enfriamiento del biofiltro se midió la concentración de gases a la salida. La concentración de CH<sub>4</sub> a la salida descendió rápidamente; en 25 min (1.08 TRLV) la concentración pasó de 1.6% a 0%. Por otra parte, la concentración de CO<sub>2</sub> a la salida tuvo una disminución más lenta. Se requirieron de 21 horas (54.7 TRLV) para que la concentración de CO<sub>2</sub> pasara de 6.5% a 0.4%.

Por medio de un balance de masa, tanto en la fase gaseosa como en la líquida-biopelícula, se puede explicar porque el CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub> tienen diferentes tiempos de respuesta al suspender la alimentación del primero, además de explicar porque la concentración de CO<sub>2</sub> no descendió hasta la concentración que hay en el aire (0.04%).

En la Figura 4.19 se presentan las fases y consideraciones asumidas para el balance. A modo de simplificación se considera que el biofiltro es un sistema completamente mezclado donde la concentración de gases al interior es igual a la concentración de gases de la salida. Esta consideración difiere de la realidad porque existe una heterogeneidad en la composta y en la manera en que el flujo atraviesa el sistema. Respecto a la fase líquida-biopelícula, ésta comprende el agua en fase líquida, la biopelícula y la composta.

En la Figura 4.19 se ilustra la dirección del gradiente de concentración del gas  $\text{CH}_4$  y del  $\text{CO}_2$ . La comparación de las concentraciones en la fase gaseosa y en la fase líquida al equilibrio consideran la constante de Henry adimensional, la cual corresponde a la relación de la concentración del gas en la fase acuosa ( $\text{g m}^{-3}$  líquido) sobre la concentración del gas en la fase gaseosa ( $\text{g m}^{-3}$  gas) (Sander, 2015).

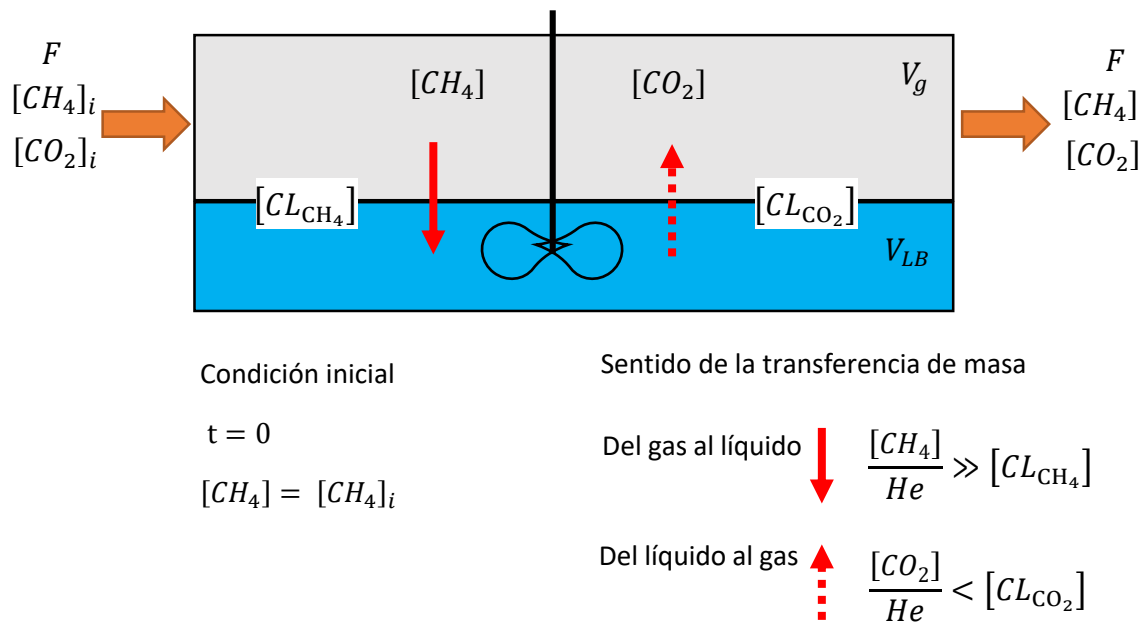


Figura 4.19 Diagrama balance de masa en un biofiltro idealizado

Cuando la corriente de gas contiene  $\text{CH}_4$ , la transferencia de masa se dará de la fase gaseosa hacia la fase líquida-biopelícula, en sentido de un gradiente de mayor a menor concentración. Para la situación de la etapa 5, en que la corriente de gas no tiene  $\text{CH}_4$ , esta situación no se presenta y por el contrario, podría ganar  $\text{CH}_4$  residual que esté disuelto en la fase líquida-biopelícula, hasta que la concentración entre ambas fases alcance el equilibrio ( $CL_{CH_4}$ ). Para este caso, el signo del balance presentado en la Ecuación 18, va a ser positivo para la tasa de transferencia, porque la fase gaseosa estaría ganando moles de  $\text{CH}_4$ . Sin embargo, simplificando el proceso, al considerar que no va a existir transferencia porque el gradiente de concentración es muy pequeño y que no habría  $\text{CH}_4$  residual, debido a que el  $\text{CH}_4$  presente en la fase líquida-biopelícula va a ser oxidado, este término se elimina del balance. Adicional, para la fase 5, el término de flujo de entrada tampoco se considera.

Como resultado se tiene que la tasa de acumulación de CH<sub>4</sub> en la fase gaseosa solo tiene relación con el flujo de salida (procesos convectivos) y es por esta razón que el tiempo requerido para que la concentración de CH<sub>4</sub> a la salida disminuya, es aproximadamente igual al tiempo de TRLV. Al solucionar matemáticamente la ecuación diferencial en la cual la concentración de CH<sub>4</sub> a la salida cambia con respecto al tiempo por el flujo de la corriente de gas de salida (Anexo C), se tiene que el Ln [CH<sub>4</sub>] es igual al Flujo sobre el volumen de gas por tiempo más una constante de integración. Esta expresión se usa para obtener la tasa de dilución y posteriormente la porosidad final del medio. Lo anterior será explicado a detalle más adelante.

|   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| <b>Tasa de acumulación de CH<sub>4</sub> en la fase gaseosa</b>   | <b>Flujo de CH<sub>4</sub> en la corriente de gas de entrada</b> | <b>Flujo de CH<sub>4</sub> en la corriente de gas de salida</b> | <b>Tasa de transferencia de CH<sub>4</sub> de la fase gaseosa a la líquida</b> |
| $\frac{d[CH_4]}{dt} = \frac{F \cdot [CH_4]_i}{V_g} - \frac{F \cdot [CH_4]}{V_g} - K_B a \cdot \left( \frac{[CH_4]}{He_{CH_4}} - [CL_{CH_4}] \right) \cdot \frac{V_{LB}}{V_g}$ |  |   |  |

*Ecuación 18*

En la Ecuación 19 se presenta el balance de CH<sub>4</sub> en la fase líquida-biopelícula. Para esta fase se considera una tasa de transferencia desde la fase gaseosa hacia la líquida, en concordancia con lo presentado en la Ecuación 18, adicional se considera que en la fase líquida-biopelícula se lleva a cabo la reacción de oxidación del CH<sub>4</sub>.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Tasa de acumulación de CH<sub>4</sub> en la fase líquida-biopelícula</b>                                   | <b>Tasa de transferencia de CH<sub>4</sub> de la fase gaseosa a la líquida-biopelícula</b> | <b>Tasa de consumo de CH<sub>4</sub> en la fase líquida-biopelícula</b> |
| $\frac{d[CL_{CH_4}]}{dt} = K_B a \cdot \left( \frac{[CH_4]}{He_{CH_4}} - [CL_{CH_4}] \right) - \gamma_{CH_4}$ |  |   |

*Ecuación 19*

Como se mencionó anteriormente, la concentración de CO<sub>2</sub> a la salida requirió de mayor tiempo para disminuir su concentración, comparado con el tiempo en que la concentración de CH<sub>4</sub> llegó a 0%. Esto se debe a que existen tres procesos que pueden producir CO<sub>2</sub>, los cuales son: respiración endógena, oxidación de metabolitos (i.e formaldehído) y oxidación

de CH<sub>4</sub> (para la etapa 5 se considera CH<sub>4</sub> residual). Estos procesos mantienen una concentración de CO<sub>2</sub> a la salida superior a la presente en el aire y a diferencia del balance realizado para el CH<sub>4</sub>, ninguno de los términos presentados en la Ecuación 20 y Ecuación 21 se elimina o se considera despreciable. Por lo tanto, la concentración de CO<sub>2</sub> a la salida no se reduce únicamente por el flujo de aire que ingresa al biofiltro, sino que tiene una tasa de acumulación que incluye procesos difusivos que se llevarán a cabo constantemente y hasta un tiempo superior al monitoreado durante esta investigación. De los procesos que pueden producir CO<sub>2</sub>, la respiración endógena se considera la principal causa para que la concentración de CO<sub>2</sub> no disminuya.

|   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| <b>Tasa de<br/>acumulación<br/>de CO<sub>2</sub> en la<br/>fase gaseosa</b> | <b>Flujo de CO<sub>2</sub> en la<br/>corriente de gas<br/>de entrada</b> | <b>Flujo de CO<sub>2</sub> en la<br/>corriente de gas<br/>de salida</b> | <b>Tasa de transferencia de CO<sub>2</sub> de la<br/>fase líquida a la gaseosa</b>             |
| $\frac{d[CO_2]}{dt}$  | $= \frac{F \cdot [CO_2]_i}{V_g}$   | $- \frac{F \cdot [CO_2]}{V_g}$  | $+ K_B a \cdot \left( \frac{[CO_2]}{He_{CO_2}} - [CL_{CO_2}] \right) \cdot \frac{V_{LB}}{V_g}$ |

*Ecuación 20*

|  |   |  |  |   |
|--|---|--|--|---|
| <b>Tasa de<br/>acumulación<br/>de CO<sub>2</sub> en la<br/>fase líquida-<br/>biopelícula</b> | <b>Tasa de transferencia de<br/>CH<sub>4</sub> de la fase líquida-<br/>biopelícula a la gaseosa</b> | <b>Tasa de<br/>producción<br/>de CO<sub>2</sub> por<br/>respiración<br/>endógena</b> | <b>Tasa de<br/>producción<br/>de CO<sub>2</sub> por<br/>oxidación de<br/>metabolitos</b> | <b>Tasa de<br/>producción<br/>de CO<sub>2</sub> por<br/>oxidación<br/>de CH<sub>4</sub></b> |
| $\frac{d[CO_2]}{dt}$   | $= K_B a \cdot \left( \frac{[CO_2]}{He_{CO_2}} - [CL_{CO_2}] \right)$                               | $+ \gamma_{endogena}$  | $+ \gamma_{metabolitos}$   | $+ \gamma_{CH_4 residual}$  |

*Ecuación 21*

Al solucionar la Ecuación 18, en la que el logaritmo natural de la concentración de CH<sub>4</sub> (Ln [CH<sub>4</sub>]) es igual al flujo de gas (F) sobre el volumen de gas (Vg), se pudo determinar la tasa de dilución y el tiempo de retención real que tuvo el sistema al finalizar la experimentación, usando las mediciones de concentración de CH<sub>4</sub> de la fase 5 (Figura 4.20). El tiempo de retención obtenido se utilizó para determinar el volumen de gas (Vg) y posteriormente la porosidad de la composta. La medición de la concentración de CH<sub>4</sub> a la salida se puede considerar como otra metodología para determinar la porosidad del lecho de soporte. Para determinar la porosidad al inicio de la operación de un biofiltro, se puede usar un gas trazador el cual no reaccione, como el butano (Morgan Sagastume et al., 2006), posteriormente se interrumpa su suministro y se proceda a suministrar una corriente de aire sin presencia del gas trazador.

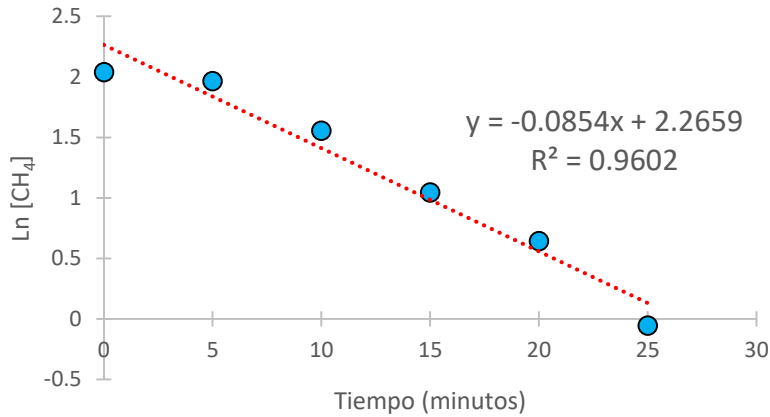


Figura 4.20 Cálculo de la tasa de dilución a partir de la integración analítica del balance de metano en la fase gaseosa (Ecuación 18)

$$\text{Tasa de dilución (TD)} = 0.085 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{TRG} = \frac{V_g}{F} = \frac{1}{TD} = \frac{1}{0.085 \text{ min}^{-1}} = 11.7 \text{ min}$$

Ecuación 22

Con el tiempo obtenido por medio de la tasa de dilución se puede determinar de manera indirecta la porosidad que tenía la composta al finalizar la operación del biofiltro. Se considera que el gas requirió en total 11.7 min atravesando el lecho de composta y la zona de espacio vacío en la parte superior del biofiltro (headspace) (Figura 3.5). El volumen de espacios vacíos dentro de la masa de composta y el volumen de headspace corresponden al volumen de gas ( $V_g$ ) del sistema de biofiltración. De acuerdo a la Ecuación 22 que define el tiempo de retención del gas en el biofiltro (TRG),  $V_g$  es igual a  $0.15 \text{ m}^3$ .

Para el sistema de biofiltración de esta investigación, el volumen de gas va a estar definido como el volumen de composta por la porosidad más el volumen de headspace (Ecuación 23).

De la Ecuación 23 se puede determinar la porosidad ( $\varepsilon$ ). Se debe considerar la reducción del volumen de composta ( $V$ ) porque después de 36.5 días, la altura del lecho pasó de 0.53 m a 0.50 m, lo que da un volumen final de  $0.28 \text{ m}^3$ . El volumen de headspace corresponde a  $0.10 \text{ m}^3$ .



$$V_g = (V \cdot \varepsilon) - V_{hs}$$

Ecuación 23

$$\varepsilon = \frac{V_g - V_{hs}}{V} = \frac{0.15 \text{ m}^3 - 0.10 \text{ m}^3}{0.28 \text{ m}^3} = 0.18$$

De esta forma se puede considerar que la porosidad de la composta pasó de 0.50 (sección 4.1.1) a 0.18 después de 36.5 días de operación del biofiltro. La reducción de la porosidad se puede relacionar con una compactación que a su vez implica una caída de presión en el sistema, la cual está en concordancia con lo presentado en la sección 4.2.1. Aunque la compactación de la composta, considerando la reducción de altura del lecho filtrante (altura inicial de la composta 0.53 m, altura final 0.50 m) fue limitada, se considera que, si representa un efecto significativo en la porosidad, razón por la cual, el retiro y la homogenización del medio filtrante debe ser considerado como una actividad operativa frecuente durante la operación de biofiltros.

Adicional a la compactación, una reducción de la porosidad se puede relacionar con el crecimiento de biomasa y la acumulación de SPE. Respecto a los SPE, aunque no se realizaron análisis para su determinación, se puede asociar a este fenómeno considerando que las bacterias metanotróficas son propensas a producir SPE como respuesta a condiciones de estrés como lo pueden ser: elevadas temperaturas, inanición y disponibilidad de oxígeno y agua (Mancebo y Hettiarachi, 2015). Sobre el crecimiento de la biomasa y su relación con la pérdida de porosidad, se requieren de ensayos específicos. Sin embargo, como se mencionó en la sección 4.2.3.1, durante la etapa 2 se estima que se dio un crecimiento de biomasa, que de acuerdo al carbono acumulado correspondería a 32 g<sub>sólidos totales</sub>. La humedad de una biopelícula se puede asumir en 85%, por lo tanto, los 32 g<sub>sólidos totales</sub> corresponden a 213 g<sub>biopelícula</sub>. La densidad de una biopelícula húmeda se ha reportado en 1.11 g<sub>biopelícula</sub> ml<sup>-1</sup> (Bonillas Blancas et al., 2015), lo que permitiría suponer que las células que se sintetizaron al inicio de la operación del biofiltro representan 192 ml, volumen que puede ocupar los poros de la composta. El crecimiento de biomasa no va a representar un decremento de la porosidad porque el volumen de biomasa que pudo desarrollarse es tres órdenes de magnitud menor comparado al volumen de espacios vacíos de la composta.

#### 4.4.5 Temperatura según la altura y el radio del biofiltro

Como se comentó en la sección 3.1.4 y Figura 3.7, se ubicaron sensores en cuatro niveles de altura y en siete puntos de cada uno de estos niveles (tres centrales y cuatro en las paredes). La distribución de estos sensores permitió registrar la temperatura al interior del biofiltro, la cual se puede interpretar como una representación de la distribución del calor al interior del sistema y su interacción con la temperatura ambiente.

En las Figuras 4.21 a 4.24 se presenta la temperatura registrada para días representativos de las etapas 1 a 4. Estas imágenes permiten ver la variación de la temperatura ambiental y del gas de entrada, así como la temperatura registrada al interior del biofiltro a nivel radial y axial. La temperatura radial corresponde a los cinco sensores ubicados en el eje norte a sur y la axial a los sensores ubicados en los cuatro niveles de altura. Se emplea una escala de colores que abarca desde el azul para las temperaturas más frías hasta el color rojo para las temperaturas elevadas. Los números de cada uno de los recuadros de color corresponden a los °C registrados durante cada hora. No se muestra un promedio de la temperatura, sino la temperatura registrada a la hora exacta.

La Figura 4.21 muestra el día representativo de la etapa 1. Para este momento el biofiltro solo recibe el efecto de la radiación solar, pues no se alimenta metano. Se puede observar cómo el biofiltro tiene aproximadamente una temperatura homogénea a nivel radial y axial, a excepción del eje sur, más expuesto a la radiación solar, que para las horas de la tarde registra mayor temperatura a pesar de tener una malla sombra para impedir el paso directo de los rayos sol. El nivel 4 es el que presenta un mayor diferencial entre la madrugada e inicios de la tarde, como ya fue discutido.

Para el caso de la etapa 2 (Figura 4.22), una vez que el biofiltro ha iniciado su actividad biológica y se tiene un estado estacionario (ER del 100%), se evidencia la asimetría axial. Así como se comentó en la sección 4.4.2, para esta etapa se identifica plenamente que el nivel 2 registra la mayor temperatura. Una asimetría radial se presenta entre las dos caras del biofiltro, particularmente durante la tarde, con una mayor temperatura en el lado sur.

| Hora  | Ta | Te | Nivel 1 |    |    |    |    | Nivel 2 |    |    |    |    | Nivel 3 |    |    |    |    | Nivel 4 |    |    |    |    |
|-------|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|
| 00:00 | 8  | 12 | 15      | 16 | 17 | 18 | 18 | 15      | 16 | 17 | 18 | 17 | 15      | 15 | 16 | 17 | 15 | 11      | 16 | 15 | 17 | 15 |
| 01:00 | 8  | 10 | 14      | 16 | 17 | 18 | 16 | 14      | 16 | 17 | 17 | 16 | 14      | 16 | 16 | 17 | 14 | 9       | 15 | 15 | 17 | 14 |
| 02:00 | 7  | 10 | 13      | 15 | 16 | 17 | 16 | 13      | 16 | 17 | 18 | 15 | 13      | 16 | 16 | 17 | 13 | 8       | 15 | 14 | 16 | 13 |
| 03:00 | 6  | 9  | 12      | 15 | 16 | 17 | 15 | 12      | 16 | 17 | 17 | 14 | 13      | 16 | 16 | 17 | 12 | 7       | 14 | 14 | 16 | 13 |
| 04:00 | 6  | 9  | 11      | 14 | 15 | 16 | 14 | 11      | 16 | 16 | 17 | 13 | 12      | 16 | 16 | 17 | 11 | 7       | 14 | 14 | 16 | 12 |
| 05:00 | 6  | 9  | 11      | 14 | 15 | 16 | 13 | 11      | 16 | 17 | 17 | 13 | 12      | 16 | 16 | 17 | 10 | 6       | 14 | 14 | 15 | 11 |
| 06:00 | 5  | 8  | 10      | 14 | 15 | 16 | 13 | 10      | 16 | 17 | 16 | 12 | 11      | 17 | 16 | 17 | 10 | 5       | 13 | 13 | 15 | 11 |
| 07:00 | 5  | 8  | 10      | 13 | 14 | 15 | 13 | 9       | 15 | 16 | 17 | 12 | 11      | 17 | 16 | 16 | 10 | 5       | 13 | 13 | 15 | 10 |
| 08:00 | 9  | 10 | 9       | 12 | 14 | 14 | 12 | 9       | 15 | 17 | 17 | 11 | 11      | 16 | 15 | 17 | 9  | 6       | 13 | 12 | 14 | 11 |
| 09:00 | 11 | 15 | 10      | 13 | 14 | 15 | 13 | 9       | 15 | 17 | 16 | 13 | 11      | 16 | 16 | 17 | 12 | 8       | 13 | 12 | 14 | 12 |
| 10:00 | 16 | 20 | 11      | 13 | 14 | 15 | 15 | 10      | 15 | 16 | 16 | 15 | 12      | 16 | 16 | 17 | 15 | 12      | 14 | 13 | 15 | 17 |
| 11:00 | 19 | 25 | 11      | 13 | 13 | 14 | 17 | 10      | 14 | 15 | 15 | 18 | 13      | 15 | 16 | 16 | 18 | 14      | 15 | 13 | 15 | 19 |
| 12:00 | 20 | 29 | 13      | 14 | 14 | 14 | 18 | 11      | 14 | 16 | 15 | 21 | 15      | 15 | 16 | 16 | 23 | 18      | 16 | 15 | 16 | 23 |
| 13:00 | 22 | 32 | 14      | 16 | 16 | 14 | 24 | 14      | 15 | 17 | 15 | 25 | 17      | 18 | 17 | 17 | 25 | 21      | 18 | 17 | 18 | 27 |
| 14:00 | 23 | 32 | 16      | 16 | 16 | 16 | 24 | 14      | 14 | 16 | 15 | 25 | 18      | 17 | 16 | 16 | 26 | 22      | 18 | 17 | 18 | 27 |
| 15:00 | 22 | 29 | 17      | 16 | 17 | 15 | 25 | 16      | 14 | 17 | 14 | 25 | 19      | 17 | 16 | 16 | 25 | 23      | 19 | 18 | 19 | 27 |
| 16:00 | 23 | 28 | 18      | 17 | 18 | 16 | 25 | 17      | 14 | 17 | 15 | 25 | 20      | 17 | 16 | 17 | 24 | 24      | 20 | 19 | 19 | 27 |
| 17:00 | 20 | 24 | 19      | 17 | 18 | 17 | 25 | 17      | 14 | 17 | 16 | 24 | 20      | 17 | 17 | 16 | 24 | 22      | 20 | 18 | 19 | 25 |
| 18:00 | 16 | 19 | 19      | 18 | 18 | 18 | 23 | 17      | 14 | 16 | 15 | 23 | 19      | 16 | 15 | 16 | 22 | 19      | 19 | 18 | 19 | 22 |
| 19:00 | 16 | 19 | 18      | 18 | 18 | 18 | 22 | 17      | 15 | 16 | 16 | 21 | 18      | 16 | 15 | 16 | 20 | 17      | 18 | 17 | 18 | 20 |
| 20:00 | 13 | 17 | 18      | 18 | 18 | 19 | 21 | 17      | 15 | 16 | 17 | 21 | 17      | 16 | 15 | 16 | 19 | 16      | 17 | 17 | 18 | 20 |
| 21:00 | 13 | 16 | 17      | 18 | 17 | 19 | 20 | 16      | 15 | 17 | 17 | 19 | 16      | 16 | 15 | 16 | 18 | 14      | 17 | 16 | 18 | 18 |
| 22:00 | 11 | 14 | 16      | 17 | 17 | 19 | 19 | 15      | 16 | 16 | 17 | 18 | 16      | 16 | 15 | 16 | 17 | 12      | 16 | 16 | 17 | 17 |
| 23:00 | 12 | 13 | 15      | 17 | 17 | 19 | 18 | 15      | 16 | 17 | 18 | 18 | 15      | 15 | 16 | 17 | 16 | 12      | 16 | 16 | 17 | 16 |
|       |    |    | N       | C  | S  | N  | C  | S       | N  | C  | S  | N  | C       | S  | N  | C  | S  |         |    |    |    |    |

