

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DOCTORADO EN TECNOLOGÍA QUÍMICA



Tema de Tesis:

“Desarrollo y Verificación Experimental de Herramientas de Modelado y Simulación de Procesos de Conversión Biológica de Residuos Sólidos Urbanos”.

Por:

Ing. Ambiental Alejandra Rita PRONO

Santa Fe, septiembre de 2016.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

La presente Tesis Doctoral se presenta como parte de los requisitos exigidos por la Universidad Nacional del Litoral, para optar por el grado académico de

DOCTORA EN TECNOLOGÍA QUÍMICA

Tema:

“Desarrollo y Verificación Experimental de Herramientas de Modelado y Simulación de Procesos de Conversión Biológica de Residuos Sólidos Urbanos”.

Por:

Ing. Ambiental Alejandra Rita PRONO

Realizada en el Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC) y en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral.

**Dirigida por: Dr. Carlos Alberto MARTÍN
Codirigida por: Dra. María Julia MAZZARINO**

Miembros del Jurado:

1) Dra. Francisca LAOS; 2) Dr. César ROSTAGNO y 3) Dr. Miguel ISLA.

Santa Fe, septiembre de 2016.

*Dedico esta tesis especialmente a
mi esposo Mariano y a mis hijas Emilia y Luz,
por acompañarme y ser mi sostén en todo momento.*

Agradecimientos

A mi director el Dr. Carlos A. Martín y mi codirectora la Dra. María Julia Mazzarino, por su guía y consejos en el desarrollo de este trabajo.

A los miembros del Jurado por su interés y participación en la evaluación de la presente Tesis.

A mi familia por el apoyo incondicional, alentarme y acompañarme en todo momento. En especial a mi esposo e hijas, y por supuesto también a mis padres, hermano, abuela y familia política.

A mis compañeras y amigas del doctorado, especialmente a María Belén, Eugenia, Milagros, María Sol, Guadalupe y María Laura.

A todo el personal del Grupo de Fotorreactores, a becarios y profesores del CIMEC, y en términos generales, al personal del Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC) y del Centro Regional de Investigación y Desarrollo (ex CERIDE), por brindar su colaboración en los distintos momentos cuando fue requerida.

Especialmente a Susana Morales (Méd. Veterinaria del Hipódromo Las Flores de Santa Fe), por facilitarme uno de los principales sustratos que estudié en mi Tesis y por toda su colaboración brindada con desinterés.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional del Litoral (UNL) y Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por el apoyo financiero que hicieron posible este trabajo.

Resumen

El compostaje como proceso de conversión biológica aeróbica controlado, es una tecnología muy reconocida y aceptada socialmente para el tratamiento y valorización de los residuos sólidos orgánicos (RSO), que en países como la Argentina constituyen más del 50 % del total generado por la población (SAyDS, 2005), y que por sus características intrínsecas (putrescibles, biodegradables, heterogéneos y con moderado a alto contenido de humedad), en caso de no ser gestionados en forma adecuada, impactan negativamente tanto en la salud pública como en la calidad del medio ambiente. Entre los múltiples beneficios y ventajas que se pueden obtener de aplicar esta técnica, se destacan la reducción másica y volumétrica del material original (entorno al 40 y 60 %, respectivamente), y la generación de un producto estabilizado (compost), inocuo para la salud y para el ambiente que, dependiendo de su calidad, puede emplearse como enmienda orgánica y/o mejorador de las propiedades del suelo, entre otros usos.

Desde el punto de vista ingenieril, el compostaje representa un proceso de extrema complejidad en cuanto al sistema físico, químico y microbiológico involucrado: fenómenos de transferencia de masa (vaporización, condensación del agua) y de energía (transporte de calor por convección, conducción y radiación) acoplados mediante la cinética del proceso, tienen lugar a veces en condiciones de control difusivos desde el punto de vista de la disponibilidad de O_2 . Todos aspectos que, cuando no son considerados, pueden llevar a una gestión inadecuada del sistema con resultados no deseados (producto inmaduro,

anaerobiosis, etc.). En tal sentido, desde hace algunas décadas distintos grupos de investigación vienen desarrollando modelos con diferentes grados de precisión y aproximación, con el fin de generar herramientas de simulación que permitan predecir el comportamiento de los sistemas bajo diferentes condiciones, siendo la técnica de pilas estáticas con aireación forzada la más estudiada.

En esta Tesis, se seleccionó el compostaje de *hileras con volteos manuales* como metodología de aireación, una de las técnicas más utilizadas y a la vez escasamente abordada desde el modelado. Para ello, a partir de “ecuaciones generales” de balance se derivaron un set de “ecuaciones de trabajo” que incluye: balances de materia (BM) integrados en el volumen para dos componentes (sólidos totales y agua), balances de energía térmica (BET) en dos niveles (uno puntual en 1D y otro macroscópico o integrado, cada uno con sus respectivas condiciones iniciales y de contorno necesarias), una cinética de pseudo-primer orden para la degradación del sustrato (planteada en términos de una constante global o aparente k_G , y de la concentración de sólidos totales considerando tanto su porción “reactiva” como la no reactiva, recalcitrante o “de equilibrio”), y una cinética de formación de agua producto de la reacción principal de descomposición. Como aspecto novedoso dentro de la cinética de pseudo-primer orden se incorporó una función semi empírica para el O_2 , que permitió representar el efecto limitante de este componente y la aplicación de los volteos sobre dicha cinética y, con ello, sobre la evolución térmica del proceso.

Debe señalarse que el modelo propuesto al estar intrínsecamente

acoplados los BM y BET, considerando además los dos niveles planteados (puntual e integrado), requirió para su resolución numérica el desarrollo de dos códigos computacionales en lenguaje MatLab 7.0, uno basado en el método de Diferencias Finitas (para el set de ecuaciones que contiene al BET puntual), y otro en el de Runge-Kutta-Felhberg de 4to y 5to orden de precisión (para el del BET integrado). Como variables de salida, además de la evolución temporal promediada en el volumen de la concentración de sólidos totales y del contenido de agua, se obtuvo la temperatura promedio y la distribución espacio-temporal de ésta en el interior de una pila. En forma paralela se diseñó un dispositivo experimental a escala laboratorio, que permitió representar la metodología de hileras con volteos manuales en condiciones semicontroladas, trabajar bajo diferentes configuraciones operativas y de diseño, y obtener a partir de sencillos ensayos datos confiables con los cuáles se estimaron parámetros y se validó experimentalmente el modelo.

Finalmente, las herramientas de simulación validadas generadas en esta Tesis, permiten estudiar del proceso a nivel macroscópico o global los principales fenómenos de transferencia de energía involucrados, así como por ejemplo, con más detalle, conocer la dirección de los flujos de calor, la relevancia que poseen parámetros del modelo como el coeficiente de transmisión pelicular de calor (h_i), la conductividad térmica del sustrato (k_s) y el coeficiente global de transmisión de calor (U) así como las condiciones de contorno del mismo, para la formación de los perfiles de temperatura, el desarrollo térmico de la pila y la identificación de

“hot points” o puntos de mayor temperatura dentro de la masa, aspectos de sumo de interés para resolver problemas de ingeniería y que determinan la eficiencia del proceso y de la calidad del producto obtenido en la práctica.

Índice General

| | |
|---|-----------|
| Desarrollo y Verificación Experimental de Herramientas de Modelado y Simulación de Procesos de Conversión Biológica de Residuos Sólidos Urbanos..... | 1 |
| Agradecimientos..... | 4 |
| Resumen..... | 5 |
| Índice General..... | 9 |
| Índice Figuras..... | 16 |
| Índice Tablas..... | 21 |
| | |
| Capítulo 1: Introducción y Metodología..... | 27 |
| 1.1 La problemática de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) | 28 |
| 1.2 Procesos de conversión biológica | 32 |
| 1.2.1 El compostaje como tema de estudio | 36 |
| 1.3 Aspectos originales de la propuesta de Tesis | 40 |
| 1.4 Objetivos de la Tesis | 42 |
| 1.5 Metodología de trabajo | 43 |
| | |
| Capítulo 2: El Proceso de Compostaje..... | 46 |
| 2.1 Definición y etapas del proceso | 47 |
| 2.2 Características del sistema reaccionante | 53 |
| 2.3 Estequiometría de la reacción | 56 |

| | |
|--|------------|
| 2.4 “Reactivos” y “catalizadores” del proceso | 59 |
| 2.4.1 RSO: clasificaciones y características | 59 |
| 2.4.2 Biomasa activa | 62 |
| 2.5 Parámetros del proceso | 65 |
| 2.6 Importancia de la temperatura dentro del compostaje | 68 |
| 2.7 Producción de compost y usos más frecuentes | 72 |
| 2.8 Aspectos legales sobre RSO y compostaje | 74 |
| Capítulo 3: Revisión del Estado del Arte..... | 79 |
| 3.1 Introducción al modelado del compostaje | 80 |
| 3.2 Validación, análisis de sensibilidad y optimización de los modelos | 82 |
| 3.3 Balances de materia | 85 |
| 3.4 Cinética de degradación del sustrato | 88 |
| 3.5 Balance de Energía Térmica (BET) | 96 |
| 3.5.1 Efectos estudiados sobre la temperatura del sustrato (T) | 98 |
| 3.5.1.1 De la escala de trabajo y la masa crítica inicial | 98 |
| 3.5.2.2 De otras condiciones de proceso | 100 |
| 3.6 Dispositivos utilizados para la verificación experimental de los modelos | 105 |
| 3.7 Consideraciones finales | 107 |
| Capítulo 4: Desarrollo Fase Experimental..... | 109 |
| 4.1 Introducción | 110 |
| 4.2 Estudios previos | 111 |

| | |
|---|------------|
| 4.3 Tipos de RSO utilizados | 112 |
| 4.4 Descripción del dispositivo experimental | 114 |
| 4.5 Técnicas analíticas | 117 |
| 4.5.1 Tamaño, representatividad y conservación de las muestras | 120 |
| 4.6 Metodología de trabajo aplicada | 121 |
| 4.6.1 Caracterización de los RSO seleccionados | 122 |
| 4.6.2 Pre acondicionamiento de los RSO | 124 |
| 4.6.3 “Formulación” del sustrato inicial para las experiencias | 126 |
| 4.6.4 Armado y montaje de los RSO dentro del reactor | 129 |
| 4.6.5 Planificación de los muestreos y monitoreos | 131 |
| 4.6.5.1 Monitoreos y registro de variables y condiciones de proceso durante el desarrollo de las experiencias | 133 |
| 4.7 Condiciones estudiadas | 136 |
| 4.8 Corridas experimentales | 138 |
| Capítulo 5: Modelado del Proceso | 141 |
| 5.1 Introducción | 142 |
| 5.2 Ecuaciones Generales de Balance | 143 |
| 5.2.1 Balance de Cantidad de Movimiento (BCM) | 145 |
| 5.2.2 Balance de Materia (BM) | 146 |
| 5.2.2.1 Modelado de la cinética del proceso | 150 |
| 5.2.3 Balance de Energía Térmica (BET) | 154 |
| 5.2.3.1 Distribución espacial y temporal de la temperatura | 156 |