Figura 4.21 Mapa de temperatura para el día 2 de la etapa 1 (0% CH<sub>4</sub>). Los valores numéricos tienen unidad de °C. Ta: temperatura ambiente; Te: temperatura entrada; N: norte; C: centro; S: sur.

| Hora  | Ta | Te | Nivel 1 |    |    |    |    | Nivel 2 |    |    |    |    | Nivel 3 |    |    |    |    | Nivel 4 |    |    |    |    |
|-------|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|
| 00:00 | 14 | 15 | 27      | 39 | 43 | 45 | 32 | 33      | 45 | 46 | 49 | 32 | 23      | 36 | 43 | 42 | 25 | 14      | 24 | 27 | 30 | 21 |
| 01:00 | 10 | 14 | 29      | 42 | 42 | 45 | 32 | 33      | 42 | 48 | 50 | 32 | 22      | 37 | 41 | 44 | 24 | 15      | 23 | 26 | 30 | 21 |
| 02:00 | 9  | 13 | 29      | 39 | 42 | 43 | 30 | 36      | 44 | 47 | 47 | 31 | 22      | 37 | 42 | 43 | 23 | 13      | 23 | 26 | 29 | 20 |
| 03:00 | 9  | 12 | 28      | 40 | 40 | 40 | 29 | 32      | 44 | 47 | 48 | 30 | 21      | 37 | 43 | 43 | 22 | 12      | 21 | 25 | 30 | 19 |
| 04:00 | 8  | 11 | 28      | 38 | 40 | 43 | 28 | 33      | 43 | 46 | 49 | 29 | 20      | 38 | 41 | 44 | 20 | 11      | 21 | 24 | 28 | 18 |
| 05:00 | 7  | 10 | 27      | 38 | 41 | 42 | 27 | 30      | 44 | 45 | 47 | 28 | 19      | 38 | 43 | 46 | 20 | 9       | 21 | 24 | 29 | 17 |
| 06:00 | 7  | 10 | 27      | 38 | 40 | 41 | 26 | 28      | 43 | 46 | 45 | 27 | 18      | 38 | 44 | 43 | 20 | 9       | 20 | 24 | 28 | 16 |
| 07:00 | 7  | 8  | 26      | 40 | 39 | 43 | 25 | 30      | 46 | 48 | 50 | 25 | 18      | 38 | 43 | 43 | 18 | 9       | 19 | 23 | 28 | 16 |
| 08:00 | 10 | 11 | 26      | 38 | 40 | 42 | 25 | 30      | 43 | 46 | 48 | 25 | 18      | 38 | 44 | 43 | 19 | 9       | 19 | 24 | 27 | 17 |
| 09:00 | 15 | 18 | 26      | 39 | 39 | 42 | 26 | 31      | 44 | 43 | 46 | 27 | 19      | 38 | 43 | 43 | 22 | 11      | 21 | 25 | 28 | 19 |
| 10:00 | 20 | 23 | 28      | 38 | 40 | 41 | 27 | 33      | 44 | 46 | 47 | 30 | 20      | 37 | 40 | 44 | 24 | 14      | 21 | 25 | 28 | 22 |
| 11:00 | 22 | 26 | 30      | 39 | 40 | 41 | 30 | 31      | 42 | 45 | 46 | 32 | 20      | 36 | 43 | 43 | 28 | 17      | 22 | 25 | 28 | 24 |
| 12:00 | 24 | 29 | 30      | 37 | 41 | 43 | 31 | 34      | 46 | 44 | 45 | 34 | 22      | 37 | 41 | 40 | 29 | 20      | 24 | 27 | 28 | 28 |
| 13:00 | 25 | 34 | 33      | 44 | 44 | 46 | 38 | 36      | 47 | 49 | 49 | 37 | 23      | 36 | 44 | 43 | 34 | 26      | 27 | 29 | 29 | 30 |
| 14:00 | 26 | 34 | 34      | 41 | 42 | 42 | 35 | 39      | 46 | 45 | 47 | 39 | 26      | 37 | 45 | 41 | 36 | 25      | 29 | 31 | 31 | 32 |
| 15:00 | 27 | 30 | 35      | 40 | 46 | 41 | 35 | 36      | 45 | 45 | 44 | 39 | 27      | 36 | 43 | 42 | 34 | 26      | 27 | 31 | 32 | 32 |
| 16:00 | 25 | 31 | 36      | 43 | 42 | 45 | 37 | 37      | 43 | 45 | 46 | 40 | 26      | 36 | 43 | 42 | 34 | 25      | 27 | 32 | 33 | 32 |
| 17:00 | 24 | 30 | 36      | 44 | 42 | 46 | 36 | 37      | 44 | 45 | 50 | 40 | 27      | 37 | 42 | 43 | 34 | 26      | 28 | 31 | 33 | 32 |
| 18:00 | 17 | 22 | 35      | 44 | 40 | 46 | 36 | 39      | 41 | 45 | 49 | 37 | 25      | 36 | 42 | 42 | 33 | 22      | 27 | 30 | 33 | 29 |
| 19:00 | 16 | 20 | 35      | 40 | 42 | 49 | 33 | 38      | 44 | 46 | 49 | 36 | 25      | 37 | 42 | 42 | 30 | 20      | 26 | 30 | 32 | 27 |
| 20:00 | 16 | 17 | 35      | 42 | 42 | 44 | 34 | 37      | 41 | 46 | 48 | 34 | 24      | 37 | 45 | 43 | 28 | 18      | 25 | 29 | 32 | 25 |
| 21:00 | 12 | 15 | 32      | 40 | 42 | 46 | 32 | 37      | 46 | 47 | 50 | 33 | 23      | 36 | 44 | 44 | 27 | 17      | 25 | 28 | 31 | 24 |
| 22:00 | 13 | 17 | 32      | 42 | 41 | 45 | 30 | 39      | 45 | 46 | 48 | 32 | 22      | 37 | 44 | 42 | 26 | 15      | 24 | 29 | 31 | 23 |
| 23:00 | 13 | 16 | 31      | 38 | 41 | 45 | 29 | 32      | 45 | 47 | 49 | 31 | 22      | 37 | 43 | 41 | 26 | 15      | 24 | 28 | 31 | 23 |
|       |    |    | N       | C  | S  | N  | C  | S       | N  | C  | S  | N  | C       | S  | N  | C  | S  |         |    |    |    |    |

Figura 4.22 Mapa de temperatura para el día 25 de la etapa 2 (2% CH<sub>4</sub>). Los valores numéricos tienen unidad de °C. Ta: temperatura ambiente; Te: temperatura entrada; N: norte; C: centro; S: sur.

A medida que se incrementa la concentración de CH<sub>4</sub> en el gas de entrada, la generación de calor aumenta y la asimetría axial ya no es tan clara, ni tampoco la radial. Para la etapa 3 (4% CH<sub>4</sub>), se observa en la Figura 4.23 que a nivel axial hay dos niveles que registran temperaturas similares y mayores (nivel 2 y 3) y a nivel radial al hacer un corte en el centro se presentan temperaturas casi espejo en el nivel 1 durante las 24 horas y en el nivel 3 en la madrugada (Figura 4.23). El nivel 2 presenta asimetría radial contraria a la esperada, pues el lado norte alcanza mayores temperaturas que el sur. El nivel 4 si presenta un patrón con la influencia de la radiación solar en el lado sur.

| Hora  | Ta | Te | Nivel 1 |    |    | Nivel 2 |    |    | Nivel 3 |    |    | Nivel 4 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|       |    |    | N       | C  | S  | N       | C  | S  | N       | C  | S  | N       | C  | S  |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 00:00 | 10 | 16 | 29      | 41 | 45 | 47      | 27 | 34 | 58      | 56 | 58 | 28      | 32 | 52 | 55 | 57 | 31 | 18 | 30 | 34 | 41 | 25 |
| 01:00 | 9  | 15 | 27      | 42 | 48 | 45      | 27 | 38 | 56      | 56 | 55 | 27      | 33 | 50 | 58 | 56 | 32 | 17 | 31 | 35 | 42 | 25 |
| 02:00 | 9  | 16 | 28      | 40 | 45 | 47      | 28 | 37 | 53      | 57 | 54 | 27      | 34 | 53 | 59 | 55 | 31 | 19 | 32 | 36 | 43 | 26 |
| 03:00 | 9  | 16 | 26      | 39 | 50 | 47      | 26 | 33 | 53      | 58 | 58 | 27      | 33 | 53 | 58 | 60 | 35 | 19 | 31 | 35 | 44 | 27 |
| 04:00 | 9  | 15 | 27      | 42 | 47 | 50      | 25 | 36 | 56      | 57 | 58 | 26      | 34 | 55 | 60 | 54 | 34 | 18 | 31 | 36 | 43 | 25 |
| 05:00 | 8  | 14 | 25      | 41 | 42 | 44      | 25 | 35 | 55      | 58 | 54 | 26      | 34 | 55 | 58 | 59 | 33 | 18 | 32 | 37 | 45 | 26 |
| 06:00 | 7  | 13 | 27      | 41 | 46 | 46      | 25 | 37 | 60      | 57 | 55 | 25      | 34 | 55 | 57 | 58 | 34 | 17 | 33 | 37 | 46 | 26 |
| 07:00 | 7  | 13 | 24      | 40 | 43 | 46      | 25 | 34 | 56      | 57 | 57 | 24      | 33 | 56 | 59 | 58 | 35 | 17 | 32 | 38 | 44 | 26 |
| 08:00 | 9  | 14 | 25      | 42 | 47 | 45      | 23 | 33 | 58      | 59 | 54 | 23      | 33 | 56 | 60 | 58 | 33 | 17 | 32 | 38 | 46 | 25 |
| 09:00 | 12 | 17 | 26      | 38 | 43 | 46      | 25 | 34 | 57      | 57 | 57 | 26      | 33 | 57 | 58 | 62 | 38 | 18 | 34 | 38 | 46 | 27 |
| 10:00 | 17 | 23 | 26      | 37 | 43 | 43      | 28 | 38 | 60      | 57 | 57 | 26      | 34 | 58 | 60 | 59 | 39 | 21 | 34 | 39 | 46 | 31 |
| 11:00 | 20 | 24 | 28      | 43 | 48 | 44      | 28 | 34 | 59      | 57 | 52 | 28      | 36 | 57 | 60 | 59 | 39 | 23 | 36 | 40 | 48 | 33 |
| 12:00 | 21 | 26 | 28      | 41 | 47 | 45      | 29 | 37 | 55      | 59 | 51 | 30      | 37 | 54 | 60 | 61 | 41 | 26 | 35 | 40 | 46 | 34 |
| 13:00 | 21 | 28 | 28      | 41 | 48 | 45      | 31 | 36 | 56      | 58 | 52 | 33      | 38 | 57 | 58 | 57 | 45 | 29 | 38 | 42 | 47 | 36 |
| 14:00 | 21 | 26 | 29      | 42 | 49 | 46      | 33 | 37 | 56      | 57 | 52 | 33      | 40 | 57 | 58 | 57 | 46 | 31 | 39 | 43 | 49 | 37 |
| 15:00 | 19 | 24 | 31      | 43 | 49 | 46      | 32 | 38 | 56      | 56 | 53 | 33      | 41 | 57 | 58 | 57 | 44 | 31 | 39 | 44 | 50 | 36 |
| 16:00 | 21 | 23 | 31      | 44 | 49 | 47      | 29 | 39 | 60      | 57 | 53 | 34      | 41 | 57 | 59 | 58 | 45 | 31 | 41 | 44 | 50 | 37 |
| 17:00 | 18 | 23 | 32      | 43 | 49 | 47      | 32 | 39 | 55      | 59 | 53 | 32      | 40 | 57 | 58 | 58 | 43 | 28 | 40 | 44 | 49 | 34 |
| 18:00 | 16 | 20 | 30      | 42 | 49 | 51      | 32 | 37 | 56      | 58 | 52 | 30      | 37 | 58 | 61 | 59 | 42 | 26 | 39 | 43 | 48 | 32 |
| 19:00 | 14 | 18 | 29      | 40 | 50 | 50      | 31 | 38 | 60      | 58 | 55 | 30      | 38 | 59 | 64 | 60 | 40 | 24 | 37 | 43 | 50 | 32 |
| 20:00 | 14 | 17 | 28      | 43 | 50 | 47      | 31 | 35 | 56      | 58 | 56 | 29      | 38 | 59 | 61 | 58 | 40 | 24 | 38 | 43 | 48 | 31 |
| 21:00 | 14 | 19 | 31      | 42 | 48 | 47      | 29 | 37 | 56      | 59 | 56 | 29      | 37 | 59 | 62 | 66 | 41 | 23 | 38 | 42 | 50 | 32 |
| 22:00 | 11 | 17 | 30      | 45 | 46 | 44      | 29 | 37 | 57      | 60 | 50 | 29      | 38 | 60 | 63 | 63 | 40 | 23 | 38 | 41 | 50 | 31 |
| 23:00 | 10 | 17 | 28      | 41 | 49 | 47      | 30 | 35 | 55      | 61 | 53 | 28      | 39 | 59 | 63 | 61 | 36 | 22 | 37 | 41 | 50 | 31 |

Figura 4.23 Mapa de temperatura para el día 28 de la etapa 3 (4% CH<sub>4</sub>). Los valores numéricos tienen unidad de °C. Ta: temperatura ambiente; Te: temperatura entrada; N: norte; C: centro; S: sur.

La Figura 4.24 muestra los perfiles de temperatura para la etapa 4 (8% CH<sub>4</sub>). En esta condición, el nivel 3 es donde se presentan las mayores temperaturas en su centro, con excepción de un solo punto a las 23:00 en el sensor intermedio hacia el norte (67°C). Otro cambio es que el nivel 4 presenta durante el mediodía y la tarde, temperaturas similares a las del nivel 2. El patrón espejo radial se presenta de nuevo en el nivel 1 y en buena medida en el nivel 3. Al igual que en la etapa 3, el nivel 2 presenta mayores temperaturas en la cara norte en comparación con la sur, y lo inverso para el nivel 4.

| Hora  | Ta | Te | Nivel 1 |    |    |    |    | Nivel 2 |    |    |    |    | Nivel 3 |    |    |    |    | Nivel 4 |    |    |    |    |   |   |
|-------|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|---|---|
| 00:00 | 10 | 13 | 28      | 42 | 46 | 44 | 26 | 33      | 54 | 55 | 50 | 27 | 41      | 61 | 65 | 63 | 38 | 23      | 38 | 44 | 53 | 31 |   |   |
| 01:00 | 9  | 15 | 26      | 37 | 45 | 43 | 26 | 34      | 54 | 59 | 48 | 26 | 41      | 57 | 61 | 60 | 39 | 22      | 39 | 45 | 51 | 30 |   |   |
| 02:00 | 8  | 15 | 27      | 39 | 48 | 43 | 25 | 33      | 55 | 57 | 50 | 25 | 38      | 60 | 60 | 59 | 38 | 22      | 39 | 44 | 52 | 31 |   |   |
| 03:00 | 9  | 14 | 22      | 34 | 44 | 42 | 24 | 33      | 53 | 56 | 50 | 24 | 37      | 59 | 60 | 59 | 38 | 21      | 38 | 45 | 51 | 28 |   |   |
| 04:00 | 7  | 14 | 25      | 40 | 45 | 41 | 24 | 32      | 51 | 56 | 47 | 26 | 37      | 58 | 60 | 59 | 39 | 21      | 38 | 42 | 51 | 29 |   |   |
| 05:00 | 7  | 12 | 23      | 36 | 42 | 42 | 23 | 35      | 53 | 56 | 48 | 23 | 38      | 61 | 60 | 58 | 36 | 21      | 38 | 45 | 51 | 30 |   |   |
| 06:00 | 6  | 11 | 23      | 39 | 43 | 40 | 23 | 31      | 51 | 55 | 47 | 23 | 38      | 58 | 60 | 58 | 35 | 19      | 38 | 45 | 52 | 28 |   |   |
| 07:00 | 5  | 10 | 21      | 36 | 43 | 39 | 21 | 33      | 53 | 56 | 47 | 21 | 36      | 61 | 61 | 59 | 35 | 17      | 38 | 44 | 52 | 29 |   |   |
| 08:00 | 9  | 13 | 22      | 35 | 42 | 39 | 21 | 32      | 50 | 55 | 47 | 21 | 36      | 58 | 65 | 60 | 33 | 19      | 37 | 44 | 50 | 28 |   |   |
| 09:00 | 13 | 17 | 22      | 35 | 38 | 39 | 20 | 31      | 50 | 53 | 51 | 23 | 38      | 60 | 65 | 65 | 38 | 21      | 36 | 46 | 52 | 31 |   |   |
| 10:00 | 17 | 20 | 23      | 34 | 38 | 40 | 24 | 26      | 50 | 55 | 42 | 24 | 38      | 58 | 60 | 59 | 41 | 24      | 39 | 47 | 52 | 35 |   |   |
| 11:00 | 18 | 23 | 24      | 35 | 41 | 38 | 25 | 32      | 49 | 53 | 45 | 27 | 41      | 62 | 60 | 59 | 40 | 27      | 41 | 51 | 50 | 37 |   |   |
| 12:00 | 18 | 24 | 25      | 35 | 42 | 38 | 28 | 31      | 49 | 53 | 47 | 27 | 46      | 62 | 61 | 60 | 48 | 29      | 44 | 50 | 57 | 38 |   |   |
| 13:00 | 19 | 25 | 27      | 35 | 40 | 37 | 26 | 31      | 51 | 54 | 46 | 32 | 46      | 63 | 61 | 59 | 46 | 32      | 44 | 53 | 57 | 42 |   |   |
| 14:00 | 20 | 27 | 28      | 35 | 40 | 39 | 28 | 34      | 50 | 56 | 45 | 30 | 48      | 63 | 61 | 60 | 50 | 34      | 47 | 52 | 57 | 44 |   |   |
| 15:00 | 18 | 26 | 28      | 38 | 41 | 40 | 28 | 36      | 48 | 54 | 45 | 31 | 48      | 63 | 61 | 60 | 47 | 36      | 48 | 52 | 56 | 45 |   |   |
| 16:00 | 18 | 25 | 30      | 37 | 41 | 41 | 31 | 37      | 49 | 54 | 46 | 30 | 47      | 62 | 61 | 60 | 49 | 37      | 47 | 49 | 56 | 40 |   |   |
| 17:00 | 16 | 24 | 31      | 37 | 42 | 39 | 30 | 37      | 47 | 53 | 44 | 30 | 46      | 60 | 61 | 60 | 46 | 35      | 49 | 50 | 53 | 43 |   |   |
| 18:00 | 15 | 20 | 30      | 39 | 42 | 42 | 30 | 36      | 50 | 56 | 47 | 30 | 50      | 65 | 61 | 60 | 48 | 34      | 47 | 53 | 54 | 41 |   |   |
| 19:00 | 14 | 19 | 29      | 41 | 42 | 42 | 31 | 37      | 51 | 57 | 47 | 30 | 52      | 63 | 61 | 59 | 47 | 33      | 52 | 51 | 55 | 43 |   |   |
| 20:00 | 15 | 16 | 28      | 39 | 42 | 42 | 28 | 34      | 50 | 56 | 48 | 29 | 49      | 65 | 60 | 60 | 49 | 32      | 49 | 55 | 56 | 40 |   |   |
| 21:00 | 14 | 18 | 29      | 39 | 42 | 45 | 30 | 38      | 53 | 55 | 49 | 30 | 45      | 64 | 61 | 60 | 45 | 31      | 47 | 52 | 56 | 37 |   |   |
| 22:00 | 9  | 16 | 29      | 41 | 42 | 43 | 26 | 38      | 49 | 58 | 49 | 27 | 48      | 64 | 61 | 60 | 46 | 32      | 48 | 54 | 54 | 38 |   |   |
| 23:00 | 8  | 13 | 28      | 39 | 41 | 43 | 27 | 33      | 50 | 57 | 48 | 27 | 47      | 67 | 62 | 59 | 48 | 29      | 49 | 53 | 57 | 37 |   |   |
|       |    |    | N       | C  | S  |    | N  | C       | S  |    | N  | C  | S       |    | N  | C  | S  | N       | C  | S  |    | N  | C | S |

Figura 4.24 Mapa de temperatura para el día 30 de la etapa 4 (8% CH<sub>4</sub>). Los valores numéricos tienen unidad de °C. Ta: temperatura ambiente; Te: temperatura entrada; N: norte; C: centro; S: sur.

Para hacer un análisis más detallado de la variación de la temperatura respecto a la altura y el radio se presenta la Figura 4.25. Se tomaron como referencia los días 24, 28 y 35, fechas en que el biofiltro recibió concentraciones de CH<sub>4</sub> a la entrada de 2%, 4% y 8% respectivamente. Para cada día se muestra la temperatura promedio de las 6:00 am, 2:00 pm y 10:00 pm, horas seleccionadas para observar cómo era la temperatura al interior del biofiltro durante una hora fría, la hora de mayor temperatura ambiente y en la noche, ya sin la presencia de la radiación solar.

La Figura 4.25 muestra la temperatura registrada por los sensores ubicados en el centro y en el punto cercano a la pared del biofiltro para las caras norte, sur, oriente y occidente, y para cada uno de los cuatro niveles monitoreados. Así mismo, se presenta la temperatura promedio ambiental (T ambiente) y temperatura promedio de la corriente del gas de entrada (T entrada), condiciones externas bajo las cuales se encontraba operando el biofiltro.

La temperatura ambiental, si bien puede incidir en la temperatura interna del biofiltro, ya sea porque permite el enfriamiento (T ambiente < T biofiltro en la noche y madrugada) o genera un calentamiento (T ambiente > T biofiltro al mediodía y tarde), está lejos de ser representativa de la temperatura interna del biofiltro. Como se puede observar en la Figura 4.25, la temperatura ambiental es en todos los casos menor a la registrada por los sensores

ubicados dentro de la composta, salvo para el día 24 a las 2:00 pm (2% de CH<sub>4</sub>), donde se presentan temperaturas semejantes (26 a 27°C) en la parte alta del biofiltro para las caras norte, oriente y occidente. La cara sur, expuesta a la radiación solar, si registra una temperatura superior. A las 6 am y 10 pm es notoria la diferencia entre la temperatura ambiente (o incluso del gas de entrada) y la temperatura registrada en las paredes, pero, sobre todo, la diferencia es clara en los tres tiempos del día mostrados con respecto a la temperatura registrada en el centro. La diferencia se hace mayor conforme se incrementa la concentración de CH<sub>4</sub> alimentado.

Se ha reportado como temperatura óptima para los microorganismos metanótrofos el intervalo de los 20°C a 35°C (Bian et al., 2021; Gómez-Borraz et al., 2017; Hettiarachchi et al., 2011). Sin embargo, Gómez-Borraz (2017) y Spokas y Bogner (2011) reportan que las mayores tasas de oxidación de CH<sub>4</sub> se obtienen en temperaturas comprendidas entre los 25°C a 35°C. Al tomar como referencia el intervalo de temperatura óptima para la oxidación de CH<sub>4</sub> de 25°C a 35°C (Gómez Borraz, 2017), en los perfiles de la Figura 4.25 se indica la zona que presentaría mayor actividad por temperatura. Fuera de ella, existen condiciones para que los microorganismos oxiden el metano, pero con cierto grado de inhibición, que aumentará conforme el interior del biofiltro se aleje de ese intervalo. Se considera, por lo tanto, que, durante las horas de referencia, los puntos con temperaturas dentro del intervalo activo indican las zonas del biofiltro donde se estaba llevando a cabo mayormente la oxidación del CH<sub>4</sub>. Por otra parte, los puntos con temperaturas fuera del intervalo, indican las zonas del biofiltro que se encontraban con una baja actividad, y por consecuencia su aporte a la CE del biofiltro era limitado.

Para las tres concentraciones de CH<sub>4</sub> evaluadas, se identifica que la temperatura en el centro del biofiltro es claramente superior a las del perímetro, como se ha expuesto anteriormente (Sección 4.4.1 a 4.4.3). La zona central se supondría que no aporta a la CE del sistema al observar las temperaturas registradas en ella, las cuales son superiores a las de la zona más activa (25°C a 35°C) durante el transcurso del día y en toda la altura del biofiltro, con excepción del nivel 4 de la etapa 2. Es también en la zona central donde se alcanzan las mayores temperaturas, las cuales se incrementan conforme lo hace la concentración de metano alimentado, sobrepasando los 60°C en las etapas 3 y 4. En éstas, en todo momento la temperatura del centro fue superior a la del intervalo óptimo.

Se puede interpretar que durante la alimentación con CH<sub>4</sub> al 2%, el calor generado durante el día y la noche, se disipa durante la noche a madrugada, debido al gradiente entre el interior del biofiltro y la temperatura ambiente (aprox. 7°C). En esas horas de la noche a madrugada, la mayor parte de la composta en la zona periférica se encontraría en condiciones de baja actividad, limitada por baja temperatura, a excepción de las zonas bajas (1 y 2) de las caras oriente y sur del biofiltro.

Si se toma como referencia el intervalo de temperatura óptima indicado en la Figura 4.25, se identifica que las zonas periféricas, cercanas a las paredes del biofiltro, presentaron tres

comportamientos distintos, en función de la concentración de metano alimentada. En la etapa 2 se registró el mayor desplazamiento (variación) de las temperaturas a lo largo de un día: a las 6 am solo la cara oriente y cara sur en el nivel 1 están en el intervalo óptimo; a las 2 pm, todos los puntos periféricos en sus cuatro niveles entran en esa zona, para después salir los niveles 3 y 4 a las 10 pm.

Por su parte, el comportamiento periférico en la etapa 3 es más cercano a la zona de temperatura óptima. A las 6 am, solo están fuera tres puntos del nivel 4 y uno del nivel 1 (cara occidente); a las 2 pm y 10 pm, la temperatura se incrementa para sobrepasar los 35°C en los puntos del nivel 3 y en la mayoría del nivel 2.

Los cambios de temperatura registrados por los sensores perimetrales se deben a que esta zonal del biofiltro se comporta como un sistema abierto que tiene la posibilidad de intercambiar calor con el ambiente. Debido a esto, es en la composta cercana a las paredes del biofiltro donde se puede observar una mayor fluctuación de temperatura y la consecuente aparición de zonas activas a zonas de baja actividad a diferentes horas del día. Por el contrario, la zona central del biofiltro se consideraría como un sistema relativamente aislado térmicamente del exterior, donde el calor generado en las zonas perimetral y en la base (entrada) del biofiltro se transporta principalmente por convección en sentido axial, con menor aportación por conducción en sentido radial. El calor así se acumula, debido a la capacidad calorífica de la composta, hasta alcanzar las altas temperaturas mostradas en la Figura 4.25. Este fenómeno se ve claramente reducido en la parte alta del biofiltro, donde el intercambio de calor se ve favorecido entre la zona central y la zona superior del medio filtrante que está en contacto con el espacio vacío del biofiltro (headspace), con excepción de la etapa 4, con la mayor alimentación de metano (8%). En este caso, la CA elevada produce suficiente calor metabólico como para ser transportado por convección hasta la parte alta del biofiltro, resultando en una temperatura de salida en el gas, superior a los 35°C.

De manera similar a lo registrado experimentalmente en este trabajo, la diferencia entre sistema abierto y cerrado según la zona del biofiltro fue discutida por Ng et al. (2015), quienes consideraron a nivel de simulación diferentes escenarios de intercambio de calor y la interacción de la temperatura ambiente.

Bian et al. (2021) realizaron simulaciones con un modelo que integra la transferencia de agua, gas y calor, así como los efectos de factores ambientales, como la presión y temperatura, y de la generación de calor producto de la oxidación de CH<sub>4</sub> en una cubierta de relleno sanitario. Sus resultados indican que la temperatura a diferentes profundidades de capas filtrantes (altura de 0.60 m) tiene un comportamiento de curva parabólica, similar a las aquí obtenidas para las temperaturas centrales de los días operados a concentraciones de 2% y 4% de CH<sub>4</sub> a la entrada. En el trabajo de Bian et al. (2021) no se hace distinción entre temperaturas del centro y paredes, debido a que la simulación considera que la temperatura ambiental y el calor generado por la reacción, tiene mayor incidencia a nivel

de la profundidad y no respecto al radio, el cual en un relleno sanitario es mucho mayor (relación altura/diámetro que tiende a cero) y, en concordancia con Ng et al. (2015), se asemeja a un sistema aislado en esa dirección. En contraste con los autores anteriores, en este trabajo, donde la relación altura/diámetro es de 0.62, se observa que el comportamiento de la temperatura cerca de las paredes del biofiltro, y en algunos casos la temperatura central (con 8% CH<sub>4</sub> a la entrada), no necesariamente es parabólico, sino que puede tener un ajuste a una función polinómica. Esto se puede atribuir a los efectos combinados de generación de calor y su transporte convectivo hacia las zonas altas del medio filtrante, distribución del gas en el medio y el grado de interacción de la temperatura ambiental en las diferentes secciones del biofiltro.

En el caso de la zona central durante la alimentación de CH<sub>4</sub> al 8%, se observa en la Figura 4.25c que el nivel 3 (profundidad -18 cm en la figura) es la zona que mayor calor acumula durante las tres horas mostradas. La variación de la temperatura en esta zona es limitada y se debe, como se mencionó anteriormente, a que esta zona se comporta como un sistema aislado, donde los cambios del exterior no tienen efecto. A las 6:00 am la temperatura en este nivel era de 59°C, a las 2:00 pm de 59°C y a las 10:00 pm de 60°C. A pesar de ser un nivel que puede transferir calor a niveles inferiores y superiores (al nivel 4, cerca de la salida del biofiltro, con facilidad de transferir calor con el exterior) parece que no es suficiente para reducir la temperatura de esta zona. Todo indica que en ese nivel y en esas condiciones de alimentación, se ha alcanzado un equilibrio entre el ingreso y la salida de calor, considerando que no hay generación (metabolismo) en esas condiciones de temperatura.



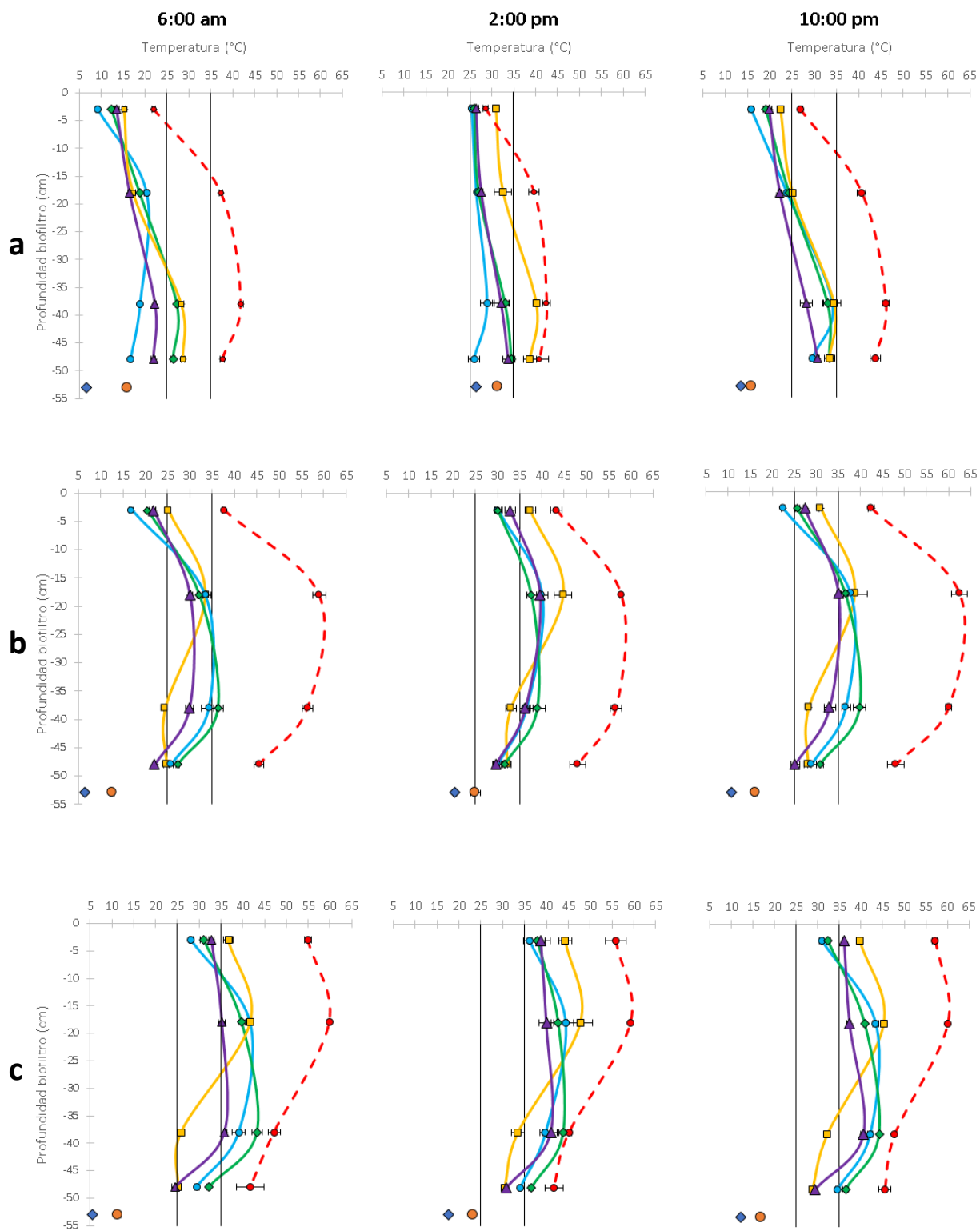


Figura 4.25 Variación de la temperatura respecto a la altura y al centro-periferia en el a) día 24 - etapa 2 con 2% CH<sub>4</sub>, b) día 28 - etapa 3 con 4% CH<sub>4</sub> y c) día 35 - etapa 4 con 8% CH<sub>4</sub>. La temperatura de entrada y ambiente corresponde a la temperatura promedio de la hora presentada.

Como se ha descrito en esta sección, al interior del biofiltro se registraron temperaturas superiores a los 45°C, que incluso superaron los 60°C. A pesar de ello se obtuvieron eficiencias de remoción de CH<sub>4</sub> por encima del 73%. La temperatura óptima para la oxidación de CH<sub>4</sub> se considera entre los 25°C a 35°C (Gómez Borraz, 2017), aunque esto no implica que a temperaturas superiores no se pueda llevar a cabo la oxidación de CH<sub>4</sub>. Jäckel et al. (2005) señalan que son pocas las investigaciones realizadas sobre la oxidación de CH<sub>4</sub> en condiciones termofílicas, donde los metanótrofos termotolerantes (T < a 45°C), los moderadamente termofílicos (45°C a 60°C) y los estrictamente termofílicos (60°C y 70°C) pueden desarrollarse. Jäckel et al. (2005) estudiaron la dinámica del CH<sub>4</sub> en pilas de compost, un proceso predominantemente aerobio, pero debido al calor que se produce durante la oxidación de la materia orgánica, las pilas de compost alcanzan temperaturas entre los 50°C a 70°C, reduciendo drásticamente la disponibilidad de O<sub>2</sub>, lo que permite la actividad metanogénica en ciertas zonas y consecuentemente la producción de CH<sub>4</sub>. En tales condiciones, los autores reportan la presencia del género *Methylocaldum* que de acuerdo a la secuencia del gen del ARN 16S, la especie más cercana es *Methylocaldum szegediense*, reconocido como un metanótrofo moderadamente termofílico (52°C).

Cepas como la *Methylocaldum szegediense* o las cepas *M. thermophilus* (condición óptima para crecimiento 55°C), *M. ucrainicus* (condición óptima para crecimiento 42°C) y *Methylothermus* sp. HB (condición óptima para crecimiento 55°C a 62°C) (Trotsenko et al., 2002) pueden ser algunas de las bacterias metanótrofas que estuvieron presentes en el biofiltro operado durante este trabajo de investigación y por lo tanto fue posible tener tasas de remoción de metano aun con las elevadas temperaturas registradas al interior del biofiltro. Para tener mayor certeza de los microorganismos presentes en sistemas biológicos, se pueden emplear técnicas de secuenciación masiva y realizar un análisis metagenómico, que permite la determinación de la abundancia relativa de microorganismos mediante la secuenciación del gen 16S (Ramos, 2021).

Otro tipo de microorganismos como *Methylovorus glucosotrophus*, *Methylovorus menthalis*, *Methyloversatilis thermotolerans*, *Chryseolinea soil*, *Steroidobacter denitrificans*, los cuales no son necesariamente metanótrofos termofílicos o termo tolerantes, ni consumidores de CH<sub>4</sub> (*Chryseolinea soil*, *Steroidobacter denitrificans*), pero sí son capaces de desarrollarse en un ambiente con presencia de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S, han sido reportados por Ramos (2021) en su estudio de la dinámica de la microbiota desarrollada durante la oxidación de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S desorbidos de un efluente anaerobio.

Dentro de los alcances de este trabajo no se contempló la secuenciación genética de muestras de composta extraídas del biofiltro.

## 4.5 Modelación

El análisis de la dinámica de distribución de calor al interior del biofiltro y como consecuencia las diferentes temperaturas registradas, permitió identificar las zonas que presentan mayor acumulación de calor y cuales por el contrario permiten con mayor facilidad su transporte. Con objeto de integrar los resultados experimentales y sistematizarlos para simular otras condiciones de operación, que permitieran mejorar el desempeño del biofiltro, se recurrió a un modelo desarrollado en el grupo de investigación (Gómez-Borraz et al., 2021).

El proceso aplicado para ello fue, en primer lugar, realizar la calibración del modelo para las condiciones experimentales de esta investigación, posteriormente comparar los resultados de temperatura experimentales y los obtenidos a nivel simulación y finalmente utilizar el modelo calibrado para simular zonas de enfriamiento a nivel axial y radial, con el fin de incrementar la capacidad de eliminación de CH<sub>4</sub> y la eficiencia de remoción del sistema.

### 4.5.1 Calibración del modelo

Para la calibración del modelo de Gómez-Borraz et al. (2021) se seleccionaron 3 días, uno por cada condición de operación aplicada. Los días seleccionados corresponden al día 26, 28 y 35 para las concentraciones de 2%, 4% y 8% respectivamente. Estos días fueron seleccionados porque el sistema se encontraba en estado estacionario respecto a su eficiencia de remoción.

De acuerdo a la metodología descrita en la sección 3.3, se definió la función de temperatura ambiente y de radiación solar para cada uno de los días seleccionados. De manera general, la variación de temperatura ambiente de los días seleccionados corresponde a una función de Gauss (Ecuación 24) donde  $T_i$  es la temperatura ambiente inicial,  $t$  es tiempo y  $A_t$ ,  $w_t$  y  $x_t$  son coeficientes ajustados para el conjunto de datos de temperatura. La función de la radiación solar corresponde a una función polinómica inversa (Ecuación 25) donde  $R_0$  es la radiación inicial,  $A_r$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $x_r$  y  $w_r$  corresponden a coeficientes determinados con el conjunto de datos de radiación solar del día seleccionado.

$$T_{amb}(t) = T_i + \frac{A_t}{w_t \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{-2 \cdot \left(\frac{t-x_t}{w_t}\right)^2} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$Rad(r) = R_i + \frac{A_r}{\left(\frac{1 + A_1 \cdot (2 \cdot (t - x_r))}{w_r}\right)^2} + \frac{A_r}{\left(\frac{1 + A_2 \cdot (2 \cdot (t - x_r))}{w_r}\right)^4} + \frac{A_{rad}}{\left(\frac{1 + A_3 \cdot (2 \cdot (t - x_r))}{w_r}\right)^6}$$

Ecuación 25

Dentro de los primeros ajustes realizados para calibrar el modelo, estuvo la modificación de la función de corrección por temperatura a la tasa máxima de oxidación de CH<sub>4</sub>. A diferencia de Gómez-Borraz et al. (2017) y Abichou et al. (2011), quienes usan una función de corrección por temperatura que limita la actividad a temperaturas entre los 15°C a 40°C, Gómez-Borraz et al. (2021) presentan una función para corrección por temperatura que considera la actividad metanotrófica fuera del rango de temperatura reportado como óptimo (20°C a 35°C ó 293.15 K a 308.15 K), aunque limitándola, al asignarle un factor de corrección por temperatura ( $f_{V,T}$ ) con valores inferiores a 0.59 (se considera como  $f_{V,T}$  óptimo un valor de 1). Con base en la Ecuación 26 (función de corrección de temperatura propuesta por Gómez-Borraz et al. (2021), para la presente investigación se modificó el valor de 17.5205 (Ecuación 26) por 26.5205 (Ecuación 27), de manera que el valor asignado de  $f_{V,T}$  para corregir la actividad metabólica cuando hay temperaturas superiores a los 35°C no sea inferior a 0.59 sino que sea inferior a 0.70. Esto permite que a temperaturas superiores a la óptima aún los microorganismos puedan aportar a la capacidad de eliminación del metano. La modificación de esta función se realiza al tener presente que el biofiltro operado durante esta investigación fue capaz de tener eficiencias de remoción superiores al 73% aun cuando se registraban temperaturas superiores a los 35°C al interior del biofiltro. La temperatura tanto para la Ecuación 26 y Ecuación 27 debe estar en grados Kelvin.

$$f_{V,T} = \frac{17.5205}{17.32792 \cdot \sqrt{\frac{3.14156}{2}}} \cdot e^{-2 \cdot \left(\frac{T-301.47156}{17.32792}\right)^2} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$f_{V,T} = \frac{26.5205}{26.32792 \cdot \sqrt{\frac{3.14156}{2}}} \cdot e^{-2 \cdot \left(\frac{T-301.47156}{26.32792}\right)^2} \quad \text{Ecuación 27}$$

En la Figura 4.26 se puede observar el efecto de la modificación de la Ecuación 26. La Ecuación 26 asigna un valor de  $f_{V,T} \approx 0$ , para temperaturas superiores a 55°C (328.15 K). En el caso de la Ecuación 27, la actividad metabólica se corrige con un  $f_{V,T} \approx 0$  para temperaturas superiores a 70°C (343.15 K), lo que amplía el rango de temperatura favorable a la actividad metabólica.

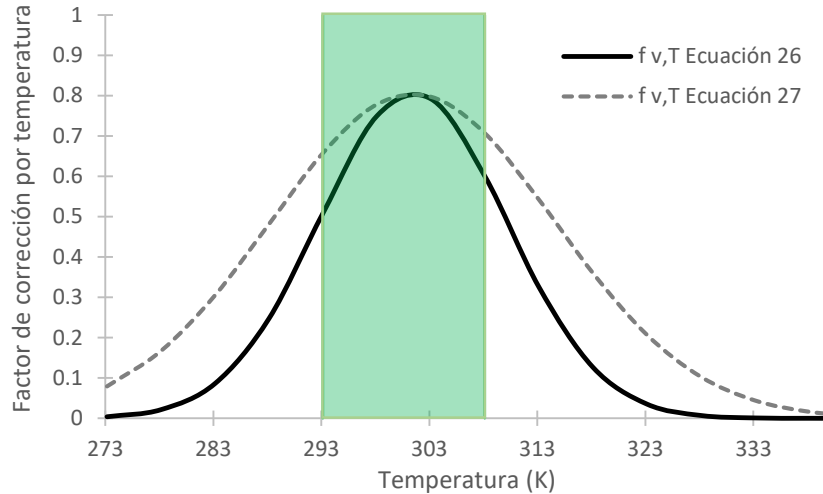


Figura 4.26 Gráfica del factor de corrección por temperatura ( $f_{v,T}$ ) para la Ecuación 26 y Ecuación 27. La zona de color corresponde a la temperatura considerada como óptima.