| | |
|--|------------|
| 5.2.3.2 Balance térmico macroscópico | 160 |
| 5.3 Ecuaciones de “trabajo” | 161 |
| 5.3.1 La geometría del “reactor” | 162 |
| 5.3.1.1 Balances de materia por componentes | 162 |
| 5.3.1.2 BET puntuales (considerando un modelo 1D) | 164 |
| 5.3.1.2.1 En coordenadas rectangulares ($T \equiv T(y, t)$) | 164 |
| 5.3.1.2.2 En coordenadas cilíndricas ($T \equiv T(r, t)$) | 165 |
| 5.3.1.3 BET integrado ($T \equiv T(t)$) | 167 |
| 5.3.1.4 Los términos fuentes y sumidero | 167 |
| 5.3.1.5 Parámetros del modelo | 171 |
| Capítulo 6: Resolución y Análisis de Sensibilidad del Modelo | 175 |
| 6.1 Introducción | 176 |
| 6.2 Simulaciones preliminares para la validación cualitativa del modelo | 179 |
| 6.2.1 Balance de Materia (BM) | 179 |
| 6.2.1.1 BM de los sólidos totales | 179 |
| 6.2.1.2 BM del agua | 184 |
| 6.2.2 Balance de Energía Térmica (BET) | 185 |
| 6.2.2.1 Distribución espacial y temporal de la temperatura ($T(\underline{x}, t)$) | 185 |
| 6.2.2.2 Evolución temporal de la temperatura promedio en el volumen | 195 |
| 6.3 Consideraciones finales | 203 |

| | |
|--|------------|
| Capítulo 7: Resultados y Discusión..... | 205 |
| 7.1 Introducción | 206 |
| 7.2 PRIMER BLOQUE: Calibración del modelo | 208 |
| 7.2.1 BM de los sólidos totales | 211 |
| 7.2.2 BM del contenido de agua | 223 |
| 7.2.3 BET Puntual: Distribución espacial y temporal de la temperatura ($T \equiv T(\underline{x}, t)$) | 227 |
| 7.2.4 BET Integrado: Evolución temporal de la temperatura promedio en el volumen ($\langle T(\underline{x}, t) \rangle_{V_R} = T(t)$) | 230 |
| 7.3 SEGUNDO BLOQUE: Validación cuantitativa del modelo | 232 |
| 7.3.1 BET Puntual: Evolución de la distribución espacial y temporal de la temperatura ($T \equiv T(\underline{x}, t)$) | 236 |
| 7.3.2 BET Integrado: Evolución temporal de la temperatura promedio en el volumen ($\langle T(\underline{x}, t) \rangle_{V_R} = T(t)$) | 245 |
| 7.4 TERCER BLOQUE: Aplicaciones varias de interés con el modelo calibrado y validado experimentalmente | 257 |
| 7.4.1 Distribución espacial y temporal de la temperatura ($T \equiv T(\underline{x}, t)$) | 258 |
| 7.4.2 Evolución temporal de la temperatura promedio en el volumen ($\langle T(\underline{x}, t) \rangle_{V_R} = T(t)$) | 262 |
| 7.5 Consideraciones finales | 268 |
| Capítulo 8: Conclusiones y Perspectivas Futuras..... | 271 |

| | |
|---|-----|
| Apéndices | 279 |
| Apéndice A: Técnicas de compostaje y escalas de trabajo..... | 280 |
| Apéndice B: Indicadores de estabilidad, madurez y calidad utilizados en compostaje..... | 286 |
| Apéndice C: Parámetros del proceso de compostaje..... | 290 |
| Apéndice D: Contribución personal al proyecto de norma "Reglamento Para el Registro de Fertilizantes, Enmiendas, Sustratos, Acondicionadores, Protectores y Materias Primas en la Republica Argentina" (Consulta pública realizada por el SENASA en 2010)..... | 296 |
| Apéndice E: Ejemplos de publicaciones sobre modelado del compostaje y aspectos abordados..... | 302 |
| Apéndice F: Funciones de corrección aplicadas a la constante cinética de pseudo-primer orden k_G para la degradación del sustrato..... | 304 |
| Apéndice G: Parte "A". Términos frecuentemente incluidos en los balances de energía térmica (BET). Parte "B". Clasificación de dispositivos experimentales según su tamaño..... | 308 |
| Apéndice H: Técnicas Analíticas | 310 |
| PRIMERA PARTE. Métodos analíticos utilizados | 310 |
| SEGUNDA PARTE. Adaptaciones realizadas a la técnica Tappi Method T 222 om-88 para determinación de la Lignina Insoluble en RSO. | 313 |
| H.1 Comentarios previos | 313 |
| H.2 Adaptaciones realizadas | 314 |
| Apéndice I: Ejemplo del cálculo de la fórmula química de los RSO utilizados..... | 317 |
| Apéndice J: Parte "A". Información de los principales equipos / instrumental utilizados con las técnicas analíticas aplicadas. Parte "B". | |

| | |
|--|------------|
| Tratamiento y conservación de las muestras de compost..... | 323 |
| Apéndice K: Ajustes de propiedades en una mezcla de RSO a compostar. | 327 |
| K.1 Ajuste de nutrientes | 327 |
| K.2 Ajuste del contenido de agua (por defecto o exceso) | 329 |
| Apéndice L: Ejemplo de planilla de registro de datos utilizada durante el monitoreo de las experiencias..... | 332 |
| Apéndice M: Fichas técnicas de las experiencias realizadas..... | 333 |
| Apéndice N: Expresiones de cálculo de parámetros característicos del proceso determinados en los ensayos..... | 341 |
| Apéndice O: Ejemplo de la evolución típica de las principales variables monitoreadas y parámetros fisicoquímicos determinados durante los ensayos..... | 344 |
| Apéndice P: Rango de valores de los principales parámetros incluidos en el modelado del compostaje..... | 351 |
| Apéndice Q: Validación cualitativa del modelo (simulaciones complementarias)..... | 354 |
| Q.1 Efecto de condiciones iniciales | 354 |
| Q.2 Efecto de distintos valores de b_{H_2O} | 358 |
| Apéndice R: Resultados de simulaciones con el modelo calibrado aplicando distintos valores de h, estimados según la expresión de Moraga et al. (2009)..... | 360 |
| Apéndice S: Valores del parámetro k_G estimados en forma óptima. | 363 |
| Apéndice T: Resultados de la evolución de la temperatura máxima medida versus simulada considerando distintos regímenes de volteos..... | 364 |
| Nomenclatura..... | 367 |

| | |
|---------------------------|-----|
| Bibliografía | 374 |
|---------------------------|-----|

Índice de Figuras

Capítulo 1

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Metodología de trabajo..... | 45 |
|---|----|

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Esquema general del proceso (adaptado de Rynk, 1992). V.C.: volumen de control..... | 48 |
| Figura 2.2 Identificación de etapas y alternativas técnicas del compostaje..... | 49 |
| Figura 2.3 Conglomerado trifásico de partículas del sustrato..... | 55 |
| Figura 2.4 Ejemplo de principales procesos de transferencia másica en el compostaje..... | 55 |
| Figura 2.5 Evolución típica de la temperatura másica y etapas del compostaje... | 71 |

Capítulo 4

| | |
|--|-----|
| Figura 4.1 Reactores operando en paralelo. Caso experiencias con un único punto de medición de la temperatura másica..... | 115 |
| Figura 4.2 Reactor utilizado en experiencias con múltiples puntos de medición de la temperatura másica..... | 116 |
| Figura 4.3 Esquema de muestreo y manipulación de las muestras..... | 121 |
| Figura 4.4 (a) Vista superior; (b) transversal (lateral) del reactor con un único punto de monitoreo de T | 134 |
| Figura 4.5 (a) Vista superior; (b) transversal (frente) del reactor con múltiples puntos de monitoreo de la temperatura másica. Los puntos en naranja indican la | |

| | |
|--|-----|
| localización de la termocupla..... | 134 |
| Figura 4.6 Representación gráfica de las distintas geometrías de pilas estudiadas..... | 138 |
| Capítulo 6 | |
| Figura 6.1 Simulación del efecto de distintos valores de k_G sobre la evolución de $[C_s / C_{s,0}]$, considerando $f_{O_2} = 1$. (a) período activo inicial; (b) período completo..... | 180 |
| Figura 6.2 Simulación del efecto limitante del oxígeno sobre la evolución temporal de $[C_s / C_{s,0}]$ para $k_G = 0,08 \text{ d}^{-1}$ | 182 |
| Figura 6.3 Simulación del efecto de los volteos sobre la evolución temporal de $[C_s / C_{s,0}]$ (\downarrow) Volteo..... | 183 |
| Figura 6.4 Simulación de la evolución temporal de $[C_{H_2O} / C_{H_2O,0}]$ para distintos valores de k_G y un valor fijo de $b_{H_2O} = 0,65 \text{ kg}_{H_2O} \cdot \text{kg Sólido degra.}^{-1}$ | 184 |
| Figura 6.5 Simulación de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Condición de contorno: flujo de calor en ambos extremos. Valores de referencia para la base de la pila (h_1) y la superficie de la pila (h_2): $h_1 = 71,90 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ $h_2 = 90,10 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ | 186 |
| Figura 6.6 Simulación de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Condición de contorno: (a) En $y = 0$ $h_1 = 0 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, $h_2(\text{ref.})$; (b) En $y = H$ $h_1(\text{ref.})$, $h_2 = 0 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ | 188 |
| Figura 6.7 Simulación de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Condición de contorno: $h_1 = h_2 = 0$ en ambos extremos (condición adiabática)..... | 189 |
| Figura 6.8. Simulación de perfiles de temperatura con diferentes condiciones de contorno, para $t = 48 \text{ h}$ de proceso. F. (Flujo) en ambos; F.N.: Flujo nulo; HP: Hot Point..... | 191 |
| Figura 6.9. Simulación de perfiles de temperatura con diferentes valores de | |

| | |
|---|-----|
| conductividad térmica del sustrato (k_s), para $t = 48$ h de proceso. Valor de referencia: $k_s = 4,4 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ | 192 |
| Figura 6.10. Simulación de perfiles de temperatura con distintos valores de $c_{p,s}$, para $t = 48$ h de proceso..... | 193 |
| Figura 6.11. Simulación de perfiles de temperatura con distintos valores de ΔH_{rxn} , para $t = 48$ h de proceso..... | 194 |
| Figura 6.12. Simulación de la evolución de la $T(t)$ para distintos valores de la constante cinética global o aparente k_G . Valor de referencia: $k_G = 0,08 \text{ d}^{-1}$ | 196 |
| Figura 6.13. Simulación de la evolución de la $T(t)$ para distintos valores de la concentración recalitrante o de equilibrio ($C_{s,e}$). Valor de referencia: $C_{s,e} = 0,35$ <u>$C_{s,0}$</u> | 197 |
| Figura 6.14. Simulación de la evolución de la $T(t)$ para distintos valores coeficiente global de transmisión de calor (U). Valor de referencia: $U = 20 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ | 199 |
| Figura 6.15. Simulación de la evolución de la $T(t)$ para distintos valores de la relación área/volumen (A_2/V_R). Valor de referencia: $(A_2/V_R) = 3,33 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ | 200 |
| Figura 6.16. Simulación de la evolución de la $T(t)$ en condiciones de oxígeno no limitante y oxígeno limitante con o sin volteos periódicos. (↓) Volteo..... | 201 |
| Capítulo 7 | |
| Figura 7.1 Esquema iterativo de resolución del modelo y estimación de parámetros..... | 210 |
| Figura 7.2 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales (período completo). Datos Corrida Exp. N° 10 (Relación C/N = 27,1; Humedad = 63,7 % , Volteos tipo “A”). % Error: 4,10..... | 212 |