En la Tabla 4.11 se presentan los parámetros que se modificaron durante la calibración del modelo de Gómez-Borraz et al. (2021). Como se indicó anteriormente, la función por corrección de temperatura se modificó para considerar mayor actividad a temperaturas elevadas. La fracción de la biopelícula se incrementa asumiendo que hay mayor formación de biopelícula porque la composta usada ya contaba con una aclimatación, tomando además en cuenta que la ER de la presente investigación fue mayor a la reportada por Gómez-Borraz et al. (2021). El efecto de la radiación solar sobre el biofiltro se reduce en 77% considerando que a nivel experimental se usó malla sombra (según las especificaciones del material, impide el 75% del impacto de los rayos del sol) y lonas para impedir el contacto directo de los rayos del sol sobre las paredes del biofiltro (sección 3.1.1). La porosidad se ajusta al valor determinado para la composta usada en el experimento (sección 4.1.1). La tasa máxima de respiración endógena se considera nula al suponer que la composta usada a nivel experimental no tenía carbono biodegradable y por ende no hay consumo adicional de  $O_2$ . Finalmente, la conductividad térmica ( $\lambda$ ) se identificó como uno de los parámetros más sensibles del modelo, por lo que al modificarse, tomando valores de: 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 y 0.55 se producía un marcado efecto, ya sea aumentado o reduciendo la eficiencia de remoción obtenida a nivel de simulación.

Como se comentó en la sección 1.3.2.1, la conductividad térmica de la composta depende de factores como el contenido de materia orgánica, contenido de agua y densidad aparente (Waszkielis et al., 2014). Estos factores pueden variar con el tiempo y las condiciones con que se opere el biofiltro, por ejemplo, la forma de adición de agua y homogenización (mezclado) de la composta. De manera indirecta se determinó la  $\lambda$  para diferentes zonas del biofiltro (sección 4.1.5. Tabla 4.3.), obteniendo valores distintos para cada zona, lo que permitió considerar variar el valor de  $\lambda$  entre  $0.25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a  $0.55 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para calibrar el modelo.

Tabla 4.11 Parámetros modificados para la calibración de modelo

| Parámetro                                    | Unidad  | Gómez-Borraz et al. (2021) | Actual trabajo                            |
|--|---|----------------------------|---|
| <b>Función de corrección por temperatura</b> | Adimensional  | Ecuación 26                | Ecuación 27                               |
| <b>Fracción de la biopelícula</b>            | $\frac{\text{m}^3 \text{ biomasa}}{\text{m}^3 \text{ lecho}}$ | 0.0075                     | 0.015                                     |
| <b>Radiación solar</b>                       | $\text{W m}^{-2}$   | Sin reducción              | Reducida en un 77%                        |
| <b>Porosidad de la composta</b>              | Adimensional  | 0.56                       | 0.5                                       |
| <b>Tasa máx. de respiración endógena</b>     | $\text{mol O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$                | 1                          | 0   |
| <b>Conductividad térmica de la composta*</b> | $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$                              | 0.24                       | 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 y 0.55 |

\*Valores dentro del rango reportado por Chandrakanthi et al. (2005)

Al hacer simulaciones con diferentes valores de  $\lambda$  y calcular la calidad del ajuste, mediante el coeficiente de varianza de la raíz del error cuadrático medio (CV RMSE), permitió mediante un valor numérico soportar la consideración que existen diferentes contenidos de humedad en distintas zonas del biofiltro (paredes, centro y nivel superior). Al observar estos resultados se planeó hacer simulaciones en que se dividiera el biofiltro en diferentes zonas y a cada una de estas se les asignaría un valor de conductividad. Sin embargo, al momento de hacer algunas simulaciones de esta manera los resultados no fueron concluyentes. Se puede considerar que existen otros parámetros que también tendrían que ser ajustados a cada una de estas zonas para que los resultados fueran acordes a lo observado a nivel experimental. Sin embargo, hacer este tipo de modificaciones aumentaría aún más la complejidad del modelo.

Para fines de esta investigación, el parámetro de  $\lambda$  no sólo es una propiedad térmica de la composta, sino que abarca la interacción de la cantidad de agua en el medio, el grado de saturación y compactación de la composta, parámetros que de manera independiente no están definidos en el modelo de Gómez-Borraz et al. (2021).

#### 4.5.2 Eficiencia de remoción y temperatura simuladas

Una vez calibrado el modelo para las tres condiciones experimentales ( $\text{CH}_4$  al 2%, 4% y 8%) se realizaron simulaciones con diferentes valores de conductividad térmica y se comparó la ER y la temperatura obtenida.

Por medio de la simulación se pueden obtener para diferentes tiempos, valores de concentraciones de  $\text{CH}_4$  y de temperatura a distintos niveles de altura y distancia radial. Sin embargo, para este trabajo sólo se considera la concentración de  $\text{CH}_4$  simulada para el nivel

superior (salida) del corte axial y radial en un tiempo de 24 horas. Respecto a la temperatura, se trabaja con los valores simulados para las zonas del centro ( $r=0$  m), medio ( $r=0.21$  m) y pared ( $r=0.42$  m) a los mismos niveles de altura del experimento (0.05 m, 0.15, 0.35 m y 0.50 m). Por lo tanto, una simulación utilizando un valor de  $\lambda$  que aplica para todas las zonas del biofiltro genera un valor de ER que es el promedio de las concentraciones de  $\text{CH}_4$  del nivel superior en distintos puntos radiales, además de 12 curvas de temperatura. Para cada par de curvas de temperatura (experimental y simulada) se calculó el CV (RMSE) con el que se evaluó el error estadístico de los datos. En la Figura 4.27 se presenta el proceso de obtención de los datos simulados y la comparación con los experimentales.

Respecto al corte radial y axial es importante mencionar que es un área del biofiltro que se toma como representativa del volumen total del biofiltro. El modelo de Gómez-Borraz et al (2021) supone que el sistema de biofiltración tiene simetría angular, por lo tanto, para diferentes ángulos se tienen la mismas condiciones y resultados.

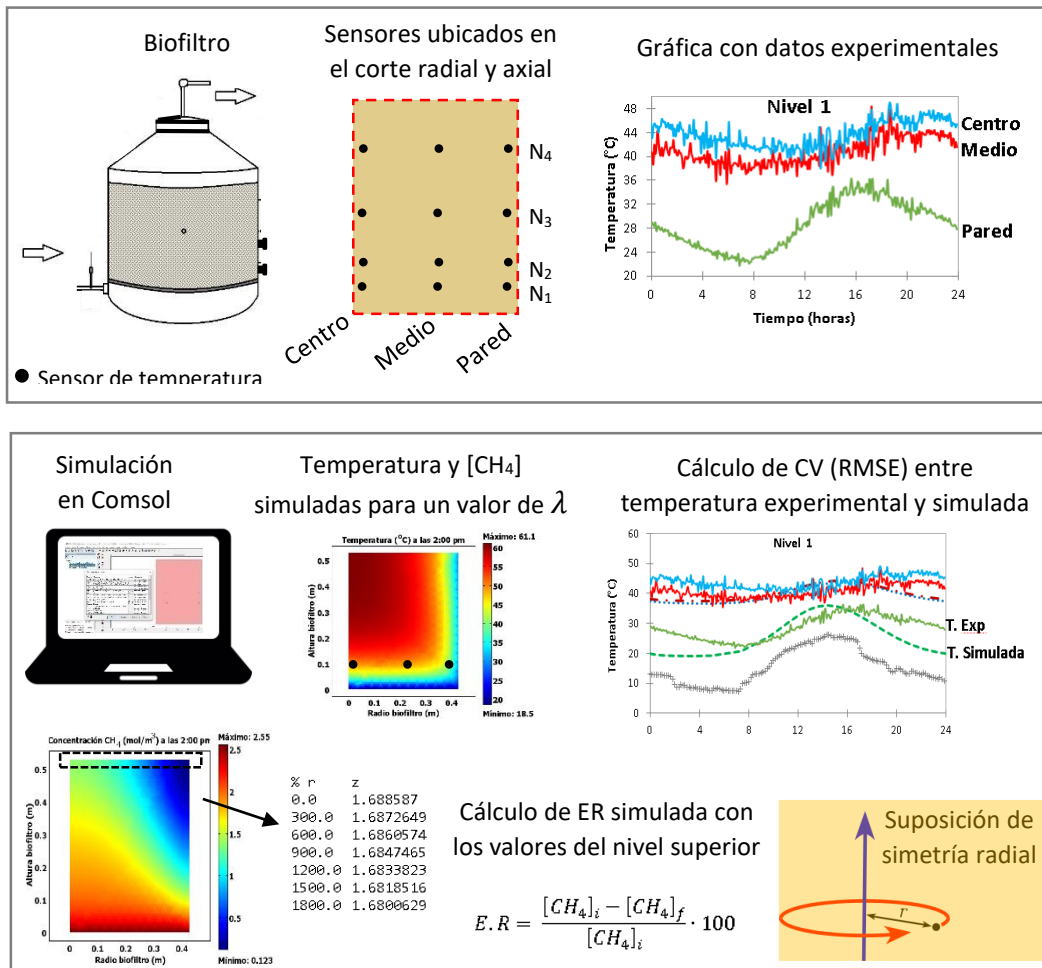


Figura 4.27 Representación de los datos obtenidos a nivel simulación y la comparación con los experimentales

En la Tabla 4.12 a Tabla 4.14 se presenta la ER obtenida para simulaciones con diferentes valores de  $\lambda$  y para las tres concentraciones alimentadas de metano. También se presenta el valor CV (RMSE) obtenido al comparar las curvas de temperatura experimentales con las simuladas para cada una de las tres concentraciones de CH<sub>4</sub> evaluadas.

Para la simulación de la condición de CH<sub>4</sub> al 2%, se seleccionan los resultados generados con la  $\lambda$  de 0.30 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Con este valor de  $\lambda$  se obtiene una ER simulada de 99% contra una experimental del 100%. Respecto al CV (RMSE) no es la condición que genera los menores valores del error. Según el grado de saturación calculado (sección 4.1.5) para la muestra de composta inicial, la  $\lambda$  era de 0.47 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Sin embargo, con la calibración del modelo, el valor de  $\lambda$  de 0.45 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> no generó simulaciones de temperatura con un buen ajuste. Como se hizo mención anteriormente, la  $\lambda$  no solo es una propiedad térmica de la composta, sino que en el modelo abarca la interacción de otras propiedades.

En las Figura 4.28 y Figura 4.29 se presentan las curvas de temperatura experimentales y simuladas con un valor de  $\lambda$  de 0.30 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. También se muestran gráficas realizadas con los menores valores de CV (RMSE) obtenidos para los distintos valores de  $\lambda$ . Este último tipo de gráficas “rompecabezas” se presentan para ilustrar la heterogeneidad del biofiltro y cómo, a distintos niveles y zonas, se pueden tener condiciones diferentes de humedad y porosidades y por ende de conductividad térmica.

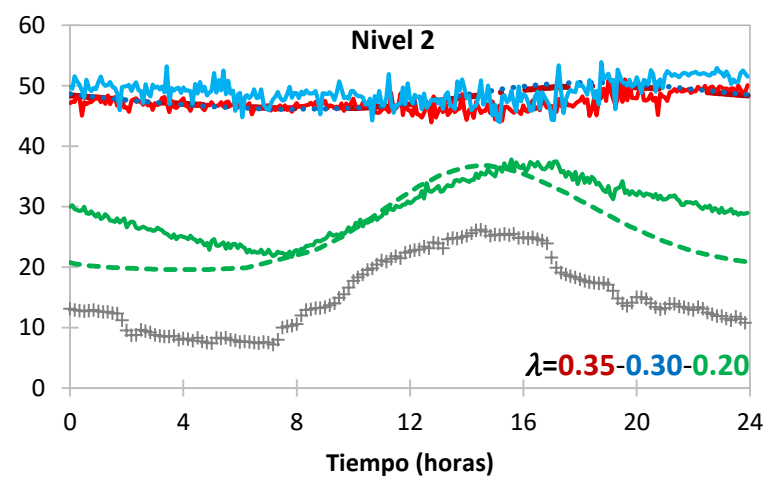
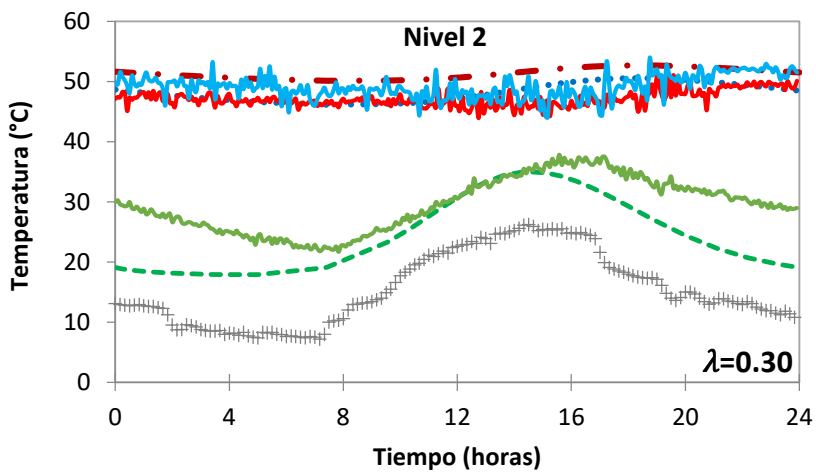
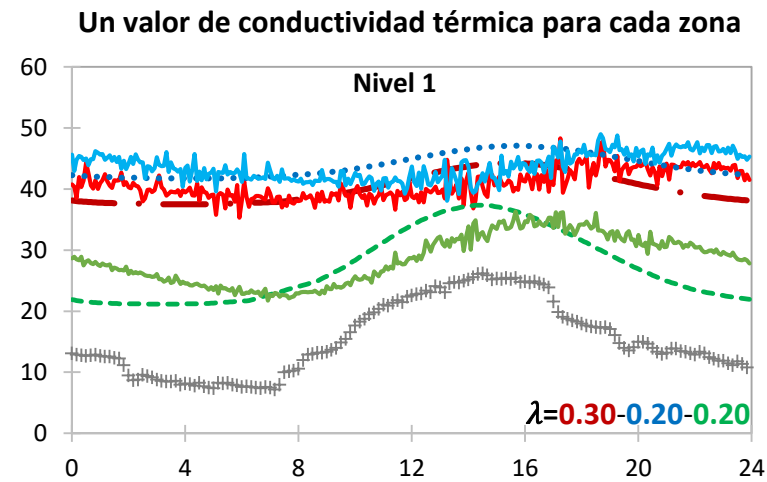
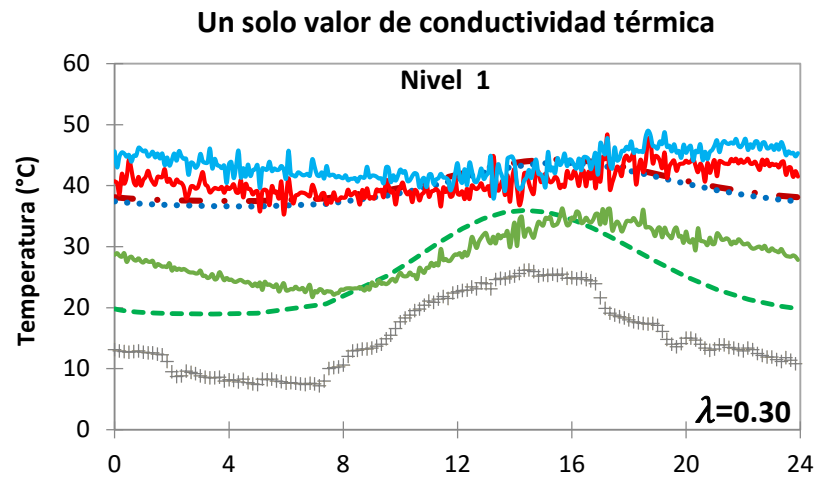
Tabla 4.12 Eficiencia de remoción y valores de CV(RMSE) de las curvas de temperatura obtenidos para la simulación del día 26 (2% CH<sub>4</sub>)

| Valor de conductividad térmica (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) |        | $\lambda = 0.45$ | $\lambda = 0.40$   | $\lambda = 0.35$  | $\lambda = 0.30$   | $\lambda = 0.25$  | $\lambda = 0.20$   |
|---|--------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| ER simulada*  |        | 100%             | 100%               | 100%              | 99%                | 99%               | 96%                |
| Nivel   | Zona   | CV (RMSE)        |                    |                   |                    |                   |                    |
| 1 (5cm)   | Centro | 16.9             | 13.1               | 9.6               | <b><u>7.2</u></b>  | 7.3               | 10.4               |
|   | Medio  | 24.2             | 20.5               | 16.4              | 12.3               | 8.6               | <b><u>6.6</u></b>  |
|   | Pared  | 23.5             | 22.1               | 20.5              | 18.8               | 17.1              | <b><u>15.4</u></b> |
| 2 (15cm)  | Centro | 20.1             | 10.3               | <b><u>5.6</u></b> | 14.8               | 24.9              | 34.3               |
|   | Medio  | 31.0             | 23.2               | 14.4              | <b><u>6.6</u></b>  | 8.8               | 17.0               |
|   | Pared  | 15.3             | 14.5               | 13.7              | 12.7               | 11.5              | <b><u>10.0</u></b> |
| 3 (35cm)  | Centro | 36.7             | 29.8               | 20.1              | <b><u>6.6</u></b>  | 15.1              | 32.5               |
|   | Medio  | 38.5             | 33.9               | 27.6              | 18.2               | <b><u>5.3</u></b> | 14.1               |
|   | Pared  | 39.6             | 38.7               | 37.7              | 36.3               | 34.4              | <b><u>31.0</u></b> |
| 4 (50cm)  | Centro | 12.0             | <b><u>10.7</u></b> | 14.2              | 25.9               | 50.1              | 83.3               |
|   | Medio  | 43.8             | 35.3               | 24.3              | <b><u>11.9</u></b> | 30.7              | 82.6               |
|   | Pared  | 23.6             | 23.0               | 22.4              | 21.5               | 20.2              | <b><u>17.7</u></b> |

\* La eficiencia de remoción obtenida a nivel experimental para el día simulado fue de 100%

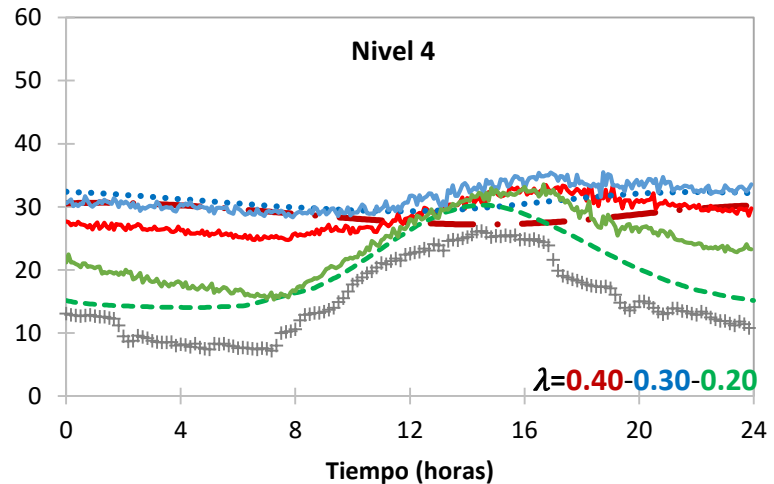
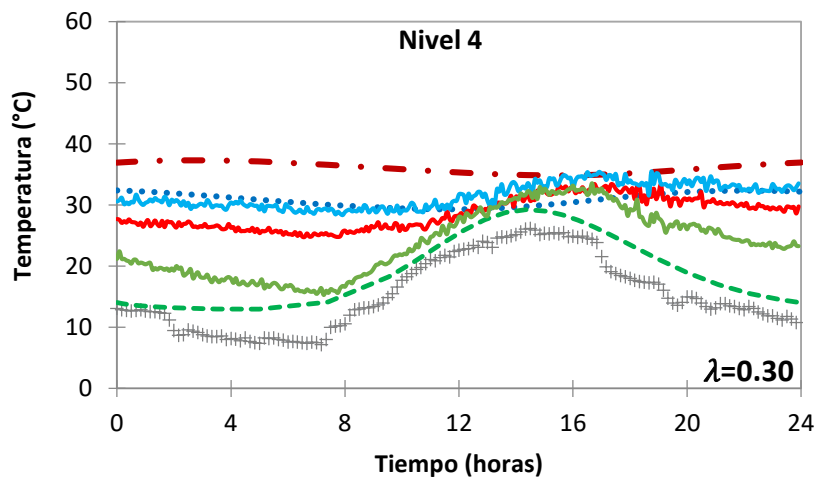
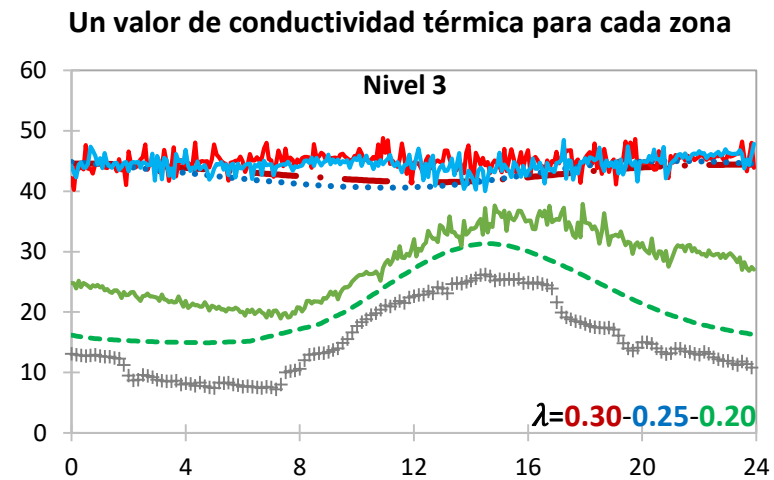
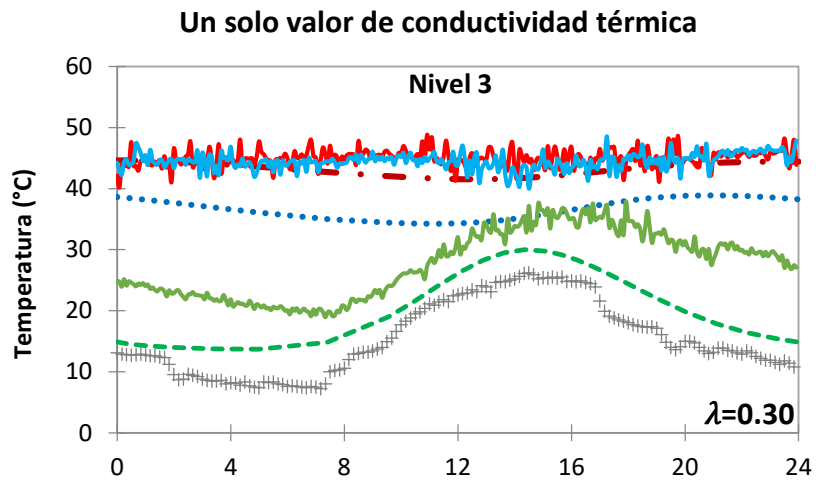
\*\*Los valores subrayados y en negritas corresponden al menor CV (RMSE) obtenido para la zona del biofiltro (centro, medio y pared)





+ T ambiente    —•— Centro    ..... Medio    - - - - Pared    — Centro exp.    — Medio exp.    — Pared exp.

Figura 4.28 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 1 (0.05m) y Nivel 2 (0.15m) del día simulado bajo la concentración de 2% de  $CH_4$  a la entrada.



+ T ambiente    - · - Centro    ····· Medio    - - - Pared    - Centro exp.    - Medio exp.    - Pared exp.

Figura 4.29 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 3 (0.35cm) y Nivel 4 (0.50 m) del día simulado bajo la concentración de 2% de  $\text{CH}_4$  a la entrada.

Para la simulación de la condición de CH<sub>4</sub> al 4% (Tabla 4.13), se seleccionan los resultados generados con la  $\lambda$  de 0.40 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Con este valor de  $\lambda$  se obtiene una ER simulada de 93% contra una experimental del 97%. Otras simulaciones generan una ER cercana a la experimental; sin embargo, la simulación de la temperatura interna del biofiltro no es adecuadamente representada.

Durante la etapa 3 (4% CH<sub>4</sub>), no se hizo medición de la humedad de la composta. Sin embargo, se puede asumir que la humedad era diferente en algunas zonas del biofiltro, en especial la zona central que durante esta etapa registraba temperaturas entre los 47°C a 66°C. Al igual que la simulación para la condición de 2% CH<sub>4</sub>, para los distintos niveles y zonas del biofiltro se requeriría hacer simulaciones con diferentes propiedades. Es de señalar que tanto para la simulación de 2% y 4% CH<sub>4</sub>, el modelo presenta mejor ajuste con valores de  $\lambda$  entre 0.20 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> a 0.35 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> y para el caso de la simulación del 8%, como se muestra más adelante, se tiene mejor ajuste y ER cercana a la experimental cuando la  $\lambda$  es de 0.55 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>.

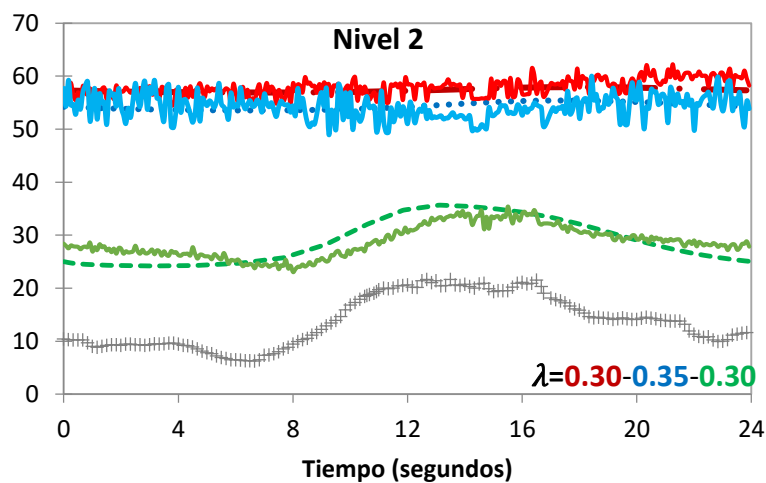
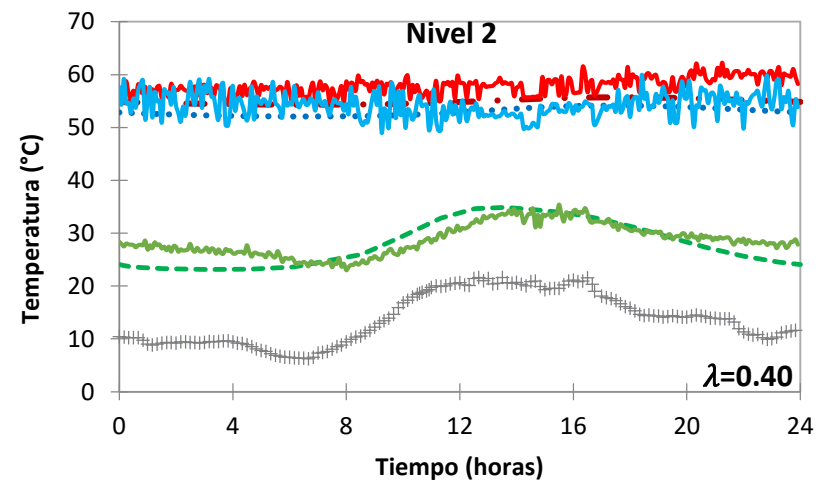
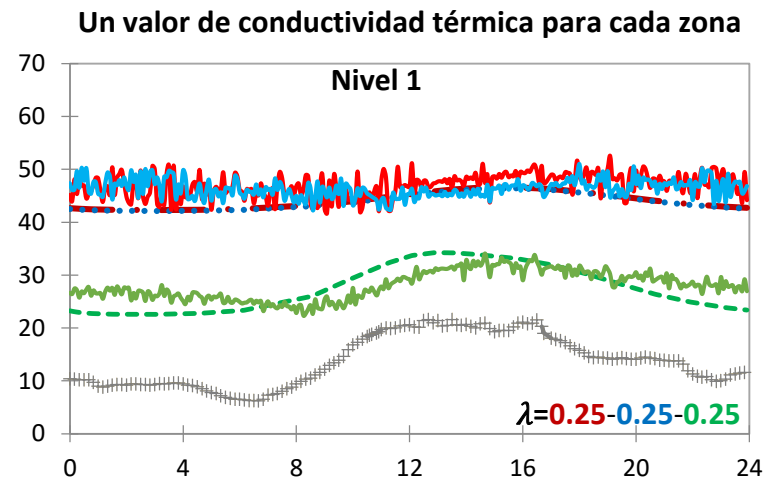
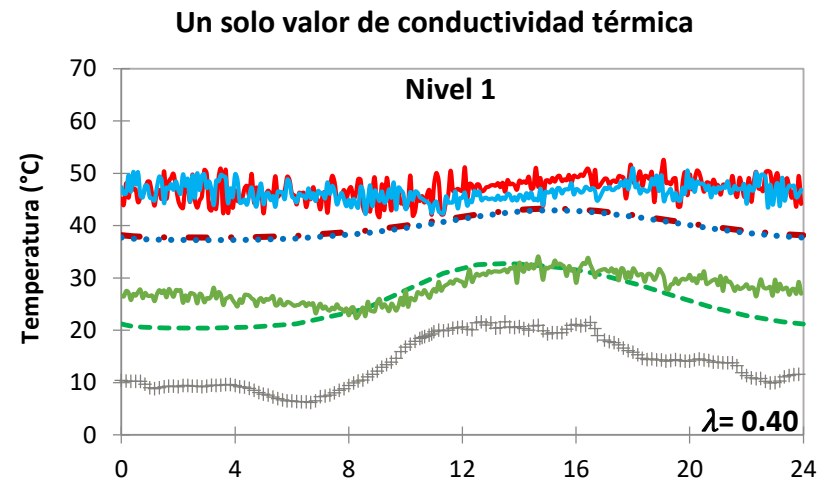
Tabla 4.13 Eficiencia de remoción y valores de CV(RMSE) de las curvas de temperatura obtenidos para la simulación del día 28 (4% CH<sub>4</sub>)

| Valor de conductividad térmica (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) |        | $\lambda = 0.55$   | $\lambda = 0.50$ | $\lambda = 0.45$ | $\lambda = 0.40$   | $\lambda = 0.35$  | $\lambda = 0.30$  | $\lambda = 0.25$   |
|---|--------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| ER simulada*  |        | 99%                | 98%              | 96%              | 93%                | 90%               | 86%               | 81%                |
| Nivel   | Zona   | CV (RMSE)          |                  |                  |                    |                   |                   |                    |
| 1 (5cm)   | Centro | 22.2               | 20.2             | 18.2             | 15.9               | 13.5              | 10.8              | <b><u>7.9</u></b>  |
|   | Medio  | 22.7               | 20.5             | 18.3             | 15.8               | 13.3              | 10.4              | <b><u>7.4</u></b>  |
|   | Pared  | 17.7               | 16.6             | 15.5             | 14.2               | 13.2              | 11.9              | <b><u>10.9</u></b> |
| 2 (15cm)  | Centro | 23.6               | 19.3             | 15.4             | 11.6               | 8.1               | <b><u>5.5</u></b> | 5.8                |
|   | Medio  | 16.5               | 13.0             | 10.0             | 7.6                | <b><u>6.6</u></b> | 7.6               | 10.4               |
|   | Pared  | 5.7                | 5.3              | 4.9              | 4.6                | 4.5               | <b><u>4.3</u></b> | 4.6                |
| 3 (35cm)  | Centro | 18.1               | 12.4             | 8.2              | 5.3                | <b><u>4.5</u></b> | 5.6               | 7.8                |
|   | Medio  | 29.3               | 23.6             | 18.5             | 13.8               | 9.8               | 6.5               | <b><u>4.4</u></b>  |
|   | Pared  | 54.4               | 53.1             | 52.0             | 50.5               | 49.0              | 47.3              | <b><u>44.7</u></b> |
| 4 (50cm)  | Centro | <b><u>11.3</u></b> | 19.3             | 27.7             | 34.5               | 39.9              | 44.3              | 48.6               |
|   | Medio  | 51.8               | 35.7             | 20.8             | <b><u>12.5</u></b> | 20.7              | 32.8              | 45.8               |
|   | Pared  | 34.0               | 32.9             | 32.0             | 30.9               | 29.6              | 28.5              | <b><u>26.5</u></b> |

\* La eficiencia de remoción obtenida a nivel experimental para el día simulado fue de 97%

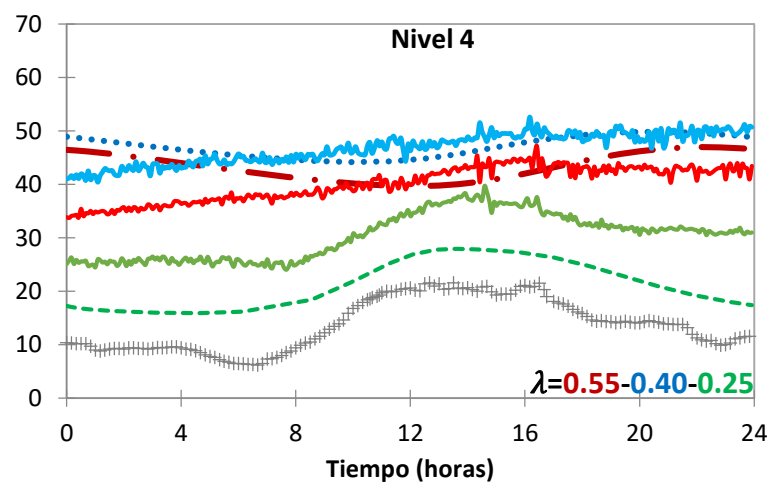
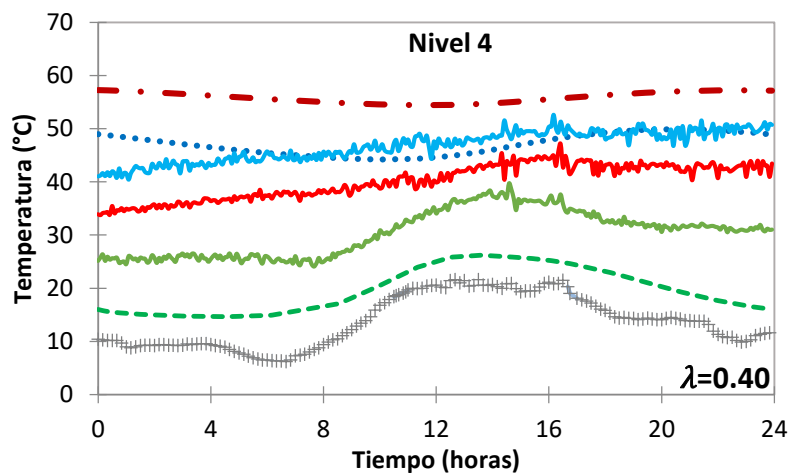
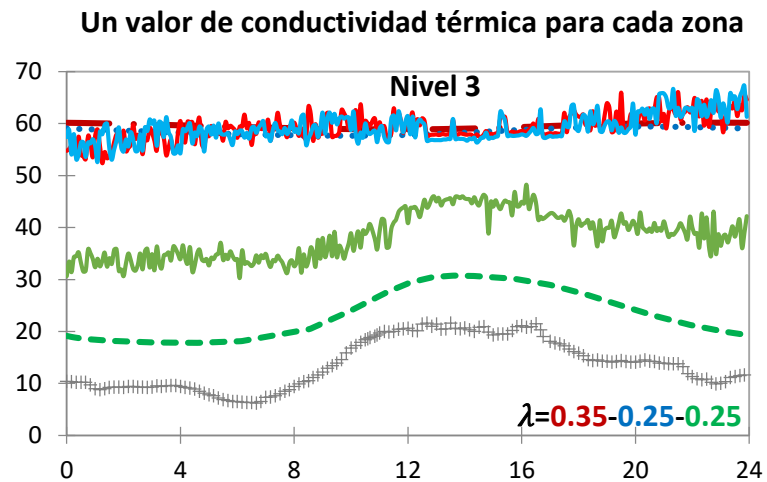
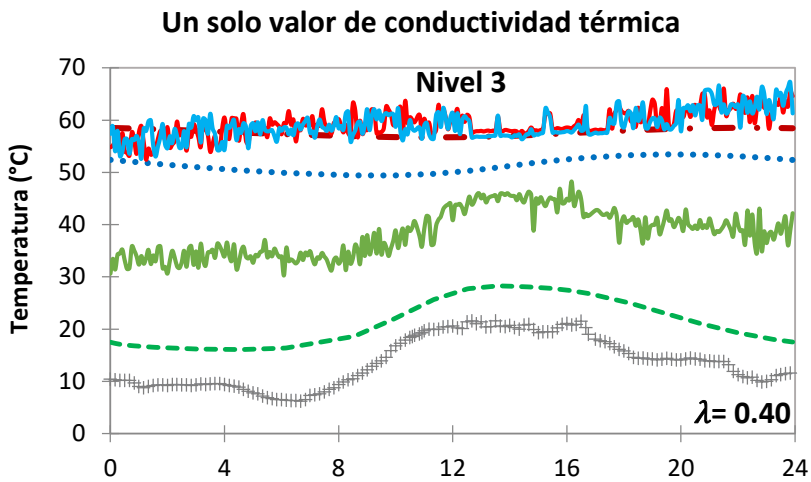
\*\*Los valores subrayados y en negritas corresponden al menor CV (RMSE) obtenido para la zona del biofiltro (centro, medio y pared)

En las Figura 4.30 y Figura 4.31 se presentan las curvas de temperatura para la condición de 4% CH<sub>4</sub> a la entrada del gas, tanto para el valor seleccionado de conductividad térmica como para varios según el criterio de menor valor de CV (RMSE) obtenido. Para el caso del nivel 1 se tiene la particularidad que todas las zonas del biofiltro tienen mejor ajuste con un valor de  $\lambda$  de 0.25 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>.



+ T ambiente    —•— Centro    ..... Medio    - - - - Pared    — Centro exp.    — Medio exp.    — Pared exp.

Figura 4.30 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 1 (0.05m) y Nivel 2 (0.15m) del día simulado bajo la concentración de 4% de CH<sub>4</sub> a la entrada.



+ T ambiente    —•— Centro    ..... Medio    - - - Pared    — Centro exp.    — Medio exp.    — Pared exp.

Figura 4.31 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 3 (0.35cm) y Nivel 4 (0.50 m) del día simulado bajo la concentración de 4% de  $CH_4$  a la entrada.

Para la simulación de la condición de CH<sub>4</sub> al 8%, se seleccionan los resultados generados con la  $\lambda$  de 0.55 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Para este valor de  $\lambda$  se obtiene una ER simulada de 71% contra una experimental del 75%.

Para esta última etapa experimental, a diferencia de las anteriores, se tomaron muestras de composta de distintas zonas del biofiltro (sección 4.1.5) y se determinó el contenido de humedad y la conductividad térmica asociada. La composta del nivel 4 presentaba un alto contenido de humedad con respecto al nivel 2. Para el nivel 4 en el centro, la conductividad térmica calculada fue de 0.55 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> y para el nivel 2 en el centro de 0.24 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> y en la pared de este mismo nivel de 0.40 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. El valor promedio para el biofiltro, considerando la humedad del nivel 2 pared y centro y del nivel 4 centro, es de 0.40 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>.

En la Tabla 4.14 se puede observar que la simulación tiene mejor ajuste para el nivel 2 cuando la  $\lambda$  es 0.55 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, valor lejano del calculado con la humedad medida en la muestra de composta del centro presentada en el párrafo anterior (0.24 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>). Sin embargo, el valor menor del indicador CV (RMSE) en la pared de ese mismo nivel es muy cercano al obtenido (6.2 vs 6.3) con la conductividad térmica calculada para ese punto (0.40 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>). En nivel 1 el modelo tiene mejor ajuste con valores bajos de  $\lambda$ .

Respecto a la relación del valor de conductividad térmica para los niveles 3 y 4 entre el valor experimental y el de la simulación, sí existe una similitud para las zonas centro y medio. En el caso de la pared se presenta un mejor ajuste de las curvas de temperatura cuando el valor de conductividad térmica es 0.25 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Este nivel alcanzó temperaturas máximas en el centro de 61°C y en la pared de 51°C.

En las simulaciones para las concentraciones de CH<sub>4</sub> al 2% y 4%, se obtuvo un mejor ajuste con valores de  $\lambda$  entre 0.20 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> a 0.35 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> para la mayoría de zonas del biofiltro. En el caso de la simulación con 8% CH<sub>4</sub>, los valores de  $\lambda$  que corresponden al mejor ajuste de la variación de la temperatura en las zonas del centro y medio de los niveles 3 y 4 están en el otro extremo, comparados con los correspondientes a la pared.

La diferencia entre los valores de conductividad térmica determinados experimentalmente para la etapa 4 y los que el modelo mejor ajusta las variaciones de temperatura, se puede asociar al tiempo que llevaba operando el biofiltro. Para el día seleccionado para la simulación en esa etapa, el biofiltro llevaba en operación 35 días, en los cuales se habían alcanzado temperaturas de hasta 67°C y en ningún momento se retiró la composta para humedecerla y homogenizarla. Estas condiciones seguramente generaron zonas con propiedades distintas, las cuales el modelo no considera dentro de su análisis.

En las Figura 4.32 y Figura 4.33 se presentan las curvas de temperatura para la condición de 8% CH<sub>4</sub> a la entrada del gas. Para esta condición de simulación, la zona de las paredes de los niveles 1, 3 y 4 presentan mejor ajuste cuando el valor de  $\lambda$  es 0.25 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Para la pared del nivel 2, el indicador del mejor ajuste (6.2) es muy cercano al obtenido (6.8) para el valor

de conductividad térmica de  $0.25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , por lo que puede considerarse como representativo para toda la sección de pared del biofiltro.

Tabla 4.14 Eficiencia de remoción y valores de CV(RMSE) de las curvas de temperatura obtenidos para la simulación del día 35 (8%  $\text{CH}_4$ )

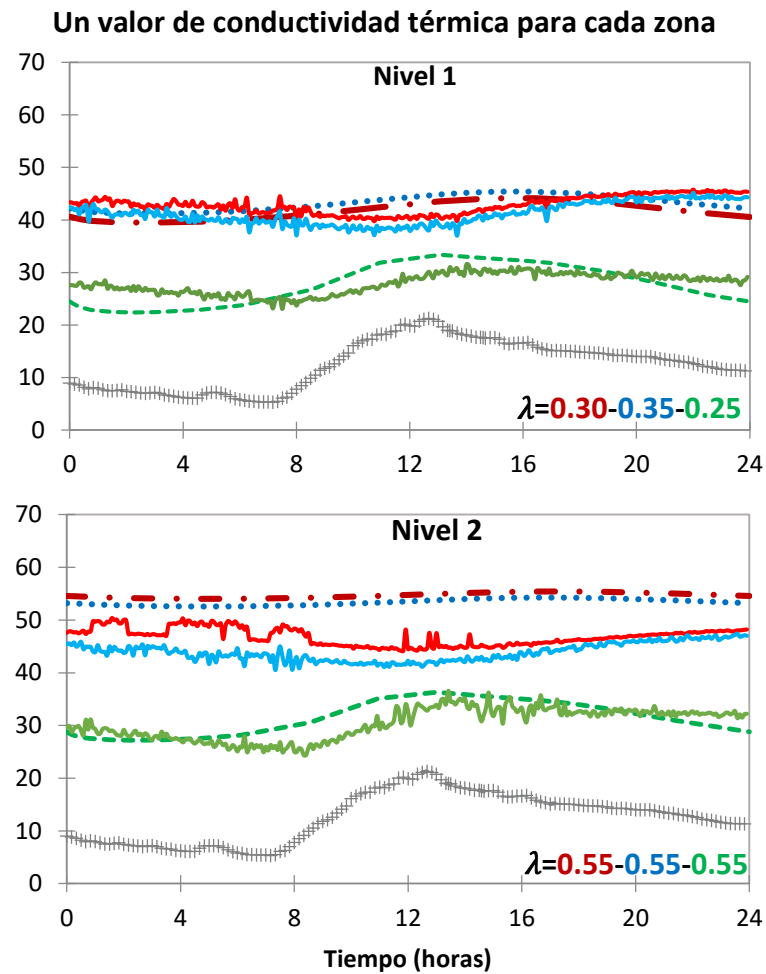
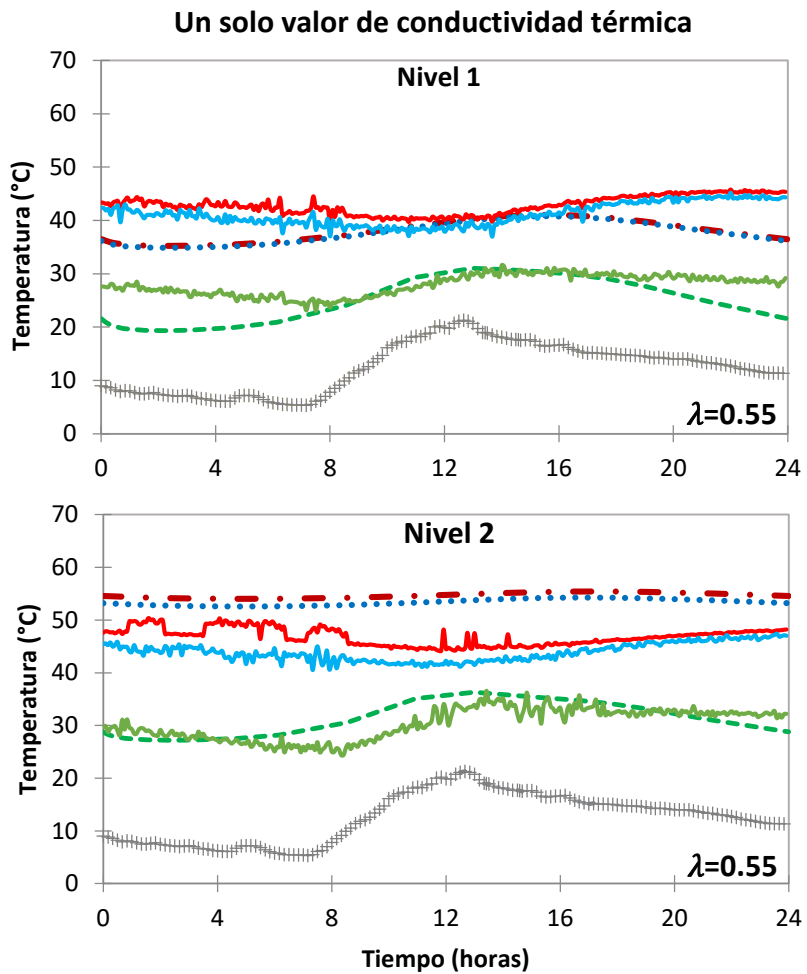
| Valor de conductividad térmica ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) |        | $\lambda = 0.55$ | $\lambda = 0.50$ | $\lambda = 0.45$ | $\lambda = 0.40$ | $\lambda = 0.35$ | $\lambda = 0.30$ | $\lambda = 0.25$ |
|---|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ER simulada*  |        | 71%              | 69%              | 67%              | 64%              | 62%              | 59%              | 55%              |
| Nivel   | Zona   | CV (RMSE)        |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| 1 (5cm)   | Centro | 12.9             | 11.2             | 9.4              | 7.6              | 6.0              | <b>5.5</b>       | 6.8              |
|   | Medio  | 10.8             | 9.2              | 7.7              | 6.6              | <b>6.4</b>       | 7.7              | 10.3             |
|   | Pared  | 15.0             | 14.3             | 13.5             | 12.7             | 11.9             | 11.1             | <b>10.5</b>      |
| 2 (15cm)  | Centro | <b>26.7</b>      | 29.0             | 31.4             | 34.0             | 36.9             | 40.2             | 43.9             |
|   | Medio  | <b>23.9</b>      | 25.7             | 27.6             | 29.7             | 32.0             | 34.6             | 37.5             |
|   | Pared  | <b>6.2</b>       | 6.2              | 6.3              | 6.3              | 6.5              | 6.6              | 6.8              |
| 3 (35cm)  | Centro | <b>2.0</b>       | 3.0              | 4.1              | 5.3              | 6.6              | 8.0              | 9.7              |
|   | Medio  | <b>1.8</b>       | 2.7              | 3.9              | 5.2              | 6.7              | 8.4              | 10.4             |
|   | Pared  | 41.9             | 41.3             | 40.8             | 40.2             | 39.4             | 38.8             | <b>37.9</b>      |
| 4 (50cm)  | Centro | <b>10.1</b>      | 11.4             | 16.2             | 14.2             | 15.8             | 17.5             | 19.5             |
|   | Medio  | <b>15.1</b>      | 17.6             | 25.5             | 23.2             | 26.2             | 29.5             | 33.2             |
|   | Pared  | 28.4             | 27.7             | 27.3             | 25.8             | 24.6             | 23.3             | <b>21.8</b>      |