| | |
|---|-----|
| Figura 7.3 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales (período completo). Datos Corrida Exp. N° 11 (Relación C/N = 27,1; Humedad = 65,6 % ; $T_{s,0} = 18,6$ °C , Volteos tipo “A”). % Error: 3,48..... | 212 |
| Figura 7.4 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales (período completo). Datos Corrida Exp. N° 12 (Relación C/N = 34,2; Humedad = 61,5 % ; $T_{s,0} = 26,5$ °C , Volteos tipo “B”). % Error: 5,68..... | 213 |
| Figura 7.5 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales. Datos Corrida Exp. N° 24 (Relación C/N = 62,4; Humedad = 62,6 % ; $T_{s,0} = 19,6$ °C). % Error: 0,79..... | 218 |
| Figura 7.6 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales. Datos Corrida Exp. N° 14 (Relación C/N = 24,1; Humedad = 69,9 % ; $T_{s,0} = 26,5$ °C). % Error: 6,32..... | 219 |
| Figura 7.7 Datos simulados vs. experimentales del contenido de agua en el sustrato a distintas k_G : (a) $0,0165$ d ⁻¹ ; (b) $0,04$ d ⁻¹ ; (c) $0,084$ d ⁻¹ . % Error: (a) 0,55; (b) 1,73 y (c) 4,70..... | 226 |
| Figura 7.8 Metodología implementada para la validación experimental del modelo..... | 235 |
| Figura 7.9 Datos simulados (líneas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Corrida Exp. N° 24 (datos no independientes). % Error: 2,16 (promedio)..... | 237 |
| Figura 7.10 Datos simulados (líneas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Corrida Exp. N° 23. % Error: 1,97 (promedio)..... | 238 |
| Figura 7.11 Datos simulados (lineas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura en un sistema térmicamente abierto. Corrida Exp. N° 21. % Error = 5,08 (promedio)..... | 240 |
| Figura 7.12 Datos simulados (lineas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles | |

| | |
|---|-----|
| de temperatura en un sistema térmicamente cerrado. Corrida Exp. N° 22. Parámetro fijado: $h_2 = 0 \text{ (kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$. % Error = 6,21 (promedio)..... | 240 |
| Figura 7.13 Datos simulados (lineas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura con aplicación de volteos a distintos tiempos: (a) hasta 1° post volteo; (b) hasta 2° post volteo. Corrida Exp. N° 27. % Error (promedio): (a) 2,39; (b) 3,17..... | 242 |
| Figura 7.14 Regresión lineal de datos de temperatura puntual simulados versus experimentales..... | 244 |
| Figura 7.15 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de $T(t)$ a distintas k_G : (a) $0,0165 \text{ d}^{-1}$ (Corrida Exp. N° 24, datos no independientes); (b) $0,0624 \text{ d}^{-1}$ (Corrida Exp. N° 23). % Error: (a) 3,84; (b) 6,78..... | 246 |
| Figura 7.16 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de $T(t)$ considerando distintos regímenes de volteos: (a) Tipo “A”. Corrida Exp. N° 21; (b) Tipo “B”. Corrida Exp. N° 16. % Error: (a) 6,09 ; (b) 5,3..... | 248 |
| Figura 7.17 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de $T(t)$ considerando distintas humedades iniciales: (a) 69,9 %. Corrida Exp. N° 13; (b) 82 %. Corrida Exp. N° 15. % Error: (a) 6,04 ; (b) 3,47..... | 252 |
| Figura 7.18 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de $T(t)$ considerando distintas geometrías de pilas: (a) rectangular. Corrida Exp. N° 26 (datos no independientes); (b) semicilíndrica. Corrida Exp. N° 27; (c) triangular. Corrida Exp. N° 28. % Error: (a) 4,88 ; (b) 3,96 y (c) 6,63..... | 254 |
| Figura 7.19 Regresión lineal de datos de temperatura promedio simulados versus experimentales..... | 256 |
| Figura 7.20 Datos simulados (lineas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura para tiempo de proceso de 45 h y distintos valores de k_G, h_1, h_2 y k_S . Datos Corrida Exp. N° 23..... | 258 |

Figura 7.21 Desplazamiento del “Hot Point” dentro de la masa en función de distintos valores de h_1 y h_2 . Datos Corrida Exp. N° 23 (perfil de temperatura a $t = 45$ h de proceso)..... 260

Figura 7.22 Desplazamiento del “Hot Point” en función de distintos valores de k_s . Datos Corrida Exp. N° 23 (perfil de temperatura a $t = 45$ h de proceso)..... 260

Figura 7.23 Efecto de la velocidad del viento sobre la temperatura máxima alcanzada en una pila, utilizando valores de h_i de Moraga et al. (2009)..... 263

Figura 7.24 Datos simulados de T máxima en función del tiempo de volteo: determinación del t_{volteo} óptimo asociado a la mejor performance del proceso..... 265

Figura 7.25 Datos simulados de T máxima en función de: (a) coeficiente A_2 / m ; (b) altura de la pila. Condiciones de simulación: Geometría de la pila = triangular; Masa RSO = 1000 kg (b.h.); Densidad = 250 kg m⁻³; Relación Base/Altura pila = 2/1..... 267

Apéndice Q

Figura Q.1 Simulación de perfiles de temperatura a distintas concentraciones iniciales de sustrato..... 355

Figura Q.2 Simulación de perfiles de temperatura a distintos contenidos iniciales de agua..... 356

Figura Q.3 Simulación de perfiles de temperatura a distintas temperaturas de referencia..... 357

Figura Q.4 Simulación de la evolución temporal de $[C_{H_2O} / C_{H_2O,0}]$ para distintos valores de b_{H_2O} tomando $x_{\text{evap}} = 3,5$ 358

Índice de Tablas

Capítulo 1

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 Comparación procesos de conversión aeróbicos versus anaeróbicos..... | 35 |
|---|----|

Capítulo 2

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1 Propiedades físicas, químicas y biológicas de RSO usualmente utilizados en compostaje..... | 61 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Tabla 2.2 Parámetros fisicoquímicos y sus rangos recomendados para el compostaje..... | 67 |
|--|----|

Capítulo 3

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1 Ejemplos de funciones de corrección aplicadas a la k_G | 93 |
|---|----|

Capítulo 4

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.1 Residuos orgánicos utilizados en los ensayos..... | 113 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.2 Propiedades fisicoquímicas y biológicas iniciales de los RSO utilizados..... | 123 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.3 Composición elemental de los RSO..... | 124 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.4 Pre procesamiento aplicado a los RSO utilizados en los ensayos..... | 125 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.5 Composición inicial del sustrato para las distintas experiencias..... | 128 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.6 Cronograma de muestreos y determinaciones analíticas..... | 132 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.7 Condiciones y rangos estudiados del compostaje de RSO a escala laboratorio..... | 137 |
|--|-----|

Capítulo 5

| | |
|--|-----|
| Tabla 5.1 Ecuaciones de trabajo del modelo propuesto..... | 169 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Tabla 5.2 Parámetros del modelo..... | 172 |
| Capítulo 6 | |
| Tabla 6.1 Valores de referencia de los parámetros y condiciones iniciales utilizados en la validación cualitativa del modelo..... | 178 |
| Capítulo 7 | |
| Tabla 7.1 Condiciones experimentales de los ensayos N° 10, 11 y 12..... | 215 |
| Tabla 7.2 Condiciones experimentales de los ensayos N° 14 y 24..... | 220 |
| Tabla 7.3 Valores calculados del coeficiente b_{H_2O} | 224 |
| Tabla 7.4 Valores óptimos de los parámetros libres estimados del BET puntual..... | 228 |
| Tabla 7.5 Condiciones experimentales de los ensayos utilizados para estimar k_s | 230 |
| Tabla 7.6 Valores estimados del parámetro U | 232 |
| Tabla 7.7 Resultados de la Regresión Lineal de los valores de temperatura predichos por el modelo versus los datos experimentales (temperatura puntual)..... | 244 |
| Tabla 7.8 Resultados de la Regresión Lineal de los valores de temperatura predichos por el modelo versus los datos experimentales (temperatura promedio)..... | 256 |
| Apéndice A | |
| Tabla A.1. Características principales de las alternativas tecnológicas del compostaje..... | 283 |
| Apéndice B | |

| | |
|--|-----|
| Tabla B.1 Indicadores de estabilidad, madurez y calidad en compost. Ref. Bibliográficas: Bernal et al. (2009); Barrena et al. (2009) y Mazzarino et al. (2012)..... | 286 |
| Tabla B.2 Microorganismos patógenos..... | 287 |
| Tabla B.3 Regulaciones para reducción de patógenos según normas de distintos países. Fuente: Adaptación de Brinton (2000) y Laos et al. (2012)..... | 288 |
| Tabla B.4 Regulaciones para reducción de atracción de vectores según USEPA (1993). Fuente: Adaptación de la Tabla 4-2 presentada en Laos et al. (2012)..... | 289 |
| Apéndice C | |
| Tabla C.1 Parámetros usualmente estudiados durante el proceso de compostaje..... | 293 |
| Apéndice E | |
| Tabla E.1 Ejemplo de aspectos abordados en publicaciones sobre modelado del compostaje..... | 303 |
| Apéndice F | |
| Tabla F.1. Funciones de corrección aplicadas a la constante cinética k_G | 306 |
| Apéndice G | |
| Tabla G.1 Términos típicos del BET (Mason 2006)..... | 308 |
| Tabla G.2 Clasificación de reactores según su tamaño (Mason & Milke 2005a). | 309 |
| Apéndice H | |
| Tabla H.1 Resumen de métodos analíticos..... | 311 |
| Tabla H.2 Proporción muestra/ácido sulfúrico para la hidrólisis ácida (adaptada)..... | 315 |

Apéndice I

| | |
|--|-----|
| Tabla I.1 (a) Composición elemental de los RSO utilizados en los ensayos (Tchobanoglous et al. 1993)..... | 317 |
| Tabla I.1 (b) Pesos moleculares de los elementos constituyentes..... | 318 |
| Tabla I.2 Cálculos máxicos del contenido de agua, sólidos totales (ST), hidrógeno (H) y oxígeno (O)..... | 318 |
| Tabla I.3 (a) Masa (con y sin agua) de cada elemento en los diferentes RSO utilizados..... | 320 |
| Tabla I.3 (b) Moles (con y sin agua) de cada elemento en los diferentes RSO utilizados..... | 321 |
| Tabla I.4 Aplicación de la relación $N = 1$ en base molar..... | 322 |
| Tabla I.5 Fórmulas químicas obtenidas (con y sin agua)..... | 322 |

Apéndice J

| | |
|---|-----|
| Tabla J.1 Descripción de los equipos / instrumental utilizado..... | 323 |
| Tabla J.2 Tipos de pre tratamiento y conservación de las muestras..... | 325 |

Apéndice K

| | |
|--|-----|
| Tabla K.1 Secuencia de cálculo para la estimación del agua adicional..... | 330 |
|--|-----|

Apéndice O

| | |
|---|-----|
| Tabla O.1 Evolución típica de la masa, contenido de humedad, ST y pH en los ensayos..... | 349 |
| Tabla O.2 Evolución típica de la altura y volumen de una pila de compost, densidad aparente y N_T durante los ensayos..... | 349 |
| Tabla O.3 Evolución típica del contenido de C_{org} , Lignina Total, Cenizas y SV durante los ensayos..... | 350 |

| | |
|---|-----|
| Tabla O.4 Resultados típicos obtenidos del Test de Germinación..... | 350 |
| Apéndice P | |
| Tabla P.1 Rango de valores publicados de los principales parámetros incluidos en los modelos de compostaje..... | 351 |
| Apéndice R | |
| Tabla R.1 Resultados de simulaciones con el modelo aplicando distintos valores de h_i según expresión publicada en Moraga et al. (2009)..... | 360 |
| Apéndice S | |
| Tabla S.1 Valores estimados en forma óptima del parámetro k_G | 363 |
| Apéndice T | |
| Tabla T.1 Evolución de la T_{max} experimental versus simulada aplicando distintos regímenes de volteos..... | 365 |

Capítulo 1

Introducción y

Metodología

Capítulo 1: Introducción y Metodología

1.1 La problemática de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

La relación del hombre con su entorno ha estado siempre definida por la extracción de recursos naturales para su subsistencia y, al mismo tiempo, por la generación de residuos derivados del desarrollo de sus actividades. De estos últimos, especialmente los residuos sólidos, son destinados al descarte y al abandono y, cuando no son gestionados adecuadamente, terminan impactando negativamente sobre la salud pública y el ambiente. Algunos ejemplos que lo demuestran son la degradación del paisaje como producto de la acumulación y dispersión de los residuos en lugares no apropiados, la contaminación del agua superficial y subterránea como consecuencia del drenaje e infiltración del lixiviado formado a partir de éstos, los graves accidentes de tránsito causados por el humo proveniente de su quema incontrolada a la vera de las rutas, la proliferación de vectores y transmisión de enfermedades (leptospirosis, enfermedades diarreicas, salmonelosis, etc.), entre otros.