\* La eficiencia de remoción obtenida a nivel experimental para el día simulado fue de 75%

\*\*Los valores subrayados y en negritas corresponden al menor CV (RMSE) obtenido para la zona del biofiltro (centro, medio y pared)

De manera general se puede considerar que el modelo de Gómez-Borraz et al. (2021) es capaz de simular eficiencias de remoción para diferentes concentraciones de  $\text{CH}_4$  en el gas a biofiltrar, así como la temperatura al interior del biofiltro. La similitud de la temperatura experimental con la predicha para un momento determinado, si bien presenta diferencia, esto se podría mejorar si se realizará un análisis que permitiera asociar un factor que considere el desfase, el cual puede ser la humedad, que ajusta la conductividad térmica. Como se ha indicado en otras secciones de este documento, la temperatura ambiente tiene una influencia directa sobre la temperatura interna del biofiltro, pero su efecto no se percibe instantáneamente, sino que se requiere de un tiempo para subir o bajar la temperatura interna según sea el gradiente con el exterior.

Adicional, si se incluyeran en el modelo procesos como la producción de agua, la evaporación y suministro de agua ocasional, así como la variación de las propiedades físicas y térmicas de la composta con el paso del tiempo, la predicción de la temperatura interna podría tener una mayor precisión y exactitud.



+ T ambiente    —•— Centro    ..... Medio    - - - - Pared    — Centro exp.    — Medio exp.    — Pared exp.

Figura 4.32 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 1 (0.05m) y Nivel 2 (0.15m) del día simulado bajo la concentración de 8% de CH<sub>4</sub> a la entrada.



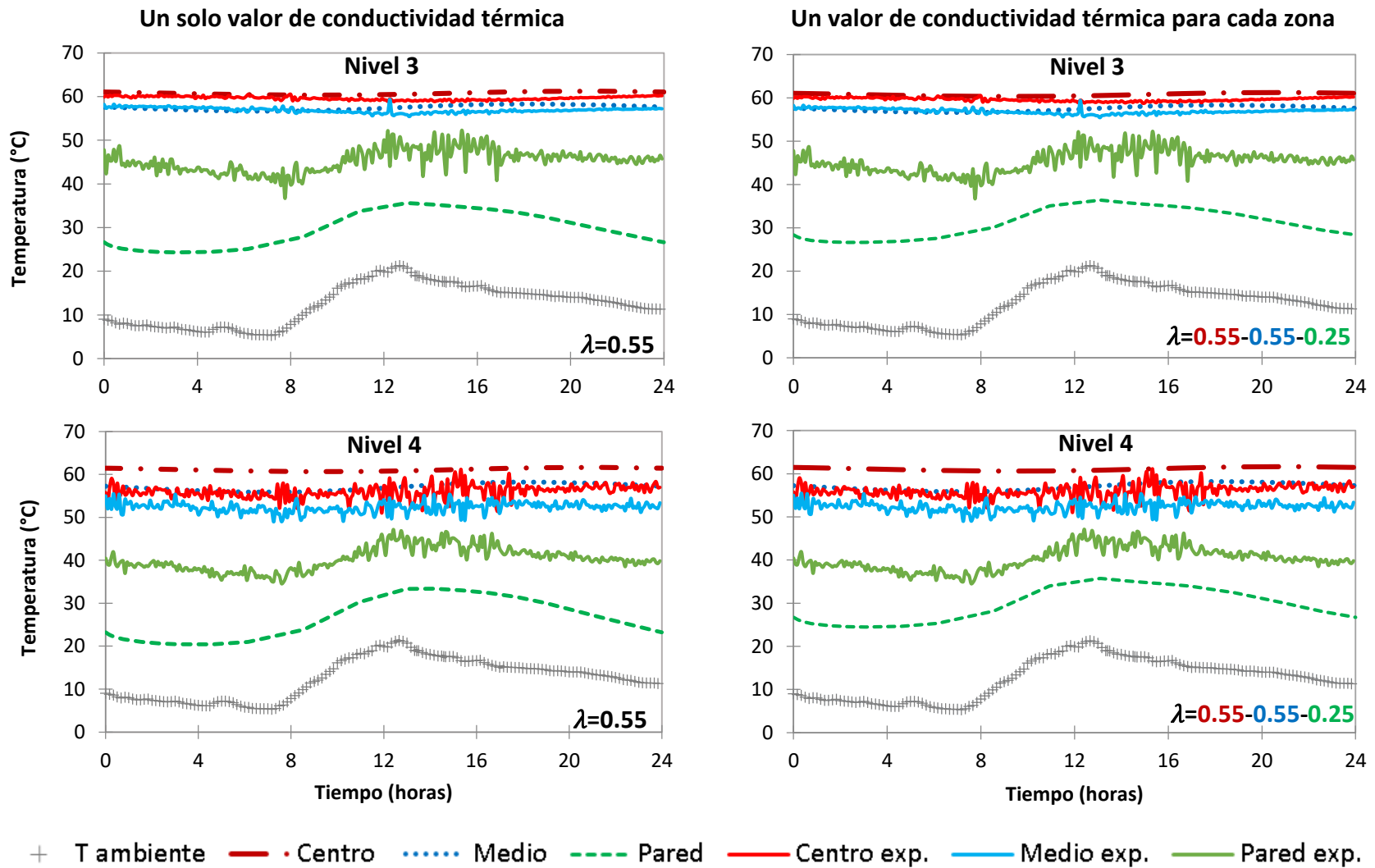


Figura 4.33 Curvas de temperatura experimentales (exp) y modeladas para el Nivel 3 (0.35m) y Nivel 4 (0.50m) del día simulado bajo la concentración de 8% de  $CH_4$  a la entrada.

#### 4.6 Propuesta de remoción de calor

Como se ha referenciado y discutido en este documento, la temperatura tiene relación directa con la actividad metabólica de los microorganismos, afecta aspectos físicos como la solubilidad de los gases y promueve la pérdida de agua del medio filtrante. Los resultados experimentales, muestran que la temperatura interna varió desde los 28°C, cuando la concentración de CH<sub>4</sub> era del 2%, hasta los 67°C cuando la concentración de CH<sub>4</sub> fue del 8%.

La temperatura alcanzada al interior del biofiltro se relaciona con el calor generado durante la oxidación del CH<sub>4</sub> y su acumulación. En la Tabla 4.15 se presenta la tasa de calor metabólico generado durante la oxidación biológica de CH<sub>4</sub> para las tres concentraciones evaluadas. La tasa de calor metabólico se calcula según la expresión de la Ecuación 12, donde se considera el número de moles oxidadas por la entalpía de reacción ( $\Delta H_{rx}$ ) del CH<sub>4</sub>. La  $\Delta H_{rx}$  significa que cuando una mol de CH<sub>4</sub> reacciona con dos moles de O<sub>2</sub> para producir 1 mol de CO<sub>2</sub> y 2 moles de H<sub>2</sub>O líquida, se liberan 889 kJ de energía calorífica.

Tabla 4.15 Tasa de calor metabólico durante la oxidación de CH<sub>4</sub>

| Etapa | [CH <sub>4</sub> ] | Carga de alimentación<br>(gCH <sub>4</sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | Capacidad de eliminación<br>(gCH <sub>4</sub> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | Tasa de calor metabólico<br>(kJ m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) | Tasa de calor metabólico<br>(kJ h <sup>-1</sup> )* |
|-------|--------------------|--|---|---|--|
| 2     | 2 %                | 25.7 ± 2.4   | 25.3 ± 2.6  | 1407.3 ± 145.1  | 422.2  |
| 3     | 4 %                | 51.4 ± 2.0   | 50.1 ± 1.6  | 2787.1 ± 89.2   | 834.6  |
| 4     | 8 %                | 102.6 ± 5.7  | 75.8 ± 8.7  | 4216.1 ± 485.7  | 1264.8   |

\* Tasa de calor metabólico aproximada al considerar un volumen de composta del biofiltro de 0.30 m<sup>3</sup>.

La energía calorífica liberada durante la biofiltración de CH<sub>4</sub> va a producir un aumento de la temperatura al interior del biofiltro y como consecuencia alteraciones en el proceso. Este calor por lo tanto debe ser removido, para permitir que el proceso de biofiltración pueda continuar con adecuadas eficiencias de remoción de CH<sub>4</sub> dentro del intervalo óptimo de temperatura.

Durante la oxidación de CH<sub>4</sub> en el biofiltro, la liberación de calor producirá un aumento de la temperatura en la composta, el agua y aire. El calor liberado durante este proceso puede ser calor sensible y calor latente. El calor sensible es energía asociada al aumento de temperatura, el calor latente es energía asociada con un aumento de vapor de agua (Smith et al., 2017). Adicional a la tasa de generación de calor presentada en la Tabla 4.15 se debe considerar el calor producto del vapor de agua. La captura de calor latente y el uso de intercambiadores de calor para enfriar el medio filtrante podrían proveer una fuente de energía térmica factible de recuperar en los sistemas de biofiltros de composta.

Malesani et al. (2021) presentan un sistema para la recuperación del calor generado durante el proceso de compostaje. Como los autores lo refieren, es una alternativa de producción de calor renovable. Durante la biodegradación aerobia de la biomasa, se puede liberar calor que calienta las pilas de composta hasta los 65°C. Este calor se puede recuperar por medio de conducción, al instalar tubos en espiral dentro de la masa de compostaje y en los que se transporta agua, actuando como intercambiadores de calor. El agua caliente puede ser usada para disminuir el consumo energético, por ejemplo, en edificaciones.

Smith et al. (2017) presentan una revisión de los sistemas de recuperación de calor de sistemas de compostaje. Los autores reportan que sistemas a nivel laboratorio tienen una tasa de recuperación de calor de 1895 kJ h<sup>-1</sup> (1159 kJ kg<sup>-1</sup> composta seca), 20035 kJ h<sup>-1</sup> (4302 kJ kg<sup>-1</sup> composta seca) para sistemas a escala piloto y 204907 kJ h<sup>-1</sup> (7084 kJ kg<sup>-1</sup> composta seca) para sistemas comerciales. En el caso del biofiltro de composta, la tasa de recuperación de calor podría estar en el orden de magnitud de los sistemas a escala laboratorio (1264.8 kJ h<sup>-1</sup> para la concentración de 8% CH<sub>4</sub>). Sin embargo, aún hace falta investigación y desarrollo para definir la eficiencia de los posibles intercambiadores de calor y sistemas de recuperación.

Dentro del alcance de este trabajo no se contempla un diseño del sistema de remoción de calor, sólo se presentan algunas opciones para ello, en forma conceptual. En ese sentido, la ubicación de los intercambiadores se realiza con base en los resultados del monitoreo de temperatura al interior del biofiltro y su efectividad se evalúa mediante simulaciones con el modelo de Gómez-Borraz et al. (2021), calibrado para este estudio.

En la Figura 4.34 se representa la ubicación de los intercambiadores de calor que se proponen a nivel transversal y radial. La primera posición consiste en un sistema ubicado a 0.30 m de la entrada del gas, que permite transferir calor con mayor velocidad en esta zona. La distancia de 0.30 m se consideró como la adecuada según la temperatura registrada al interior del biofiltro. Como se comentó en la sección 4.4, los niveles 2 y 3, ubicados a 0.15 m y 0.35 m, respectivamente, fueron los niveles que mayor temperatura registraron durante las etapas 2 y 3. En el caso de la etapa 4, adicional a los niveles 2 y 3 que registraron temperaturas en el centro de 58°C y 67°C, respectivamente, el nivel 4 también fue uno de los niveles con mayor temperatura, registrando 61°C en el centro.

Respecto a los intercambiadores radiales, son sistemas ubicados en el centro del biofiltro y en un radio a 0.21 m del centro. La zona central del biofiltro, por su distancia de las paredes y menor velocidad para transferir calor, fue la zona que mayor temperatura registró en todo el experimento. Una simulación preliminar mostró que un solo intercambiador de calor ubicado en el centro no representó una mejoría en la ER, razón por la cual, se consideró colocar otro intercambiador a la mitad del radio.

En la Figura 4.34 se representa con líneas de trazos rojos la posición de los intercambiadores de calor. En la simulación en Comsol del modelo de Gómez-Borraz et al. (2021), estas líneas punteadas se van a denominar líneas de contorno y se les asignan propiedades de

transferencia de calor, las cuales pueden ser: que el contorno tenga una temperatura que varíe de acuerdo a la temperatura ambiental o que se mantenga a una temperatura fija. Como se mostrará más adelante, se realizaron curvas de ER vs altura del biofiltro para mostrar como varía la ER de acuerdo a la temperatura que tenga el contorno.

Adicional, en la Figura 4.34 se muestra que en el caso del intercambiador axial, este sería como hacer un corte en el biofiltro lo que representaría una interrupción en el flujo de gas. A nivel de diseño detallado e implementación, este intercambiador requiere mayor investigación y desarrollo. En el caso de los intercambiadores radiales, su implementación podría ser más fácil porque podrían ser tubos dentro del biofiltro y alrededor se colocará la composta. Se debe evaluar el material de los tubos y cómo se pasa el fluido a través de estos. Para los intercambiadores radiales podría considerarse la instalación de una lámina de algún material metálico.

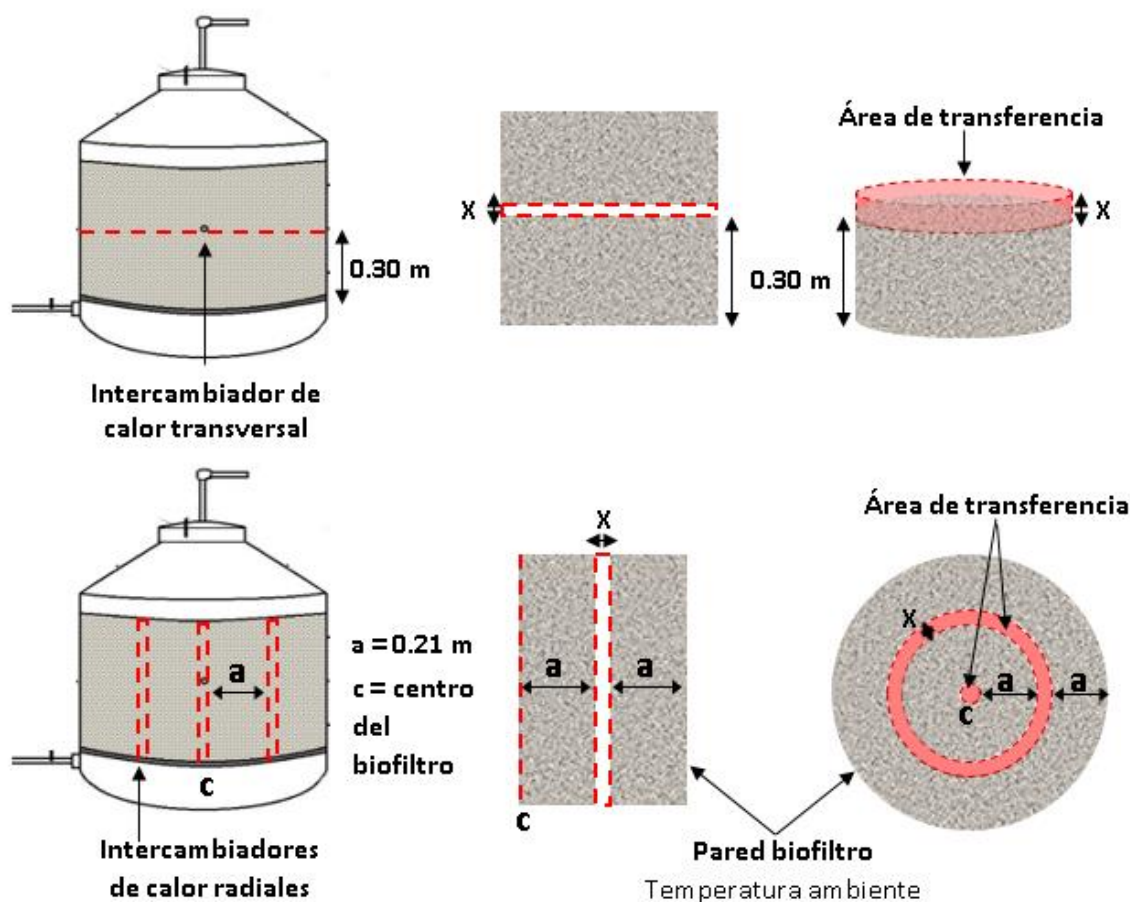


Figura 4.34 Propuesta de ubicación de intercambiadores de calor para el biofiltro a nivel transversal y radial

Es pertinente indicar que el grosor de las líneas de trazos rojos, así como la distancia representada con la variable  $x$  en la Figura 4.34 es una representación de los intercambiadores y no necesariamente representa las dimensiones (espesor) de los mismos. Para un dimensionamiento de los intercambiadores se requiere de un diseño de ingeniería que no está dentro de los alcances de este trabajo de investigación.

El modelo de Gómez-Borraz et al. (2021) permite hacer la simulación de la variación de la temperatura, concentración de metano y fuente de calor. Las zonas de fuente de calor, se pueden interpretar como las zonas donde se está llevado a cabo la oxidación del  $\text{CH}_4$  y donde se genera el calor producto del metabolismo, que posteriormente se transporta dentro del biofiltro. Como se podrá observar en la Figura 4.35b la zona de mayor generación de calor no corresponde a la zona de mayor temperatura. El calor se transporta por conducción (pared) y convección (zona más alta), provocando el incremento de temperatura en el centro y capas superiores, donde se inhibe la actividad metabólica. Para la simulación de los intercambiadores de calor se consideró el escenario más demandante, el de una concentración de  $\text{CH}_4$  a la entrada de 8%.

En la Figura 4.35a se muestra la temperatura interna del biofiltro en los tres arreglos: sin intercambiador de calor, con un intercambiador de calor axial y cuando se simulan dos intercambiadores radiales. Las simulaciones de los intercambiadores (axial y radial) consideran que la temperatura del fluido que pasa a través de ellos tiene la temperatura ambiente. La simulación sin intercambiador de calor, representa la condición bajo la cual operó el biofiltro durante esta experimentación. Como se observa en la Figura 4.35a, la zona de mayor temperatura es el centro entre una altura de 0.2 m a 0.50 m con respecto a la entrada del gas. En la simulación esta zona tiene una temperatura entre los  $55^\circ\text{C}$  a  $61^\circ\text{C}$ .

Respecto a la variación de la temperatura cuando hay un intercambiador de calor transversal y dentro de este existe un fluido cuya temperatura varía con la temperatura ambiente, se puede observar en la Figura 4.35a que la temperatura máxima sería  $51^\circ\text{C}$  y se presentarían dos zonas. La inferior se sitúa a los 0.15 m con efectos a 0.1 m por arriba y por debajo de ese nivel, extendida radialmente hasta los 0.075 m antes de llegar a la pared. En el caso de la segunda zona, no se presentaría acumulación de calor. Si la temperatura del intercambiador fuera constante (fluido con temperatura de  $30^\circ\text{C}$ ), también se presentarían dos zonas, pero a diferencia de variar con la temperatura ambiente, la zona superior si presentaría acumulación de calor (Anexo D).

La condición de dos intercambiadores radiales es la que representa una mayor reducción de la temperatura (Figura 4.35a). La simulación muestra que la temperatura máxima sería  $45^\circ\text{C}$  y se presentarían dos zonas de mayor temperatura. A diferencia de la condición de un intercambiador de calor transversal, con dos intercambiadores ubicados a distintos radios, el calor se concentraría a 0.1 m y 0.35 m del centro y se extendería aproximadamente hasta los 0.30 m de altura en la zona caliente más cercana a la pared, y a 0.25 m en la zona más central. En el caso que el fluido en el intercambiador tenga una temperatura constante

(30°C), la zona de acumulación de calor variará en la altura, con un incremento de alrededor de 0.1 m (Anexo D).

Respecto a las zonas activas del biofiltro, en la Figura 4.35b se presenta la fuente de calor metabólico. Al permitir que el calor sea retirado con mayor velocidad se permite que mayor volumen del biofiltro cuente con las condiciones adecuadas para los microorganismos metanótrofos, lo que incrementará la CE y la ER del sistema. Es evidente que la introducción de sistemas intercambiadores favorece el surgimiento de zonas activas en las inmediaciones de la superficie de intercambio y, por lo tanto, reducen el volumen de medio filtrante inactivo que se presenta en el diseño original.

Finalmente, dentro de los resultados de la simulación se presenta la variación de la concentración de CH<sub>4</sub> al instalar intercambiadores de calor. En la Figura 4.35c se puede observar que al permitir que el biofiltro reduzca su temperatura y en concordancia con la simulación de fuente de calor metabólico, se va a requerir una menor altura en el biofiltro para reducir la concentración de CH<sub>4</sub> a los niveles deseados.

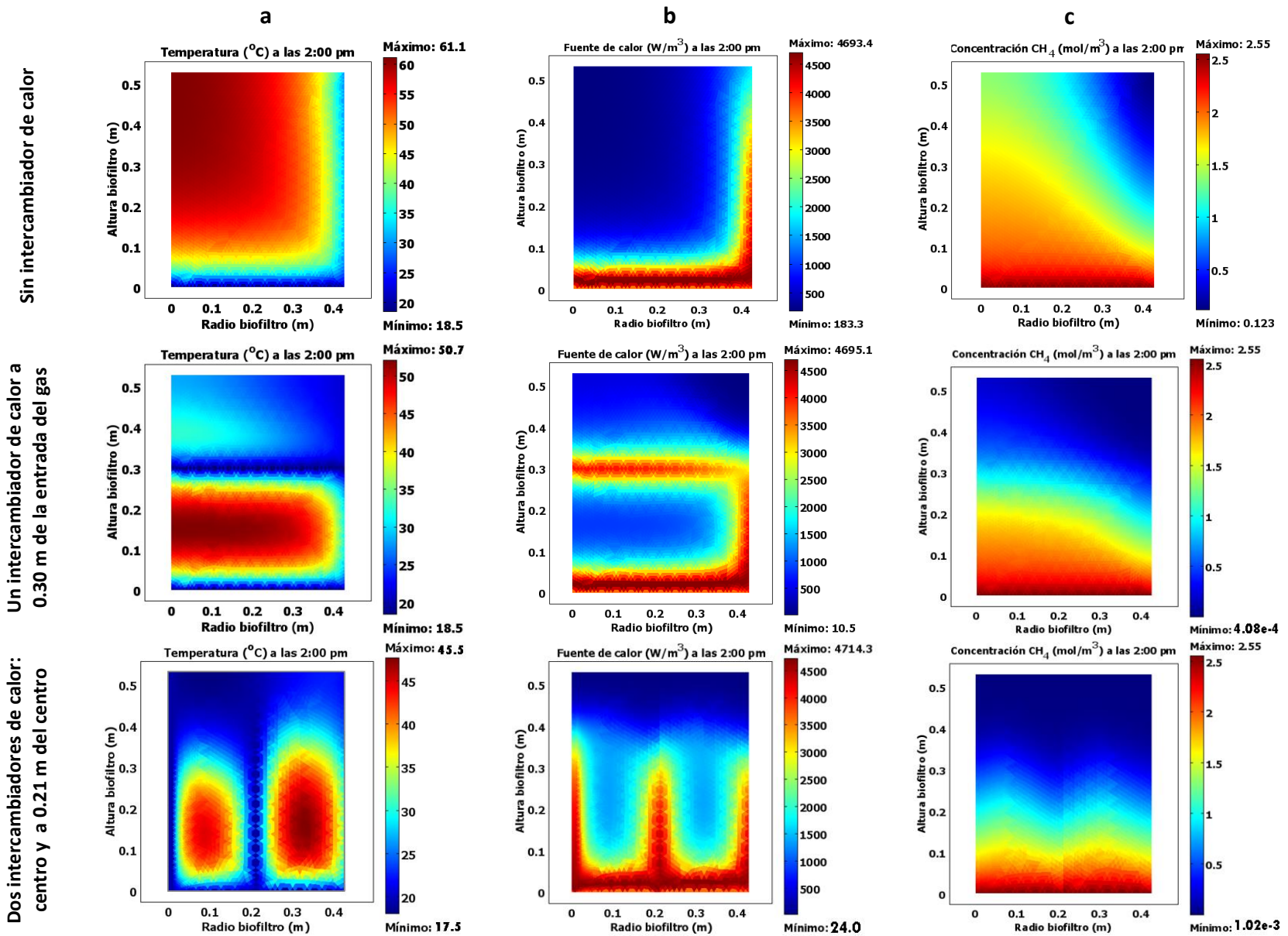


Figura 4.35 Simulación de la variación de temperatura, fuente de calor metabólico y concentración de metano según el número y la ubicación de intercambiadores de calor (transversal y radial). Fluido con temperatura ambiente a través de los intercambiadores de calor.

Como se indicó en la sección 3.3, en la metodología de las simulaciones, se consideraron escenarios con temperatura en el intercambiador variable en función de la temperatura ambiental o constante de 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C y 60°C. Las últimas tres temperaturas evaluadas se simularon como método de verificación de los datos obtenidos al comprobar si los resultados eran coherentes con lo que se observó a nivel experimental. En la Figura 4.36 se presenta la ER a diferentes alturas cuando se tiene un intercambiador de calor transversal. La ER es similar hasta los 0.1 m de altura, luego comienza a aumentar para los casos con una menor temperatura a través del intercambiador. Un intercambiador de calor transversal permitiría aumentar la eficiencia de remoción conforme se incrementa la altura de biofiltro o bien, alcanzar una ER dada con un biofiltro de menor altura. A una concentración de 8% CH<sub>4</sub> y altura aproximadamente de 0.25 m se obtiene una ER de 75% con un intercambiador que tenga un fluido con temperatura ambiente o inferior, la cual es similar a la obtenida experimentalmente a una altura de biofiltro de 0.53 m sin intercambiador.

En la Figura 4.36 es importante resaltar el cambio de pendiente de la curva de ER en función de la altura, después del nivel en el que se instala el intercambiador de calor transversal. Este cambio de pendiente se identifica particularmente cuando la temperatura del fluido que pasa a través del intercambiador es de 50°C o 60°C, a pesar de ser temperaturas elevadas que no generan un gradiente de temperatura grande, aun así, permiten una transferencia de calor, recordando que al interior del biofiltro en la condición de 8% CH<sub>4</sub> se registraron temperaturas en el centro del nivel 2 (a 0.15m de la entrada) de 58°C y en el centro del nivel 3 (a 0.35 m) de 67°C.

En el caso de dos intercambiadores de calor radiales, en la Figura 4.37 se puede observar que a diferencia de un intercambiador axial, las curvas de ER vs altura, se van a separar desde el inicio, comportamiento previsto, ya que los intercambiadores de calor radiales afectan toda la altura del biofiltro, además de contar con mayor área de transferencia. De acuerdo a los resultados de la simulación, con dos intercambiadores de calor se conseguiría una ER de 75% a una altura de 0.20 m, cuando la temperatura del fluido del intercambiador es menor a 30°C.

La ER obtenida sin intercambiador de calor es inferior al 75% y se requiere del total de la altura del lecho (0.53 m) para alcanzar esta eficiencia de remoción. Para condiciones en que el fluido del intercambiador tiene una temperatura extrema de 60°C, la cual en la práctica no se usaría, pero para fines ilustrativos se usó en la simulación, se observa que la ER es inferior a la obtenida sin intercambiador, esto se debe a que el intercambiador calienta las zonas activas que corresponden a los niveles inferiores (entre 0.05 y 0.15 m de la entrada) donde la temperatura oscilaba entre los 31°C a 58°C (sección 4.4.3 Tabla 4.10).



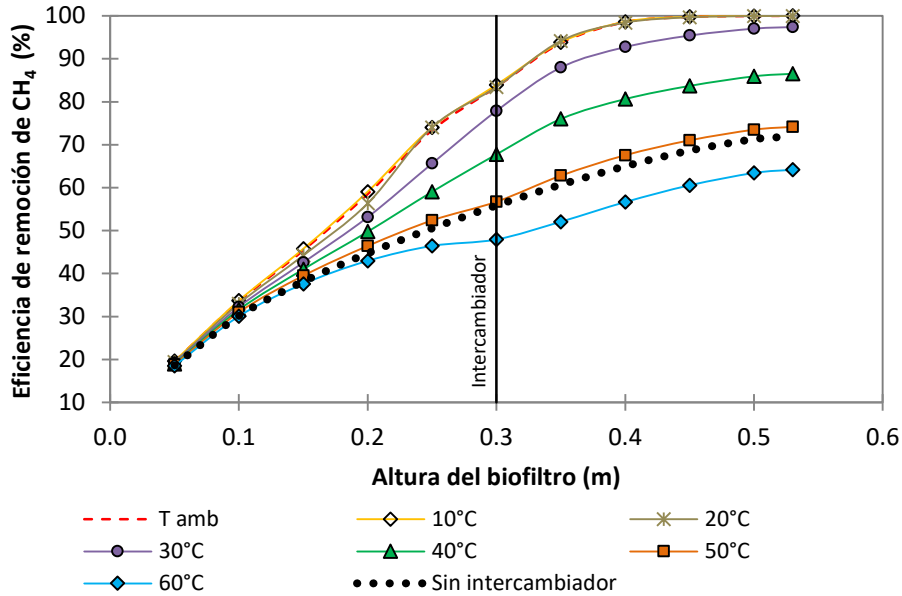


Figura 4.36 Curvas de eficiencia de remoción de  $CH_4$  vs la altura del biofiltro para diferentes temperaturas en el intercambiador de calor transversal. Concentración de 8%  $CH_4$  a la entrada.

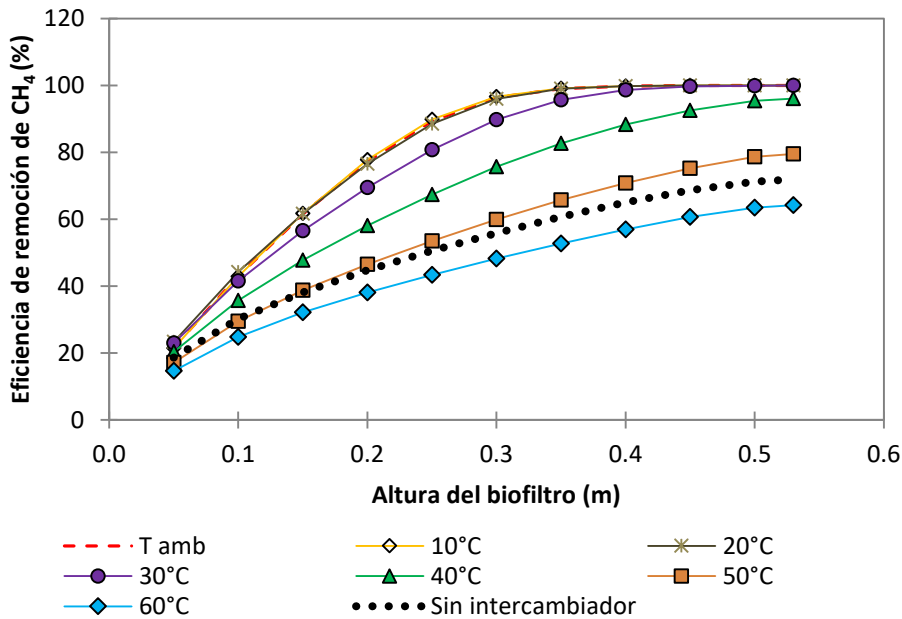


Figura 4.37 Curvas de eficiencia de remoción de  $CH_4$  vs la altura del biofiltro para diferentes temperaturas en los intercambiadores radiales. Concentración de 8%  $CH_4$  a la entrada.

Como se puede observar en las Figura 4.36 y Figura 4.37, la ER se puede aumentar a medida que hay un mayor gradiente de temperatura entre los intercambiadores de calor y el biofiltro. Respecto a la ubicación y número de los intercambiadores y la ER, se identifica que intercambiadores radiales permiten obtener una ER de 100% a una menor altura del lecho filtrante. El criterio de selección entre un intercambiador transversal y los radiales podría basarse en la facilidad de construcción e implementación.

## CONCLUSIONES

Se operó un biofiltro de composta y se alimentó con tres cargas de metano. Se evaluó su capacidad de eliminación y se realizó un monitoreo detallado de la variación de la temperatura interna a diferentes niveles de altura y distancia radial. Adicional a las pruebas experimentales, se realizó la calibración y validación de un modelo de biofiltración de metano y se simuló el efecto del uso de intercambiadores de calor sobre la eficiencia de remoción.

Las etapas experimentales de este trabajo permitieron identificar procesos relacionados con la capacidad de eliminación del sistema y la variación de la temperatura interna. La primera evidencia de eliminación de CH<sub>4</sub> se registró dos días después de iniciar la alimentación de metano (etapa 2) con una CA de 26.2 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> (2% CH<sub>4</sub>, TRLV 23 min). Durante solo 2 horas, la ER pasó de 0% a 14.3%, para posteriormente regresar a su valor anterior (nulo) durante los siguientes 4 días. Este aumento inicial de la ER no produjo un incremento de la temperatura, sin embargo, puede considerarse una manifestación del inicio de la activación de la biomasa que se prepara metabólicamente para las nuevas condiciones de alimentación. Cuatro días después de ese incremento puntual, la ER presentó un claro aumento pasando de 5% a 18%, para alcanzar el 100% al día siguiente. La temperatura interna máxima del biofiltro durante la etapa 2 pasó de 12°C a 51°C.

Las etapas 3 y 4 permitieron registrar la temperatura alcanzada al tratar altas concentraciones de CH<sub>4</sub>, por encima del 3.7% y hasta el 8.4% (CA de 51.4 ± 2.0 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> a 102.6 ± 5.7 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>) con un TRLV de 23 min, condiciones que no son habituales en las investigaciones publicadas. Durante la etapa 3 la temperatura interna del biofiltro estuvo entre los 32°C hasta los 66°C, con una ER de 97.5 ± 1.7%. La máxima temperatura alcanzada por el sistema fue de 67°C y se registró durante la etapa 4, la cual tuvo en promedio una ER de 73 ± 8.7%.

Salvo la zona de pared, la temperatura registrada en el interior del biofiltro estuvo mayormente por encima del rango de la temperatura considerada como óptima para microorganismos metanótrofos (20°C a 35°C), particularmente en las etapas 3 y 4. Sin embargo, las eficiencias de remoción obtenidas son comparables y superiores a las reportadas en otros trabajos de investigación. La eficiencia de remoción alcanzada bajo estas condiciones permite suponer que en el sistema de biofiltración había presencia de microorganismos metanótrofos termófilos.

La distribución de los sensores de temperatura instalados al interior del biofiltro permitió determinar el perfil de distribución de temperatura para las tres concentraciones de metano evaluadas. El centro del biofiltro fue la zona de mayor temperatura durante todas las etapas de experimentación. Las zonas cercanas a las paredes presentaron mayor facilidad de transferencia de calor debido al gradiente de temperatura que permite un

enfriamiento cuando  $T_{\text{ambiente}} < T_{\text{biofiltro}}$ , lo que sucede durante la noche y en las primeras horas de la mañana. A nivel axial, conforme es mayor la concentración de  $\text{CH}_4$  se presenta acumulación de calor desde la mitad de la altura del lecho filtrante ascendiendo hasta el nivel superior. En los niveles cercanos a la entrada y salida del gas el incremento de temperatura es menor debido a la influencia de la temperatura ambiente. La temperatura ambiental, si bien puede incidir en la temperatura interna del biofiltro está lejos de ser representativa de la temperatura interna del biofiltro.

La elevada temperatura registrada en el centro del biofiltro ( $33^\circ$  a  $67^\circ\text{C}$ ) hace suponer que esta zona no aporta a la CE del sistema a partir de que rebasa los  $40^\circ\text{C}$ . La zona central del biofiltro se consideraría como un sistema relativamente aislado térmicamente del exterior, donde el calor generado en la zona inferior (entrada) del biofiltro se transporta principalmente por convección en sentido axial, con menor aportación por conducción en sentido radial. Debido al intercambio de calor a través de la pared del biofiltro, la composta en esa zona presenta una mayor fluctuación de temperatura a lo largo del día, alternando la aparición de zonas activas y zonas de baja actividad metabólica en función de las diferentes horas del día.

Por medio de un modelo de biofiltración de metano que considera los procesos de generación de calor producto de la oxidación de metano, la radiación solar sobre el biofiltro, procesos difusivos de los gases y propiedades del medio filtrante, se propuso un arreglo para controlar la acumulación excesiva de calor al interior de un biofiltro de composta, lo que permitiría aumentar su capacidad de eliminación. Permitir la transferencia de calor por medio de intercambiadores ubicados a distintas distancias radiales podría aumentar la capacidad de eliminación para concentraciones de 8% de  $\text{CH}_4$  y reducir la altura del lecho filtrante hasta un 50%. La introducción de sistemas de intercambio de calor reduce el volumen de medio filtrante inactivo que se presenta en el diseño original al permitir el surgimiento de zonas activas en las inmediaciones de la superficie del intercambiador.

Un estudio con mayor detalle sobre balances de agua que consideren la dinámica de suministro, condensación, evaporación y generación de agua que se lleva a cabo durante la operación de un biofiltro permitiría una mayor comprensión del proceso. De manera general en el desarrollo de modelos de biofiltración de  $\text{CH}_4$  se considera despreciable el agua producida durante la oxidación. Respecto a la cantidad de agua producto de la oxidación de  $\text{CH}_4$  en esta investigación, representó el 9.7% del total de agua que entra al sistema, siendo del mismo orden de magnitud (12%) a la del ingreso de agua en el gas saturado a su paso por las columnas humidificadoras. Es evidente que el agua producida dentro del sistema contribuye a mantener la humedad de la composta y debe ser considerada en el desarrollo de modelos de biofiltración.

## RECOMENDACIONES

Para lograr la operación confiable de los sistemas de biofiltración con composta y su adecuado control del proceso se recomienda profundizar en investigaciones referentes a los siguientes aspectos:

- Desarrollar un modelo de biofiltración de metano que incluya el balance dinámico del agua y asociarlo con la variación en el tiempo de las propiedades del lecho filtrante, en particular su grado de saturación de agua y conductividad térmica.
- Diseño e implementación de sistemas de intercambiadores de calor para biofiltros de composta, efectivos y de fácil instalación y mantenimiento.
- Desarrollar un sistema en tiempo real de monitoreo y control basado en la temperatura en el interior del biofiltro, que simplifique el procedimiento convencional de medición de concentración de gases en la salida.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abichou T., Mahieu K., Chanton J., Romdhane M., Mansouri I. (2011) Scaling methane oxidation: From laboratory incubation experiments to landfill cover field conditions. *Waste Management* 31:978-986.
- Agnew J.M., Leonard J.J. (2003) The physical properties of compost. *Compost Science and utilization* 11:238-264.
- Ahn H. K., Sauer T. J., Richard T. L., Glanville T. D. (2009) Determination of thermal properties of composting bulking materials. *Bioresource Technology* 100:3974-3981.
- AlSayed A., Fergala A., Khattab S., Eldyasti A. (2018) Kinetics of type I methanotrophs mixed culture enriched from waste activated sludge. *Biochemical Engineering Journal* 132:60-67.
- Amodeo C., Masi S., van Hulle S. W. H., Zirpoli P., Mancini I. M., Caniani D. (2015) Methane oxidation in a biofilter (Part 1): Development of a mathematical model for designing and optimization. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 50:1339-1403.
- Bian R., Xin D., Chai X. (2018) A Simulation model for estimating methane oxidation and emission from landfill cover soils. *Waste Management* 77:426-434.
- Bian R., Chen J., Li W., Sun Y., Chai X., Wang H., Wang Y., Zhao J. (2021) Numerical modeling of methane oxidation and emission from landfill cover soil coupling water- heat- gas transfer: Effects of meteorological factors. *Process Safety and Environmental Protection* 146:647-655.
- Blakemore L. C., Searle P. L., Daly B. K. (1987) *Methods for chemical analysis of soils*. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 80. NZ Soils Bureau, Lower Hutt.
- Bonilla Blancas W., Mora M., Revah S., Baeza J. A., Lafuente J., Gamisans X., Gabriel D., González Sánchez A. (2015) Application of a novel respirometric methodology to characterize mass transfer and activity of H<sub>2</sub>S-oxidizing biofilms in biotrickling filter beds. *Biochemical Engineering Journal* 99:24-34.
- Bordoloi A., Gostomski P. A. (2019) Fate of degraded pollutants in waste gas biofiltration: An overview of carbon end-points. *Biotechnology Advances* 37:579-588.
- Brandt E., Duarte F., Vieira J. P., Melo V., Souza C., Araújo J., Chernicharo C. A. (2016) The use of novel packing material for improving methane oxidation in biofilters. *Journal of Environmental Management* 182:412-420.
- Calle Arroyo C., López Fidalgo J., Rodríguez Aragón L. J. (2021) Optimal designs for Antoine Equation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 214:104334.

Cárdenas González B., Revah Moiseev S., Hernández Jiménez S., Martine Sánchez A., Gutierrez Avedoy V. (2003) Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas. INE-SEMARNAT.

Centeno Mora E., Fonseca P., Lemker W., Freire E., Sousa C., Lemos Chernicharo C. (2020) Mitigation of diffuse CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>S emissions from the liquid phase of UASB-based sewage treatment plants: challenges, techniques, and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research* 27:35979-35992.

Chandrakanthi M., Mehrotra A. K., Hettiaratchi J. P. A. (2005) Thermal conductivity of leaf compost used in biofilters: An experimental and theoretical investigation. *Environmental Pollution* 136: 167-174.

Dalpaz R., Konrad O., da Silva Cyrne C. C., Panis Barzotto H., Hasan C., Guerini Filho M. (2020) Using biogas for energy cogeneration: An analysis of electric and thermal energy generation from agro-industrial waste. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 40:100774.

Desai P. P., Schmueser I., Mackenzie Dover C. M., Underwood I., Cockell C. S. (2021) Development of a compact water activity sensor system for planetary exploration. *Planetary and Space Science* 195:105132.

Duan Z., Reinbach Hansen P. O., Scheutz C., Kjeldsen P. (2021) Mitigation of methane and trace gas emissions through a large-scale active biofilter system at Glatved landfill, Denmark. *Waste Management* 126:367-376.

Farrokhzadeh H., Hettiaratchi P., Jayasinghe P., Kumar S. (2017) Aerated biofilters with multiple-level air injection configurations to enhance biological treatment of methane emissions. *Bioresource Technology* 239:219-225.