A su vez, el crecimiento poblacional registrado a nivel mundial en las últimas décadas, sumado al modelo socioeconómico y cultural cada vez más consumista predominante, ha provocado un incremento en la generación de los denominados *residuos sólidos urbanos* o RSU (considerando como tales a aquellos generados en el ámbito de una urbe, cualquiera sea su tamaño), representando uno de los problemas medioambientales vigentes más importantes a nivel mundial. Lograr su

gestión adecuada constituye hoy en día un verdadero desafío que deben hacer frente y resolver las sociedades contemporáneas.

En vistas a revertir esta situación, en el contexto internacional se viene trabajando sobre dos nuevos conceptos aplicados a los residuos: el de *Gestión Integral de RSU* (GIRSU) y el de *Valorización* (Tchobanoglous et al. 1993; Shah 2000; USEPA 2002; Penido Monteiro et al. 2006). El primero de ellos plantea el abordaje de todas las etapas del *ciclo de vida de los residuos* (generación, disposición inicial en origen, recolección y transporte, transferencia, reciclado y transformación y disposición final) en forma integral, con el objetivo principal de minimizar los impactos negativos sobre la salud y el ambiente, siguiendo los mejores principios disponibles de la ingeniería, sanitarios, ambientales, legales, financieros, etc. El segundo concepto comprende al conjunto de procesos y operaciones tendientes a *recuperar o poner en valor los recursos contenidos en los RSU*, buscando reinsertarlos de algún modo al proceso productivo y así minimizar la porción que finalmente deba ser dispuesta sanitariamente, entre otros beneficios socioeconómicos y ambientales que se pueden obtener. Las tecnologías que se aplican para ese propósito se seleccionan en función de la caracterización, composición y el volumen de los residuos a tratar, dependiendo también de múltiples factores como los recursos humanos (calificados o no), económicos y tecnológicos disponibles, demandas y especificaciones del mercado, y costo operacional, entre otros.

En nuestro país, por ejemplo, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS) impulsó en el año 1999 el “Plan Nacional de Valorización de Residuos”, y años más tarde en 2006 la “Estrategia Nacional de

Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU)” contando con financiamiento del Banco Mundial. Estas herramientas de gestión buscan brindar asistencia técnica y económica a modo de incentivo para que las provincias y sus municipios puedan elaborar sus propios planes y sistemas de gestión integral, en el marco de los objetivos de la Estrategia Nacional. Más aún, hoy en día esta temática está considerada como una de las áreas de vacancia por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación.

Una clasificación, si bien no rigurosa en términos químicos, pero muy utilizada en la definición de políticas y planes de gestión de residuos, es la que divide a los RSU en dos grandes categorías: la fracción *inorgánica o seca* (restos de papel y cartón, plásticos, vidrio y metales, etc.) y la fracción *orgánica o húmeda* (restos de comida, de poda y de jardín, biosólidos, etc.). Estos últimos también conocidos como *residuos sólidos orgánicos (RSO)*, contienen la porción más rápidamente biodegradable, ya desde hace años distintos estudios de generación señalan que representan un alto porcentaje del total generado, y que tiende a disminuir en países desarrollados o industrializados (Penido Monteiro et al. 2006). Al respecto, Tchobanoglous et al. (1993) indican que dicha fracción es del 40 al 85 % para países con bajos ingresos per cápita, mientras que para países con medianos ingresos es del 20 al 65 % , y del 6 al 30 % para países con altos ingresos. En Estados Unidos, por ejemplo, en el año 2010 los RSO representaron un 27,3 % del total generado (USEPA 2011), mientras que en Argentina, según datos actualizados al 2009 del Observatorio Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos dependiente de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, la

porción orgánica alcanzó el 50 % de lo generado, compuesta principalmente de residuos verdes y restos de alimentos.

Realizando un rápido cálculo teniendo en cuenta una población de 41.769.726 habitantes (estimada a julio de 2011 sobre resultados del último censo 2010) y tasas de generación promedio de 0,91 kg por habitante y por día (SAyDS 2005), en nuestro país se producen aproximadamente 19.000 toneladas de RSO por día, lo que da cuenta de la dimensión y magnitud del problema a atender como sociedad.

En cuanto a la composición y propiedades fisicoquímicas y biológicas de los RSO, si bien estarán ligadas a la fuente de origen (doméstica, urbanos, agrícola, ganadero, industrial, forestal, pesquero, etc.) y a los tipos de RSO generados (cáscaras de frutas y verduras, yerba y sacos de té usados, rastrojos de cultivos, excretas sólidas, camas de cría, etc.), en términos generales se caracterizan por ser heterogéneos, poseer un alto contenido de humedad, ser putrescibles, portadores de diversos microorganismos patógenos y tener la capacidad de atraer vectores y transmitir enfermedades, impactando sanitaria y medioambientalmente sobre la sociedad en su conjunto, y en especial sobre las poblaciones más vulnerables. Enterrados en sitios no controlados y aún en rellenos sanitarios, se descomponen anaeróbicamente generando gases de efecto invernadero (GEIs) y contribuyendo al fenómeno de cambio climático global. Todos estos aspectos revelan que se trata de una corriente de residuos de difícil manipulación y que demanda especial atención, ya que en caso de no ser gestionados adecuadamente como se mencionó en párrafos anteriores, pueden degradar el ambiente y afectar la salud pública en poco tiempo.

La problemática descrita vinculada a los residuos justifica de algún modo que dicho tema adquiriera relevancia como para ser abordado desde distintos ámbitos de los Estados, incluso alentando el desarrollo de investigaciones científicas y tecnológicas orientadas a su transformación en recursos de valor agrícola y ambiental (Tchobanoglous et al. 1993; Sharma et al. 1997; Tiquia et al. 1997; Komilis & Ham 2006; Mazzarino et al. 2012).

1.2 Procesos de conversión biológica

Los denominados *procesos de conversión biológica* comprenden un conjunto de tecnologías basadas en la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos mediante el accionar de microorganismos que usualmente están contenidos en el material, y se constituyen hoy en día como metodologías factibles desde el punto de vista técnico y de aceptación social para el tratamiento y la valorización de los RSO (Mata-Álvarez et al. 2000; Smars 2002; Barth 2006; Güereca et al. 2006).

En función del metabolismo de obtención de energía de los microorganismos involucrados y de la necesidad (o no) de estos de un aceptor de electrones como el oxígeno, lo cual define su supervivencia o no ante dicho elemento, los procesos biológicos se clasifican en *aeróbicos* y *anaeróbicos*.

La *digestión anaeróbica* o *bio digestión* es una de las alternativas más representativas de tratamiento en ausencia de oxígeno. Desde el punto de vista químico la degradación de la materia orgánica ocurre fundamentalmente en tres etapas: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis, mediada por microorganismos y

una cinética específica en cada una de ellas. Como productos finales se obtiene biogás de alto valor como fuente de energía (compuesto principalmente de CH_4 y CO_2), y un barro semisólido con avanzado estado de degradación pero no estabilizado biológicamente, cuestión que limita su uso posterior directo.

Se trata de sistemas que para mantener su estabilidad una vez puestos en régimen, requieren procesar RSO preferentemente homogéneos y uniformes tanto cuantitativa como cualitativamente a través del tiempo; resultando por tal motivo más conveniente su aplicación para desechos de explotaciones agropecuarias, por ejemplo, que para los RSU. La principal sustancia tóxica e inhibitoria del proceso es el oxígeno. Le siguen las concentraciones de NH_3 libre producido por la degradación del N orgánico presente en el sustrato, ácidos grasos y el sulfuro de hidrógeno, afectando la estabilidad y eficiencia del proceso (Mata-Álvarez 2002). Tienen asociado por lo general un alto grado de complejidad y elevados costos de inversión, construcción y operación debido a la infraestructura y recursos necesarios para su funcionamiento (sistemas de extracción, compresión y acumulación de gases, de calefacción, abundante consumo de agua, mano de obra semi calificada, etc.).

Por su parte, el *compostaje o digestión aerobia* se ha posicionado en los últimos años como una alternativa muy conveniente para el tratamiento de la fracción orgánica de los RSU (Marugg et al. 1993; Das & Keener 1997a, b; Keener et al. 1997; Wei et al. 2003; Ghaly et al. 2006; Bongochgetsakul e Ishida 2008). Se trata de un proceso de transformación mediante el cual, bajo condiciones controladas de operación, la materia orgánica contenida en los residuos es

biológicamente degradada en forma aeróbica generando gases (esencialmente vapor de agua, CO_2 y NH_3) y un sólido estabilizado (compost) que admite múltiples usos y en función de su calidad, puede ser utilizado como mejorador de suelos (Keener et al. 1993; Sundburg 2005; Cayuela et al. 2009).

En países como el nuestro, en el cual por distintos fenómenos y causas se encuentran erosionadas extensiones muy grandes de suelo, de obtenerse un producto final de calidad agronómica, se podría contribuir a restaurar áreas degradadas y a reducir el uso de agroquímicos en los suelos destinados a agricultura. Por ejemplo, se viene demostrando en el país la posibilidad de tratar con esta tecnología una amplia variedad de residuos orgánicos, desde algas marinas (Eyras & Rostagno 1995, 2012; Eyras et al. 1998, 2008), vísceras de pescado y cascarillas de arroz (Laos et al. 2002; Leconte et al. 2009; Satti et al. 2012), biosólidos o lodos cloacales (Laos et al. 2002; Peralta et al. 2002, 2003; Zubillaga & Lavado 2006, 2012; Mazzarino et al. 2012), hasta los típicos RSO domésticos y urbanos mencionados antes (Tognetti et al. 2007a, b; De Pinto et al. 2012). Otro de los beneficios que brinda esta tecnología es que permite una reducción substancial en peso y volumen de los residuos originales tratados (Petric & Selimbaic 2008), desviando una importante porción de la disposición final en los rellenos sanitarios, optimizando la vida útil así como la generación de gases y lixiviados en éstos (Marugg et al. 1993; Hobson et al. 2005).

El proceso de compostaje puede realizarse tanto a pequeña escala (compost doméstico), como a escala industrial (procesando toneladas de RSO de un municipio o comuna). También implementarse por etapas progresivas como lo puede requerir un programa de GIRSU, a través de un diseño flexible y por módulos que permita ir

ampliando la capacidad de procesamiento de las plantas de tratamiento. No se ve limitado a una determinada condición climática ya que es posible encontrar experiencias realizadas con climas templados, tropicales, áridos o fríos (Laos et al. 2002; Leconte et al. 2009; Tirado & Michel 2010), requiriendo sencillas adaptaciones tales como techos o coberturas plásticas (de existir precipitaciones en exceso, por ejemplo) en caso de ser necesario (Goldstein 1988; Marešová & Kollárová 2010; Hua et al. 2011).

En la Tabla 1.1 se comparan en forma cualitativa ambos tipos de procesos biológicos.

Tabla 1.1 Comparación procesos de conversión aeróbicos versus anaeróbicos

| Procesos de Conversión Biológica | | |
|--|--|--|
| | Compostaje Aeróbico | Digestión Anaeróbica |
| Tipos de RSO que puede tratar | Heterogéneos, provenientes de distintas fuentes y variedad de composición | Preferentemente homogéneos y de composición uniforme (microorganismos muy sensibles a los cambios) |
| Productos finales | CO_2 , H_2O y otros gases (liberados a la atmósfera) + sólido estabilizado rico en nutrientes (compost). | Biogás (CH_4 , CO_2) + barros parcialmente estabilizados |
| Uso energético | Consumidor neto de energía | Productor neto de energía |
| Tiempos de procesamiento ^(a) | 4 a 12 meses aprox. | 30 días a 4 meses aprox. ^(b) |
| Reducción en volumen de los RSO tratados | 50 – 60 % | Hasta 50 % |
| Consumo de agua | Bajo | Alto |

| | | |
|--|--------------|--|
| Grado de complejidad en la operación y control del proceso | Bajo | Medio / Alto |
| Requerimientos de terreno (full escala) | Alto / Medio | Medio / Bajo |
| Costos iniciales de inversión (sin contar terreno) | Bajo | Medio / Alto (equipos e instalaciones) |

^(a) Dependen del nivel de tecnología involucrada, masa crítica a tratar, etc. ^(b) Requiere tiempo adicional para estabilización completa de los barros.

Como puede observarse, cada uno presenta ventajas y desventajas que deberán ponderarse a la hora de seleccionar la mejor tecnología disponible para un caso dado. En ocasiones se plantean sistemas de tratamiento mixtos, es decir, combinaciones de ambos, recomendándose primero la fase anaeróbica seguida de la aeróbica (Kayhanian & Tchobanoglous 1993; Tchobanoglous et al. 1993; Mata-Álvarez et al. 2000; Banegas et al. 2007; Nakasaki et al. 2009).

1.2.1 El compostaje como tema de estudio

Si bien el compostaje presenta las ventajas mencionadas que le han permitido su amplia difusión e implementación en todo el mundo, si lo observamos desde el punto de vista ingenieril representa un proceso de alta complejidad en cuanto al sistema físico, químico y microbiológico involucrado. Algunas de las características del sistema reaccionante posibles de mencionar, sin considerar la parte microbiológica, son: heterogéneo trifásico, multicomponente, multirreactivo, con reacciones bifásicas y cambios de fase en productos, y balances de materia y

energía acoplados mediante los términos cinéticos. La complejidad aumenta desde el punto de vista del diseño si se considera que *los reactivos* poseen composición y propiedades físicas variables (e.g., tamaño de partícula, variaciones estacionales que afectan su composición y disponibilidad, entre otros), las condiciones ambientales también son variables a lo largo del proceso (temperatura ambiente, humedad, etc.), y el tipo de técnica utilizada para la incorporación de oxígeno (volteo, aireación natural o forzada) impacta sobre los balances de materia y energía.

Entendiendo esta complejidad, desde hace décadas distintos grupos de investigación han venido trabajando con distintos grados de aproximación y precisión sobre numerosas aristas de este proceso, pudiéndose mencionar algunas líneas temáticas como:

1) En relación al sustrato: Caracterización y degradabilidad (Tuomela et al. 2000; Komilis & Ham 2003; Diambro et al. 2007; Petric et al. 2009a), masa crítica mínima (Xu et al. 2008);

2) Del proceso en sí y sus condiciones de desarrollo: Evolución de los parámetros característicos (Eklind et al. 2000 a, b; Sánchez-Monedero et al. 2001; Komilis & Ham 2005; Larney et al. 2006, 2008), prácticas de gestión y sus efectos sobre la eficiencia del proceso (Keener et al. 1996-1997; Das & Keener 1997a; Huang et al. 2004; Lima et al. 2004; Curtis et al. 2005; Torres-Lozada et al. 2005; Ekinci et al. 2006; Bueno et al. 2008; Cayuela et al. 2009), requerimientos y formas de aireación (Bari & Koenig 2001, 2005a, b; Ekinci et al. 2004a, c, 2005, 2006; Bueno et al. 2008), microbiología (Heinomen-Tanski et al. 2006; Vargas-García et al. 2007; Neklyudov et al. 2008; Raut et al. 2008); y

3) En cuanto a la calidad, usos y aplicaciones del compost obtenido:

Selección de indicadores de calidad, estabilidad y madurez (Iannotti et al. 1994; Bernal et al. 1998 a, b, 2009; Koenig & Bari 2000; Tognetti et al. 2005, 2007a, b; Barrena et al. 2009), evaluación de distintos usos posteriores y tasas de aplicación a suelos (Van Gestel et al. 2003; Houot et al. 2005; Hargreaves et al. 2008; Albanesi et al. 2012; Branzini & Zubillaga 2012; Kowaljow & Mazzarino 2012).

Muchos de estos aspectos cuando han sido estudiados en sistemas abiertos a gran escala, en su mayoría éstos se han basado más en la descripción fenomenológica del proceso que a su modelado, no incluyendo los fundamentos que modelan los procesos físicos, químicos y biológicos involucrados, debido principalmente a las dificultades encontradas al controlar dichos parámetros y variables operacionales, cuando se trabaja en sistemas de tales dimensiones. Entre las dificultades frecuentemente reconocidas en esta escala figuran la repetibilidad y reproducibilidad de los ensayos, el número de réplicas necesarias para, por ejemplo, el procesamiento estadístico de los datos, el manejo dificultoso de grandes volúmenes de RSO en todas las etapas del proceso, etc.

En cuanto a los dispositivos experimentales utilizados para el estudio del compostaje y la verificación experimental de los modelos, en especial los de escala laboratorio y piloto, en su mayoría son cerrados y operan en *condiciones controladas* (de aireación, temperatura, flujos de calor, humedad, etc.), en las cuales si bien es posible obtener información detallada, los resultados son muy difíciles de extrapolar a escalas mayores por las diferencias con las *condiciones reales* en las que ocurre

el proceso, presentando por tanto también una de sus limitaciones (ver detalles en capítulo 3, sección 3.6).

Por otra parte, existen una serie de puntos aún no suficientemente resueltos vinculados al modelado del proceso de compostaje, que necesitan esfuerzos de investigación como:

- La estimación de los perfiles de temperatura y el balance térmico que incluya las reacciones biológicas durante el proceso, y su incorporación a sistemas experimentales que emplean ventilación natural (Mason 2006);
- La escasa extrapolación de los resultados obtenidos para algunas variables (en particular perfiles de temperatura y humedad), en experiencias realizadas en escala laboratorio y piloto respecto de las condiciones que se dan a gran escala (Petiot & de Guardia 2004);
- El establecimiento de relaciones entre las condiciones en que se desarrolla el proceso y la calidad final del producto obtenido (Tognetti et al. 2005, 2007a, b; Petric et al. 2009a, b);
- La necesidad de incrementar la eficiencia del compostaje en términos de reducir los tiempos de procesamiento y alcanzar productos de mejor calidad (Keener et al. 1993);
- Condiciones de minimización de pérdidas de nitrógeno durante el compostaje a fin de mantener concentraciones altas de este nutriente en el producto final (lo cual tiene un valor económico y agrícola), y disminuir la generación de emisiones de NH_3 (Michel Jr. et al. 1998; Sánchez-Monedero et al. 2001; Parkinson et al. 2004);

- La necesidad de contar con modelos que incorporen los volteos como metodología de aireación, tal como se implementa en el compostaje a gran escala (Bongochgetsakul e Ishida 2008).

Este escenario pone de manifiesto la necesidad de seguir ahondando en el conocimiento del proceso, lo cual justifica su elección como tema objeto de esta Tesis, a fin de desarrollar herramientas de modelado sobre la base de los principios de ingeniería y de los procesos de transporte, que permitan explicar *cómo y por qué* evolucionan e interaccionan las variables del proceso (masa seca del sustrato o sólidos totales, contenido de agua, temperatura, concentración de oxígeno), parte de los cambios fisicoquímicos y biológicos que tienen lugar, y que puedan ser validadas, verificadas y ajustadas mediante un adecuado diseño experimental, que incluya la operación en condiciones *más próximas a las reales* de pilas con volteos, para así obtener resultados extrapolables a otras escalas.

1.3 Aspectos originales de la propuesta de Tesis

La presente Tesis se centra en abordar el modelado de los balances acoplados de materia (incluyendo la velocidad de descomposición del sustrato) y de energía térmica, orientado a obtener conclusiones y una fundamentación física-matemática del efecto de ciertas formas de gestionar el compostaje en la práctica (masa crítica mínima requerida, tapado o no de la pila, frecuencia de volteos,

distintas humedades y composición iniciales, forma geométrica de la pila), sobre el desarrollo del proceso y ciertos aspectos de la calidad del producto obtenido.

Para este estudio se seleccionó la técnica del compostaje de *pilas con volteos*, una de las menos exploradas científicamente a escala laboratorio, y al mismo tiempo, de las más difundidas en la práctica a nivel mundial.

Partiendo de la formulación completa de balances de materia y energía acoplados mediante el término cinético, se adoptarán aquellas hipótesis que permitan modelar los principales fenómenos intervinientes, llevándose a cabo las etapas de calibración, análisis de sensibilidad y validación correspondientes. Se buscará definir parámetros y expresiones representativos del proceso global y válidas como herramientas para cambios de escala (niveles laboratorio, piloto, planta).

Para la verificación experimental del modelo, se propondrá un reactor a escala laboratorio, sencillo y a la vez flexible en términos operativos, poniendo énfasis en conseguir *condiciones experimentales semicontroladas*, es decir, más próximas a las naturales, buscando la mejor representación del proceso en estudio.

Las herramientas para la ingeniería de diseño y cambios de escala que se obtengan, permitirán disminuir la componente empírica, y por tanto, las incertidumbres y problemas típicos detectados en la práctica (falta de actividad, escaso grado de maduración, exceso y/o pérdidas de nutrientes, anaerobiosis, etc.), esperando con ello a través de procesos más eficientes, optimizar el diseño y la operación de las instalaciones de procesamiento a nivel industrial. Por otro lado, el diseño experimental desarrollado planteado a escala laboratorio, permitirá reducir los

altos costos y dificultades de investigar inicialmente a gran escala o con sistemas de alta componente tecnológica.

1.4 Objetivos de la Tesis

Objetivo General:

Generación de nuevos conocimientos y herramientas de modelado y diseño del proceso de compostaje de la fracción orgánica de los RSU, focalizados al mejoramiento de la eficiencia del mismo, proponiendo posibles relaciones entre condiciones de proceso y calidad del producto.

Objetivos Específicos:

- 1) Obtención de una expresión cinética que permita describir el proceso de biodegradación aeróbica de los RSO, con la correspondiente verificación experimental;
- 2) Desarrollar un modelo fisicoquímico y matemático que represente los fenómenos claves de evolución másica y de transporte y transferencia de energía intervinientes en la modalidad de compostaje seleccionada (*pilas con volteos manuales*), y verificarlo experimentalmente;
- 3) Generar herramientas para la ingeniería de diseño y cambios de escala, válidas para la simulación del proceso en función de sus variables operativas, permitiendo la optimización de las mismas.

1.5 Metodología de trabajo

En la Figura 1.1 se presenta un diagrama de la metodología de trabajo a implementar en esta Tesis para el alcance de los objetivos propuestos.

Como puede apreciarse, se trata de un proceso iterativo que parte de la identificación del problema a abordar y avanza en las propuestas para su resolución. Así, una vez definido y acotado el problema (capítulos 1, 2 y 3), se propondrá un modelo fisicoquímico que permita representar un conjunto de procesos involucrados en las condiciones de estudio de interés (modelo operativo), estableciendo el modelo matemático asociado (capítulo 5). En forma paralela, se diseñará un dispositivo (reactor) para el desarrollo de la fase experimental que permitirá la calibración, validación y ajuste cuantitativos del modelo y de las hipótesis inicialmente planteadas frente a los resultados experimentales (capítulo 4).