Fedrizzi F., Cabana H., Ndanga É. M., Cabral A. R. (2018) Biofiltration of methane from cow barns: Effects of climatic conditions and packing bed media acclimatization. *Waste Management* 78:669-676.

Fischedick M., J. Roy, A. Abdel-Aziz, A. Acquaye, J.M. Allwood, J.-P. Ceron, Y. Geng, H. Kheshgi, A. Lanza, D. Perczyk, L. Price, E. Santalla, C. Sheinbaum, and K. Tanaka. (2014) Industry in: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC)*.

Fjelsted L., Scheutz C., Christensen A. G., Larsen J. E., Kjeldsen P. (2020) Biofiltration of diluted landfill gas in an active loaded open-bed compost filter. *Waste Management* 103:1-11.

Gómez-Borraz T. (2017) Biofiltración de metano para el control de las emisiones generadas en reactores anaerobios municipales. Tesis de Doctorado Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez-Borraz T., González Sánchez A., Bonillas Blancas W., Revah S., Noyola A. (2017) Characterization of the biofiltration of methane emissions from municipal anaerobic effluents. *Process Biochemistry* 63: 204-213.

Gómez-Borraz T., González Sánchez A., Cabello J., Noyola A. (sometido 2021) Model assessment on the non-isothermal methane biofiltration at ambient conditions. *Process Safety and Environmental Protection*.

Gómez Cuervo S., Hernández J., Omil F. (2016) Identifying the limitations of conventional biofiltration of diffuse methane emissions at long-term operation. *Environmental Technology* 37: 1947-1958.

Haubrichs R., Widmann R. (2006). Evaluation of aerated biofilter systems for microbial methane oxidation of poor landfill gas. *Waste Manage*, 26: 408-416.

Hernandez J., Gómez-Cuervo S., Omil F. (2015) SPE and SMP as stability Indicators during the biofiltration of diffuse methane emissions. *Water Air Soil Pollution* 226-343.

Hettiarachchi V., Hettiaratchi P., Mehrotra A., Kumar S. (2011) Field-scale operation of methane biofiltration systems to mitigate point source methane emissions. *Environmental Pollution* 159:1715-1720.

Huete Chevez A. (2017) Eliminación biológica de metano y sulfuro de hidrogeno provenientes del tratamiento anaerobio de agua residual municipal. Tesis de Maestría Universidad Nacional Autónoma de México.

Huete A., de los Cobos D., Gómez Borraz T., Morgan Sagastume J.M. (2018) Control of dissolved CH<sub>4</sub> in a municipal UASB reactor effluent by means of a desorption e Biofiltration arrangement. *Journal of Environmental Management* 216:383-391.

Iwabuchi K., Kimura T., Otten L. (1999) Efect of volumetric water content on thermal properties of dairy cattle feces mixed with sawdust. *Bioresource Technology* 70:293-297.

Jäckel U., Thummes K., Kämpfer P. (2005) Thermophilic methane production and oxidation in compost. *FEMS Microbiology Ecology* 52:175-184.

Jawad J., Khalil M. j., Sengar A. K., Zaidi S. J. (2021) Experimental analysis and modeling of the methane degradation in a three stage biofilter using composted sawdust as packing media. *Journal of Environmental Management* 286:112214.

Kern D. Q. (1992) Procesos de transferencia de calor. Compañía editorial continental, S.A. de C.V. México. Edición Vigésimocuarta Capitulo 2: Conducción, pag:19-41.

Khabiri B., Ferdowsi M., Buelna G., Jones J. P., Heitz M. (2020) Methane biofiltration under different strategies of nutrient solution addition. *Atmospheric Pollution Research* 11:85-93.

Khabiri B., Ferdowsi M., Buelna G., Jones J. P., Heitz M. (2021) Bioelimination of low methane concentrations emitted from wastewater treatment plants: a review. *Critical Reviews in Biotechnology* DOI: 10.1080/07388551.2021.1940830.

Klejment E., Rosinsk M. (2008) Testing of thermal properties of compost from municipal waste with a view to using it as a renewable, low temperature heat source. *Bioresource Technology* 99:8850-8855.

Kundu S., Zanganeh J., Moghtaderi B. (2016) A review on understanding explosions from methane-air mixture. *Journal of loss prevention in the process industries* 40:507-523.

La H., Hettiaratchi J. P. A., Achari G., Dunfield P. F. (2018) Biofiltration of methane: A Review. *Bioresource Technology* 268:759-772.

Large P.J. (1983) The biology and ecology of micro-organisms metabolizing C1 compounds. In: *Methylotrophy and Methanogenesis*. Springer Online ISBN 978-94-009-3169-5.

Lobo Oehmichen R. A. (2007) Principios de transferencia de masa. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa Segunda Edición.

Lorenzo Toja Y., Alfonsín C., Amores M. J., Aldea X., Marin D., Moreira M. T., Feijoo G. (2016) Beyond the conventional life cycle inventory in wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment* 553:71-82.

Malesani R., Pivato A., Bocchi S., Lavagnolo M. C., Muraro S., Schievano A. (2021) Compost Heat Recovery Systems: An alternative to produce renewable heat and promoting ecosystem services. *Environmental Challenges* 4:100131

Mancebo U., Hettiaratchi P. (2015) Rapid assessment of methanotrophic capacity of compost-bases materials considering the effects of air-filled porosity, water content and dissolved organic carbon. *Bioresource Technology* 177:125-133. Masters G., Ela W. (2008) *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Perason Tercera edición.

Matsuura N., Hatamoto M., Sumino H., Syutsubo K., Yamaguchi T., Ohashi A. (2014) Recovery and biological oxidation of dissolved methane in effluent from UASB treatment of municipal sewage using a two-stage closed downflow hanging sponge system. *Journal of Environmental Management* 151:200-209.

Malesani R., Pivato A., Bocchi S., Lavagnolo M. C., Murano S., Schievano A. (2021) Compost heat recovery systems: An alternative to produce renewable heat and promoting ecosystem services. *Environmental Challenges* 4:100131.

Morales M. (1999) Estudio sobre la operación y modelado de biofiltro para eliminación de vapores de tolueno. Tesis de Doctorado Universidad Autónoma Metropolitana.



Morales M., Hernandez S., Cornabé T., Revah S., Auria R. (2003) Effect of drying on biofilter performance: Modeling and experimental approach. *Environmental Science and Technology* 37:985-992.

Morgan – Sagastume J.M., Revah S., Noyola A. (2003) Pressure drop and gas distribution in compost based biofilters: Medium mixing and composition effects. *Environmental Technology* 24:797-807.

Morgan – Sagastume J.M., Noyola A. (2006) Hydrogen sulfide removal by compost biofiltration: Effect of mixing the filter media on operational factors. *Bioresource Technology* 97:1546-1553.

Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang (2013) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

Ng C.W.W., Feng S., Lui H.W. (2015) A fully coupled model for water-gas-heat reactive transport with methane oxidation in landfill covers. *Science of the Total Environment* 508:307-319.

Nguyen T. K. L., Ngo H. H., Guo W., Chang S. W., Nguyen D. D., Nghiem L. D., Liu Y., Ni B., Hai F. I. (2019) Insight into greenhouse gases emissions from the two popular treatment technologies in municipal wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment* 671:1302-1313.

Nikiema J., Bibeau L., Lavoie J., Brzezinski R., Vigneux J., Heitz M. (2005) Biofiltration of methane: An experimental study. *Chemical Engineering Journal* 111-117.

Noyola A., Morgan – Sagastume J.M., López-Hernández J. E. (2006) Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 5:93–114.

Noyola A., Paredes G., Morgan – Sagastume J.M., Guereca L.P. (2016) Reduction of greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment in Mexico based on technology selection. *Clean – Soil, Air, Water* 44:1085-1098.

Pawlowska M., Rozej A., Stepniewski W. (2011) The effect of bed properties on methane removal in an aerated biofilter – Model studies. *Waste Management* 31:903-913.

Pratt C., Walcroft A. S., Tate K. R., Ross Des J., Roy R., Hills Reid M., Veiga P. W. (2012) Biofiltration of methane emissions from a dairy farm effluent pond. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 152:33-39.

Poling B. E., O'Connell J., Prausnitz M. (2000) Properties of gases and liquids. McGraw-Hill Professional Publishing. ProQuest Ebook Central, Quinta edición pagina 229-233 y 765-778.

Quemada Villagómez L. I., Miranda López R., Calderón Ramírez M., Navarrete Bolaños J. L., Martínez González G. M., Jiménez Islas H. (2021) A simple and accurate mathematical model for estimating maximum and minimum daily environmental temperatures in a year. *Building and Environment* 192: 107822

Ramos P. (2021) Dinámica de la microbiota durante la oxidación de metano y sulfuro de hidrógeno desorbidos de un efluente anaerobio. Tesis de maestría en Ciencias Bioquímicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

Sander R. (2015) Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15:4399-4981.

Scheutz C., Kjeldsen P., Bogner J. E., de Visscher A., Gebert J., Hilger H. A., Huber-Humer M., Spokas K. (2009) Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste management and research* 27:409-455.

Smith M. M., Aber J. D., Rynk R. (2017) Heat recovery from composting: A comprehensive review of system design, recovery rate, and utilization. *Compost Science & Utilization* 51:511-522.

Soreanu G., Dumont É. (2020) From biofiltration to promising options in gaseous fluxes biotreatment. Recent developments, new trends, advances and opportunities. Elsevier ISBN:978-0-12-819064-7.

Spokas K. A., Bogner J. E. (2011) Limits and dynamics of methane oxidation in landfill cover soils. *Waste Management* 31:823-832.

Streese J, Stegmann R. (2003) Microbial oxidation of methane from old landfills in biofilters. *Waste Management* 23:573-580.

Trotsenko Y. A., Khmelenina V. N. (2002) Biology of extremophilic and extremotolerant methanotrophs. *Arch Microbiol* 177:123-131

Veillette M., Girard M., Viens P., Brzezinski R., Heitz M. (2012) Function and limits of biofilters for the removal of methane in exhaust gases from the pig industry. *Appl Microbiol Biotechnol* 94:601-611.

Yoshida H., Monster J., Scheutz C. (2014) Plant-integrated measurement of greenhouse gas emissions from a municipal wastewater treatment plant. *Water Research* 61:108-118.

Waszkielis K. M., Białobrzewski I., Nowak K. W., Dzadz L., Dach J. (2014) Determination of the thermal conductivity of composted material. *Measurement* 58:441-447.

Wilshusen J. H., Hettiaratchi J. P. A, Stein V. B. (2004) Long-term behavior of passively aerated compost methanotrophic biofilter columns. *Waste Management* 24:643-653.

## ANEXOS

### A. Concentración máxima de CH<sub>4</sub>

Para determinar el porcentaje máximo de CH<sub>4</sub> que se podría oxidar biológicamente en un biofiltro usando como única fuente de O<sub>2</sub> la concentración presente en el aire se tiene que:

- En un flujo de aire (F<sub>A</sub>) 21% corresponde a moles de O<sub>2</sub>
- Para oxidar completamente 1 mol de CH<sub>4</sub> se requieren 2 moles de O<sub>2</sub>
- Suponiendo un flujo de mezcla (F<sub>M</sub>) de 1 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> que corresponde a la suma de flujo de aire (F<sub>A</sub>) y flujo de CH<sub>4</sub> (F<sub>CH4</sub>)

$$mol_{O_2} = 0.21 F_A \quad \frac{2 mol_{O_2}}{1 mol_{CH_4}} = 2 = \frac{0.21 F_A}{F_{CH_4}} = \frac{0.21 F_A}{F_M - F_A} \quad F_A = \frac{2 F_M}{2.21}$$

$$F_M = 1 m^3 h^{-1} \quad F_A = 0.904 m^3 h^{-1} \quad F_{CH_4} = 0.095 m^3 h^{-1}$$

$$Máxima [CH_4]_{F_{CH_4}} = \frac{0.095 m^3 h^{-1}}{(0.904 m^3 h^{-1} + 0.095 m^3 h^{-1})} \cdot 100 = 9.5\%$$

### B. Ejemplo de la determinación de relaciones de estequiometría CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> en trabajos de otros autores

Se presentan las gráficas de concentración de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> reportadas en diferentes trabajos de investigación sobre biofiltración de CH<sub>4</sub>, las cuales se utilizaron para determinar las relaciones de estequiometría de CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> presentadas en la sección 4.2.3, Tabla 4.5.

Sobre las gráficas de perfiles de concentración de los tres gases de interés tomadas de otros estudios, se determinaron, mediante relaciones de proporcionalidad, las concentraciones a los niveles (alturas de lecho) deseados (ver Figura C.1 y C.2).

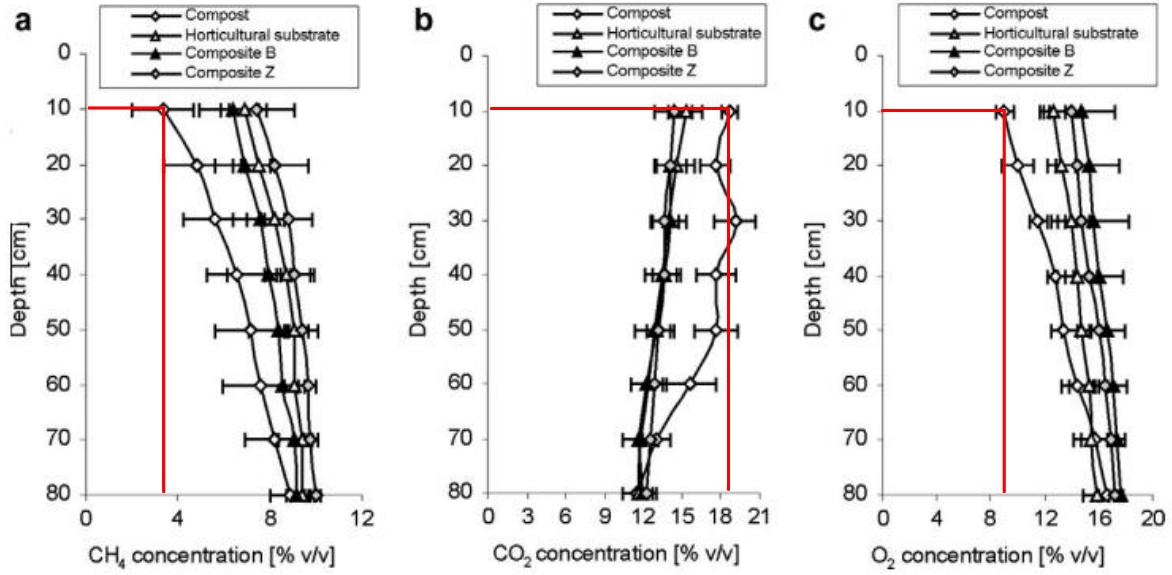


Figura C.1 Perfiles de concentración de  $CH_4$ ,  $CO_2$ , y  $O_2$  en los materiales del lecho filtrante examinados. Valores promedio y desviación estándar calculados sobre la base de las mediciones de los últimos tres meses del trabajo de Pawlowska et al., 2011

Tabla C. 1 Concentración de gases determinadas a partir de la Figura C.1

| Profundidad                | Biofiltro composta (Compost) |            |            |
|----------------------------|------------------------------|------------|------------|
|                            | $CH_4$ (%)                   | $CO_2$ (%) | $O_2$ (%)  |
| 10 m (Salida)              | 3.3                          | 18.7       | 9.2        |
| 80 m (Entrada)             | 8.7                          | 11.8       | 16.4       |
| Relación de estequiometría | $CO_2/CH_4$                  |            | $O_2/CH_4$ |
|                            | 1.2                          |            | 1.3        |

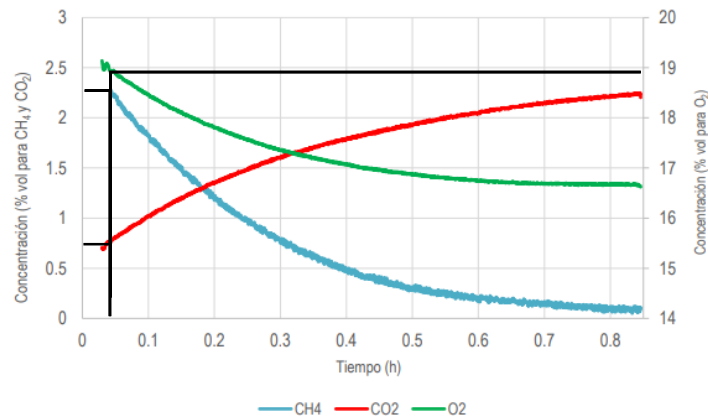


Figura C.2 Resultados obtenidos en una prueba de respirometría (Gómez Borraz, 2017)

Tabla C.2 Concentración de gases determinadas para la Figura C.2

| Tiempo                     | Biofiltro de composta (Ensayo de respirometría) |                     |                                 |
|----------------------------|---|---------------------|---------------------------------|
|                            | CH <sub>4</sub> (%)                             | CO <sub>2</sub> (%) | O <sub>2</sub> (%)              |
| 0.04 h (Inicio)            | 2.2   | 0.8                 | 18.9                            |
| 0.8 h (Fin)                | 0.1   | 2.2                 | 16.7                            |
| Relación de estequiometría | CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>                |                     | O <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> |
|                            | 0.6   |                     | 1.0                             |

### C. Solución del balance de masa de CH<sub>4</sub> en la fase gaseosa

De acuerdo a las consideración expuestas en la sección 4.4.4, la solución de la Ecuación 18 es:

|   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| <p>Tasa de acumulación de CH<sub>4</sub> en la fase gaseosa</p> | <p>Flujo de CH<sub>4</sub> en la corriente de gas de entrada</p> | <p>Flujo de CH<sub>4</sub> en la corriente de gas de salida</p> | <p>Tasa de transferencia de CH<sub>4</sub> de la fase gaseosa a la líquida</p>                |
| $\frac{d[CH_4]}{dt}$  | $= \frac{F \cdot [CH_4]_i}{V_g}$                                 | $- \frac{F \cdot [CH_4]}{V_g}$                                  | $- K_B a \cdot \left( \frac{[CH_4]}{H_{CH_4}} - [C_{LCH_4}] \right) \cdot \frac{V_{LB}}{V_g}$ |
|   | <p>No hay entrada de CH<sub>4</sub></p>                          |   | <p>No hay transferencia de CH<sub>4</sub> entre fases</p>                                     |

Condición inicial:  $t = 0, [CH_4] = [CH_4]_i$

$$\int \frac{d[CH_4]}{[CH_4]_i} = - \frac{F}{V_g} \cdot \int dt$$

$$\frac{d[CH_4]}{dt} = - \frac{F \cdot [CH_4]_i}{V_g}$$

$$\ln[CH_4] = - \frac{F}{V_g} \cdot t + C$$

#### D. Simulación de intercambiadores de calor

Se presenta la temperatura interna del biofiltro, fuente de calor y concentración de  $\text{CH}_4$ , cuando se simulan intercambiadores de calor transversal y radial. Las simulaciones de los intercambiadores consideran que la temperatura del fluido que pasa a través de ellos tiene temperatura constante de  $30^\circ\text{C}$ .

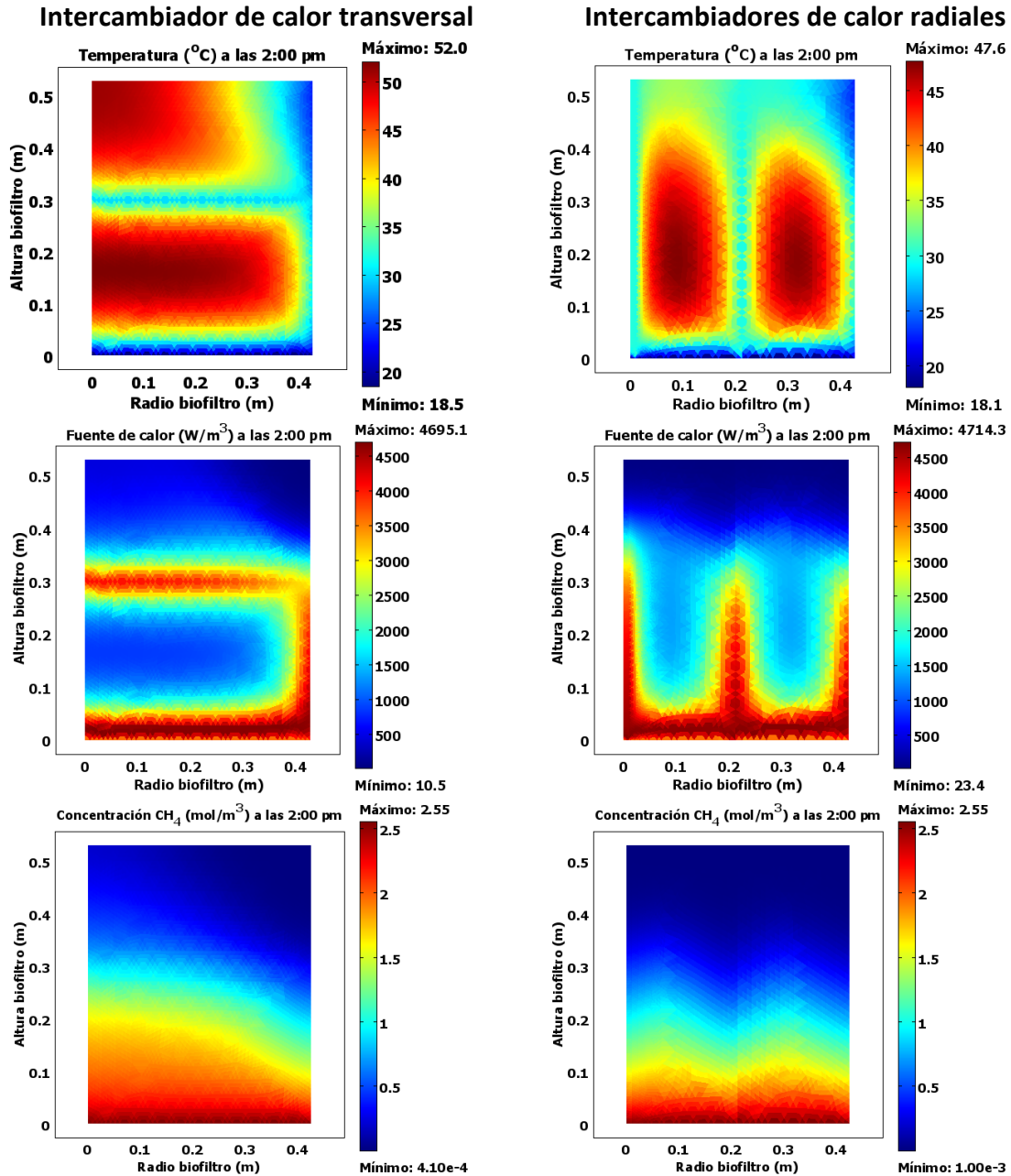


Figura D.3 Resultados de simulación cuando la temperatura del fluido del intercambiador de calor es de  $30^\circ\text{C}$