Se desarrollarán herramientas computacionales sobre la base de métodos numéricos que resuelvan el sistema de ecuaciones permitiendo su simulación en distintas condiciones. Con ellas, en el capítulo 6 de Resolución y Análisis de Sensibilidad del modelo se analizarán las “salidas-respuestas” del mismo, verificando la congruencia cualitativa de éste con la física del proceso, y la robustez de los métodos numéricos utilizados. En el capítulo 7 de Resultados y Discusión, en un primer bloque se llevará a cabo, con un primer paquete de datos experimentales el ajuste y optimización de los parámetros “libres”, definiéndose o calculándose los restantes también incluidos en el modelo. En un segundo bloque, utilizando un segundo conjunto de datos experimentales, se realizará la validación experimental del modelo, comparando en cada oportunidad datos simulados versus los medidos bajo distintas condiciones iniciales de ensayo. Una vez calibrado y verificada la

validez cuali-cuantitativa del modelo propuesto y el rango de confiabilidad o robustez del mismo, en un tercer y último bloque se realizarán simulaciones de aplicación del modelo buscando optimizar variables operativas y de diseño (tiempo de volteo, altura máxima de la pila, etc.), que impacten sobre aspectos de la eficiencia del proceso y de la calidad del producto obtenido, indicando cómo y con qué condiciones de la práctica se relacionan los términos y parámetros más relevantes que gobiernan el proceso considerado.

Finalmente, en el capítulo 8 se integrará la información derivada de esta Tesis, obteniendo conclusiones sobre los criterios generales y las herramientas soporte de decisiones desarrolladas.

En cada etapa de la Tesis (modelado matemático, resolución numérica, estimación de parámetros y verificación experimental) se realizarán los ajustes, reformulaciones y aproximaciones necesarias hasta arribar a la solución buscada.

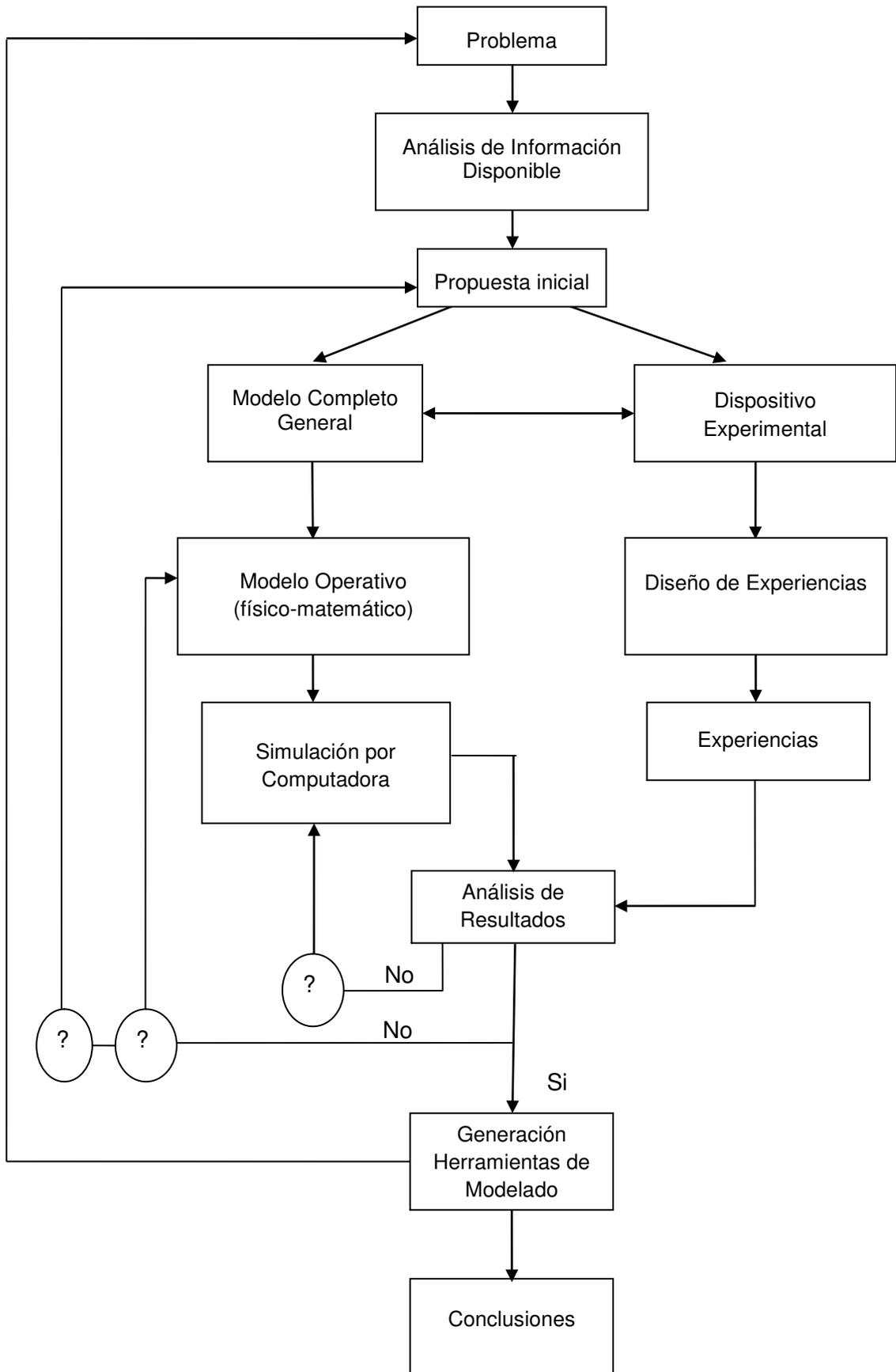


Figura 1.1 Metodología de trabajo.

Capítulo 2

El Proceso de

Compostaje

Capítulo 2: El Proceso de Compostaje

2.1 Definición y etapas del proceso

Retomando el concepto presentado en el capítulo anterior, es posible redefinir al compostaje como un proceso de conversión biológica aeróbica mediante el cual permite valorizar diferentes RSO generados por una dada población o actividad productiva, aportando a los objetivos de la gestión integral de RSU (Smars 2002; Castaldi et al. 2005; Hobson et al. 2005; Komilis 2006). Bajo condiciones controladas de operación, parte de la materia orgánica presente en los residuos es degradada por la biomasa microbiana pre-existente, consumiendo oxígeno y originando nueva biomasa, compuestos líquidos y gaseosos, y un producto sólido estabilizado (*compost*) cuyo manejo, almacenamiento y utilización son seguros e inocuos para el ambiente y la salud del hombre (Keener et al. 1993, 1997; Tchobanoglous et al. 1993; Ghaly et al. 2006; Ahn et al. 2009). En la Figura 2.1 se presenta un esquema general de dicho proceso.

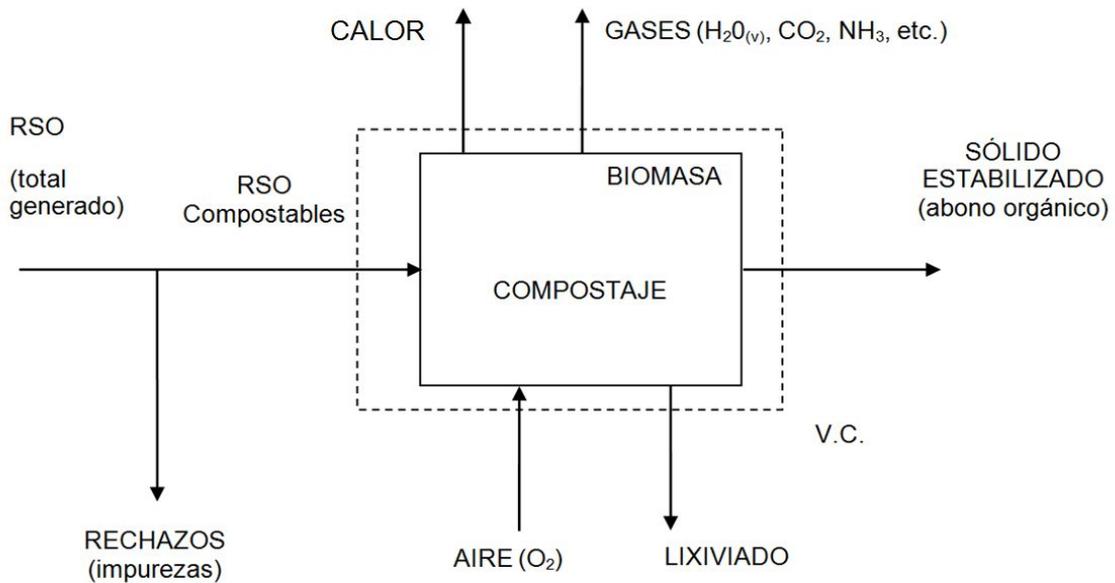


Figura 2.1 Esquema general del proceso (adaptado de Rynk, 1992). V.C.: volumen de control.

Los RSO compostables en su mayoría contienen una variada flora microbiana (biomasa), agua, minerales y alto contenido de materia orgánica (compuestos a base de C, H, O, N y S, proteínas y energía química) de distinta biodegradabilidad, es decir, con contenido variable de componentes fácilmente degradables (azúcares solubles y de bajo peso molecular, hemicelulosa y celulosa) y componentes de lenta degradación (ceras, ligninas y otros polifenoles). Como resultado del proceso de descomposición, en el sólido estabilizado estos componentes se encuentran en menor proporción (reducción másica), transformados algunos de ellos total y otros parcialmente. El volumen del compost obtenido es al menos un 50 % menor respecto del volumen inicial de los RSO tratados (Rynk 1992; Haug 1993; Tchobanoglous et al. 1993; Shah 2000).

En su conjunto el compostaje incluye una serie de pasos o etapas hasta la obtención del producto final como las que se presentan en la Figura 2.2, junto a algunos de los métodos más utilizados para la implementación del proceso.

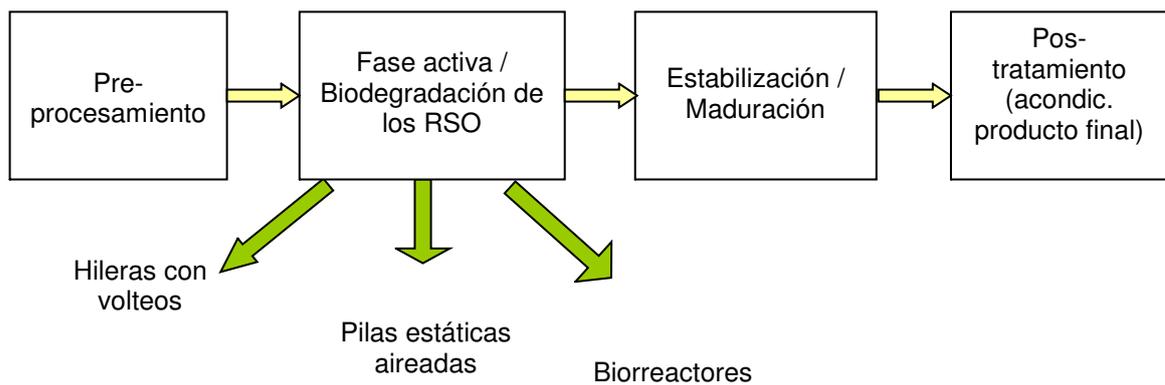


Figura 2.2 Identificación de etapas y alternativas técnicas del compostaje.

En la figura anterior puede observarse que el proceso comienza con un *pretratamiento o acondicionamiento* del sustrato fresco a compostar, en el cual se incluyen acciones tales como recepción de la corriente de RSO dentro de la planta, extracción gruesa de impurezas (restos de plásticos, vidrio, inertes), reducción de distintos tipos de RSO; a fin de lograr una mezcla con las características fisicoquímicas, biológicas y nutricionales adecuadas para desarrollar el tratamiento. A continuación en la *fase activa del proceso* – referida por numerosos autores como la más importante desde el punto de vista del diseño de las instalaciones (Keener et al. 1993, 1996, 1997, 2000, 2005; Marugg et al. 1993) y en la cual se centra esta Tesis –, se lleva a cabo la descomposición biológica del material ingresado, en

especial de la porción más lábil o fácilmente biodegradable, involucrando un período termofílico de reducción de patógenos y de semillas de malezas.

Un aspecto crucial del proceso es mantener condiciones aeróbicas a lo largo de toda su extensión, más aún durante la etapa térmicamente más activa ya que posee la mayor demanda de oxígeno. En tal sentido, existen diferentes técnicas de incorporación/renovación del oxígeno las cuales definen la metodología del compostaje a implementar. Estas son (Haug 1993; Tchobanoglous et al. 1993; Komilis 2006; Lavado 2012): 1) pilas estáticas aireadas, con aireación pasiva (convección natural y difusión) y/o sistemas de aireación forzada, que operan en forma positiva o negativa, a tasas de aireación constantes o variables, e intermitentes o continuas; 2) pilas o hileras con volteos, el mezclado del material se efectúa manual o mecánicamente, con el cual además de la oxigenación, se reduce su compactación, se redistribuye la porosidad y estructura en toda la masa, dando lugar a condiciones más homogéneas para la descomposición del sustrato; y 3) biorreactores cerrados, de configuración y geometrías muy variadas (torres verticales, horizontales, rectangulares, cilíndricos, etc.), cada una de las cuales tiene asociado un determinado nivel de tecnología, grado de mecanización, controles y costos, que permite adoptar la más apropiada a cada situación en particular, teniendo en cuenta los objetivos y escala de implementación (escala industrial, de laboratorio y/o piloto). En el Apéndice A pueden consultarse algunos detalles de las alternativas mencionadas así como una comparación entre éstas.

Posterior a la fase activa le sigue la *etapa de estabilización-maduración* del material, más extensa que la primera, en la cual se degradan o transforman las sustancias fitotóxicas (por ejemplo, el amonio que es tóxico es transformado a

nitratos), la mineralización de la materia orgánica continúa pero a tasas más lentas y disminuye la actividad microbiana. Al final de esta fase es posible dar por concluido el proceso, obteniendo un producto estable, inocuo e “inodoro”, que no atrae vectores, y cuya calidad depende fundamentalmente del material original (Mazzarino et al. 2012), así como de la pertinencia o eficiencia con que ha sido gestionado el proceso (Tognetti et al. 2007a, b). El tiempo requerido para alcanzar esta etapa es variable, depende entre otros factores de la velocidad de descomposición, las características del sustrato inicial y de la gestión del proceso, constituyendo en la actualidad un parámetro clave en el diseño y dimensionamiento de las plantas de compostaje (Komilis 2006).

Si bien los últimos conceptos mencionados (estabilidad, madurez y calidad) están relacionados entre sí, con frecuencia se confunden y utilizan indistintamente, por lo que resulta necesario definirlos con propiedad. La *estabilidad* está asociada al grado de descomposición de la materia orgánica biodegradable presente en los residuos (disminución del C degradable), y a la intensidad de la actividad microbiana. A mayor estabilidad, menor degradabilidad del material y actividad microbiana. La *madurez*, en cambio, se refiere a la ausencia de compuestos fitotóxicos en el compost que puedan afectar el crecimiento vegetal (Bernal et al. 1998a, b; Mazzarino et al. 2012). Cabe señalar que *la calidad* de un compost está definida por ambas, estabilidad y madurez, y por una serie de características que hacen a su valor como *enmienda* (mejorador del suelo) *y/o fertilizante* (aumento del rendimiento vegetal) para uso agrícola, u otro uso que se le pretenda dar al producto.

En el marco de estas definiciones, los *indicadores de estabilidad* se relacionan con determinaciones de materia orgánica lábil, materia orgánica estable e intensidad de la actividad microbiana. Los *indicadores de madurez* se basan en estudios de fitotoxicidad, directos en ensayos con plantas e indirectos a través de la determinación de productos potencialmente fitotóxicos como amonio, fenoles y ácidos grasos volátiles. Por su parte, la calidad como se mencionó antes depende del valor agrícola (y otros usos) y del cumplimiento de “criterios ambientales precautorios”, que incluyen valores límites de elementos y orgánicos trazas, patógenos, semillas viables de maleza e indicadores de estabilidad y madurez (Siebert 2007; Mazzarino et al. 2012); algunos de cuales han sido recogidos y adoptados en legislaciones europeas en países como Alemania, Italia, Francia, Inglaterra y Gales (Barrena et al. 2009). Cabe señalar que en diferentes revisiones sobre el tema (Bernal et al. 1998a, 2009; Rynk 2003; Barrena et al. 2009; Mazzarino et al. 2012), no parece que exista un único índice de estabilidad y madurez para todo tipo de material y de uso final del producto. Por otro lado destacan que no sólo es importante definir los rangos y/o valores límites para los distintos parámetros que se utilicen, sino que deben mantenerse en el tiempo durante la etapa de madurez, así como la necesidad de estandarizar las técnicas para su determinación. El principal desafío para identificar indicadores es lograr seleccionar aquellos que sean lo suficientemente representativos, y a la vez económicos y fáciles de medir en análisis de rutina, a fin de facilitar el aprovechamiento de los RSO disponibles en el país y desalentar su uso sin controles (Mazzarino et al. 2012). En la Tabla B.1 del Apéndice B se presentan a modo de ejemplo parámetros propuestos como indicadores de estabilidad, madurez y calidad utilizados mundialmente.

Finalmente durante el *postratamiento o acondicionamiento del producto obtenido* se incluyen acciones de clasificación granulométrica, trituración, limpieza final de impurezas, dosificación de aditivos, análisis complementarios para determinar la calidad y aptitud del producto para el uso seleccionado, fraccionamiento y envasado en sacos o bolsas, entre otros, dependiendo del uso final previsto.

2.2 Características del sistema reaccionante

Si se observa una porción de la masa de sustrato que se está compostando a nivel microscópico, se identifica un conglomerado o “arreglo” de partículas que forma una matriz porosa como la que se muestra en la Figura 2.3. Ésta representa un sistema trifásico constituido por una *fase sólida* que puede ser considerada como “*pseudohomogénea*”, pero que en realidad es una *mezcla sólida heterogénea*¹ (las partículas de sustrato), una porción de huecos que se encuentra ocupada en parte por una *fase gaseosa* (aire y otros gases), y el resto por una *fase acuosa* constituida por agua y otros compuestos disueltos, en la cual se encuentra dispersa la biomasa activa del proceso, que envuelve superficialmente las partículas del sólido y también ocupa espacios porosos (Sundberg 2005; Bongochgetsakul e Ishida 2008; Lin et al. 2008).

¹ Esta mezcla sólida es “heterogénea” debido a que puede estar compuesta por materiales de propiedades no uniformes en toda la masa de sustrato (e.g., de distinta biodegradabilidad). Sin embargo, dentro de cada uno de estos componentes pueden asumirse hipótesis de homogeneidad, y en conjunto para toda la fase sólida del sistema, de pseudo-homogeneidad.

Distintos grupos de microorganismos llevan adelante en la interfase sólido-líquido el proceso de degradación a través de un conjunto de reacciones bio-oxidativas tanto heterogéneas bifásicas como homogéneas con cambio de fase en los productos (ver Figura 2.4). Entre las principales reacciones involucradas se encuentran las de hidrólisis, hidrólisis enzimáticas, nitrificación y desnitrificación, y formación de sustancias húmicas.

La velocidad de degradación es proporcional a la superficie específica de las partículas del sustrato expuesta a la acción microbiana (Bueno et al. 2008a). Conforme avanza la descomposición biológica del material, moléculas grandes y complejas se reducen a otras más simples y de menor peso molecular. Fenómenos de transferencia de masa (vaporización, condensación del agua) y de energía (transporte de calor por convección, conducción y radiación) acoplados mediante la cinética del proceso, tienen lugar a veces en condiciones de control difusivos desde el punto de vista de la disponibilidad de O_2 . Si bien el proceso es exotérmico y predominantemente aeróbico, cierto porcentaje puede ser llevado a cabo en forma anaeróbica, dependiendo de su gestión y operación (Haug 1993).

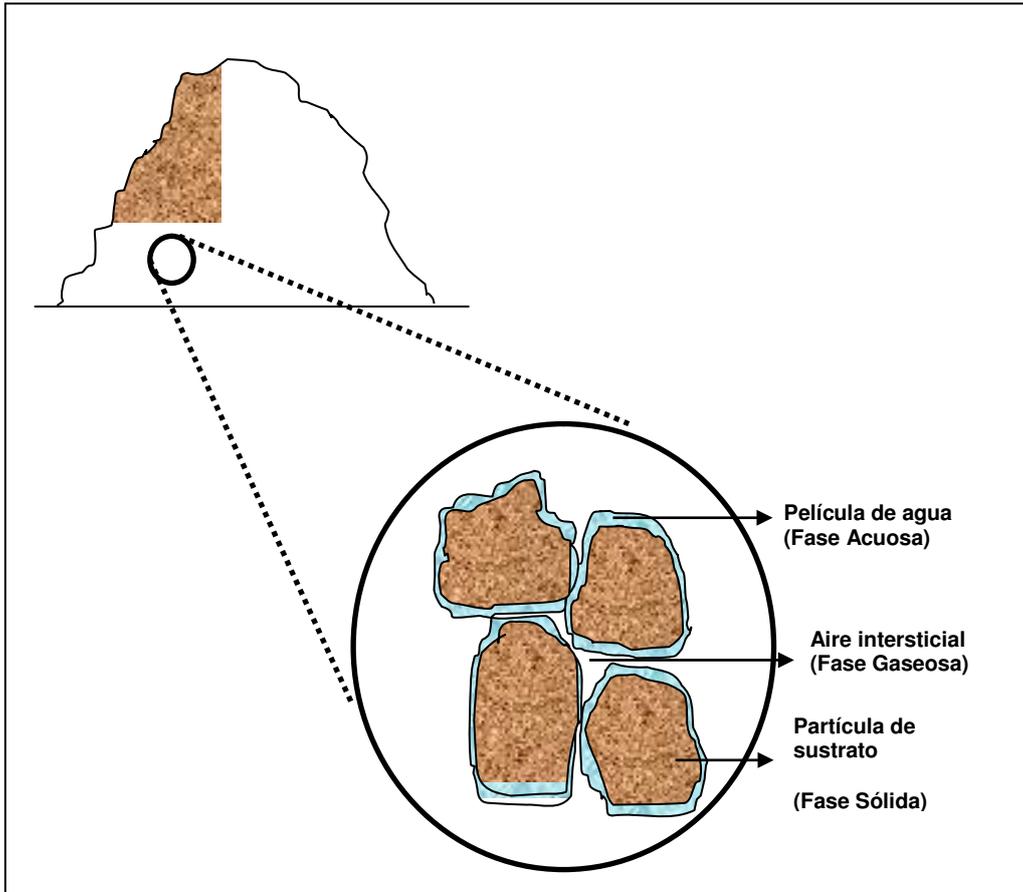


Figura 2.3 Conglomerado trifásico de partículas del sustrato.

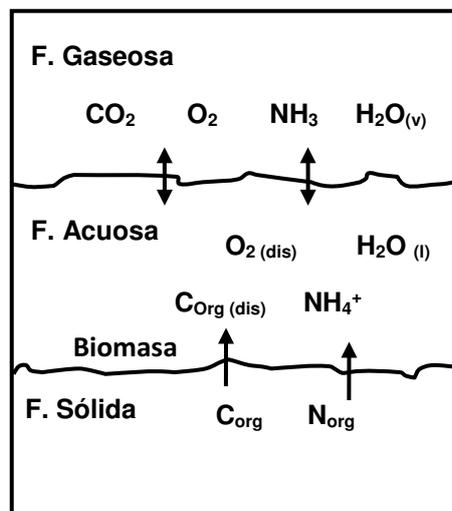


Figura 2.4 Ejemplo de principales procesos de transferencia másica en el compostaje.

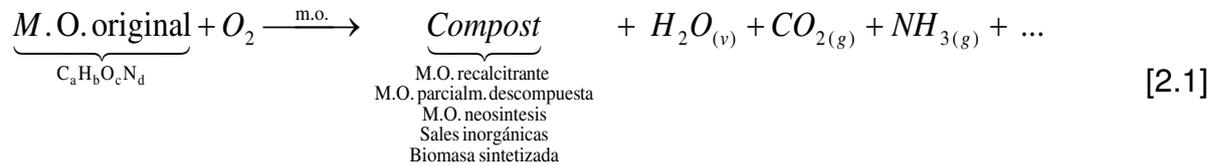
Como puede apreciarse la mayor parte del compostaje ocurre en condiciones no estacionarias o transientes, en lo inherente al sustrato como al ambiente circundante. Como resultado, por un lado se producen continuos cambios tanto en la composición del sustrato como en los gases emitidos y liberados a la atmósfera, y en el condensado (para el caso de sistemas cerrados) o lixiviado que se forme y, por el otro, se lleva a cabo la densificación del material contribuyendo a la reducción másica y volumétrica del sustrato inicial (Das & Keener 1997; Ghaly et al. 2006; Bernal et al. 2009). Recién cuando el material orgánico biodegradable (la fracción lábil del sustrato) ha reaccionado, el proceso alcanza condiciones de estabilidad biológica, y transcurrido un tiempo luego de verificar que el producto además de estable, sea maduro y posea la calidad buscada, se da por finalizado.

En la Tabla C.1 del Apéndice C se resumen los parámetros físicos, fisicoquímicos y biológicos más relevantes que frecuentemente son estudiados para el seguimiento de la evolución del proceso, dando cuenta de la multiplicidad de factores que intervienen en él y, consecuentemente, de la diversidad de criterios para su abordaje.

2.3. Estequiometría de la reacción

Debido a la complejidad de los “reactivos” involucrados en el compostaje, suele utilizarse la siguiente relación estequiométrica para representar simbólicamente la reacción de descomposición del sustrato, en términos de

reactivos y productos finales, (Tchobanoglous et al. 1993; Shah 2000; Ghaly et al. 2006):



$$\Delta H_{rxn} < 0$$

Donde:

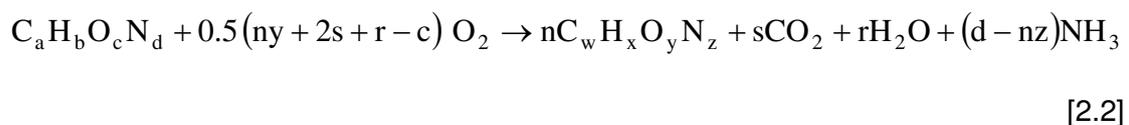
M.O. original (Materia Orgánica original) = Residuo orgánico fresco compuesto principalmente por carbohidratos, celulosa, hemicelulosa, proteínas, aminoácidos, lípidos y lignina;

Compost = Sólido remanente estabilizado;

m.o. = Biomasa microbiana contenida en el sustrato;

$CO_{(v)} + CO_{2(g)} + NH_{3(g)} + \dots$ = Gases secos y vapor de agua.

Dicha ecuación puede reescribirse tal como la presenta Haug (1993) en su trabajo con la siguiente expresión, de utilidad para el cálculo de los coeficientes estequiométricos respectivos:



Donde:

$$r = 0.5 \cdot [b - nx - 3 \cdot (d - nz)]$$

$$s = a - nw$$

Tanto la ecuación [2.1] como su versión equivalente [2.2] evidencian que la degradación del sustrato no es total o completa, sino que se obtiene al final del proceso un *producto sólido remanente o compost*, constituido por materia orgánica estabilizada, nueva biomasa sintetizada y una variedad de compuestos y sustancias (muchos de ellos que se van formando durante el compostaje y otros que provienen del material original), que le confieren valor agregado para usos posteriores. Entre ellos, compuestos lignocelulósicos, sustancias húmicas, agua, minerales y micro y macro nutrientes biodisponibles en forma de sales solubles o parcialmente insolubles (sulfatos, fosfatos, nitratos, carbonatos de Ca, Mg, K, etc.).

Por otro lado, como lo indica el valor de la variación de entalpía (ΔH_{rxn}), se trata de una reacción global de tipo exotérmica. De hecho se identifica al compostaje de RSO como un *“self-heating process”* o *“proceso de auto-calentamiento”* (Haug 1993; Petiot & de Guardia 2004; Haruta et al. 2005; Mason 2006; Hu et al. 2009; Zambra et al. 2011), haciendo referencia a la naturaleza exotérmica de las reacciones biológicas y químicas involucradas. Cuando éstas se producen, la energía contenida en los enlaces químicos de las moléculas se libera en forma de calor. Este calor generado, puede acumularse dentro de la masa y/o liberarse al ambiente circundante a través de distintos mecanismos de transferencia. De la energía que queda contenida en el sistema, una parte es utilizada para satisfacer las

necesidades energéticas del metabolismo microbiano e incrementar su propia biomasa, y otra para aumentar la temperatura del sustrato.

2.4 “Reactivos” y “catalizadores” del proceso

2.4.1 RSO: clasificaciones y características

Como se mencionó en el Capítulo 1, los RSO conforman una corriente de materiales provenientes de muy diversos orígenes o fuentes de generación. Cada tipo de residuo cuenta con propiedades físicas, químicas y biológicas particulares que se determinan en estudios de caracterización, aportándole un grado de heterogeneidad muy importante a la corriente global.

En el ámbito de los residuos sólidos existen dos tipos de análisis para obtener su caracterización. El denominado “*análisis próximo*” en el cual se determinan propiedades físicas, químicas y biológicas tales como contenido de humedad (usualmente en base húmeda), pH, densidad, tamaño y distribución de partículas, contenido de cenizas, sólidos volátiles, lignina, capacidad de campo, entre otros. Y por otro lado, el “*análisis último o elemental*” con el que se determinan fundamentalmente los contenidos de C, H, O, N y S, halógenos y cenizas, para el cálculo de la fórmula química del residuo, (Tchobanoglous et al. 1993).

Contando con dicha información derivada de los análisis, concretamente en el compostaje de RSO se distinguen tres categorías de desechos: *residuos principales a compostar o “raw material”, estructurantes o agentes de mezcla o “bulking agent”* y

los que actúan como *enmiendas* o *compensadores* o "*amendments*" (Rynk 1992; Haug 1993; Hu et al. 2009). Los primeros son los que cuentan con mayor contenido de componentes biodegradables, mientras que los segundos son de degradación más lenta, en general con poca humedad y de buena estructura, le aportan textura, estructura y porosidad a la masa. El tercer grupo se utiliza para balancear alguna propiedad que esté descompensada en el sustrato a procesar, como puede ser un exceso de humedad, pH o algún nutriente. Un ejemplo de "residuo principal" son los restos de comida, uno de "agentes de mezcla" los chips de poda o viruta y pertenecientes al último grupo paja picada o aserrín (absorben los excesos de humedad).

Debe mencionarse también la existencia de un cuarto grupo de residuos orgánicos identificados como "*no compostables*", considerados como tales por poseer alguna característica o elementos constitutivos que resultan inhibidores de la actividad microbiana, por lo que su incorporación al proceso se ve desaconsejada. Algunos ejemplos de éstos son orgánicos sintéticos, residuos de pinturas, aceites usados, ciertos barros provenientes del tratamiento de efluentes industriales con contenido de metales, materiales contaminados con biocidas, entre otros. En adelante, al hablar de RSO se hará referencia sólo a los "*desechos compostables*".

En la Tabla 2.1 se presenta a modo ilustrativo para un conjunto de RSO algunas propiedades físicas, químicas y biológicas, que dan cuenta de la heterogeneidad en las características de los materiales y sus posibilidades de mezclas.

Tabla 2.1 Propiedades físicas, químicas y biológicas de RSO usualmente utilizados en compostaje.

| Tipo RSO | Humedad (%, b.h.) | Densidad (kg · m⁻³, b.h.) | Nitrógeno (%, b.s.) | Relación C/N | Lignina (% SV, b.s.) | F. Biodegradable^(a) (% SV, b.s.) |
|--------------------------------|------------------------------|---|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--|
| Residuos de comida (mezcla) | 50 – 80 | 134,2 – 494,1 | 2,6 – 3,2 | 18,8 – 35,3 | 0,4 | 81,9 |
| Residuos de fruta | 60 – 90 | 256,2 – 772 | 0,9 – 2,6 | 20 – 49 | | |
| Residuos de vegetales | 60 – 90 | 207 – 720 | 2,5 – 4 | 11 – 13 | | |
| Periódicos | 3 – 8 | | 0,06 – 0,14 | 398 – 852 | 21,9 | 21,7 |
| Papel de oficina | | | | | 0,4 | 81,9 |
| Mezcla de papel | 4 – 10 | 43 – 134,2 | 0,2 – 0,25 | 127 – 178 | 5,8 – 7,1 | 63 – 66,7 |
| Residuos de jardín | 30 – 80 | 61 – 232 | 1,95 – 2,15 | 20,1 – 22,2 | 4,1 | 71,5 |
| Recortes de césped | 40 – 90 | 174 – 465 | 2 – 6 | 9 – 25 | | |
| Aserrín | 19 – 65 | 203,5 – 261,6 | 0,06 – 0,8 | 200 – 750 | | |
| Chips de poda o viruta | | | 0,04 – 0,23 | 212 – 1313 | | |
| Paja de trigo | | | 0,3 – 0,5 | 128 – 150 | 8,9 | 55,4 |
| Estiércol vacuno | | | 1,7 – 2 | 18 | 8,1 – 10,1 | 52,8 – 58,8 |
| Estiércol equino | 59 – 79 | 705,8 – 941,1 | 1,2 – 2,3 | 22 – 50 | | |

Adaptado de Rynk (1992); Haug (1993); Tchobanoglous et al. (1993) y Shah (2000). b. h.: base húmeda; b. s.: base seca; SV: Sólidos volátiles; L: Contenido de Lignina. ^(a) Fracción Biodegradable (Haug 1993; Tchobanoglous et al. 1993) estimada como: $FB = 0,83 - 0,28*(L)$.

Un concepto presente en el ámbito del compostaje sobre el cual no hay todavía un consenso general es el de “*masa crítica*”, entendiéndose por ella a la cantidad mínima de sustrato requerida para que el proceso se desarrolle en condiciones de auto-calentamiento, y posea la inercia térmica suficiente para desarrollar todas las etapas del mismo. En general, como se mencionará luego, este punto se ha estudiado desde una visión empírica, sin considerar por ejemplo que son fenómenos de transferencia de calor y de materia los que determinan esas masas mínimas.

Otro aspecto importante a considerar es la variabilidad temporal en la generación y disponibilidad que afecta a los RSO, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Esto se debe a que las actividades que les dan origen dependen a su vez de múltiples factores asociados a la economía local y regional, climáticos, geográficos, socioculturales, políticos, citando sólo algunos ejemplos.

En definitiva, las características de los RSO revisadas anteriormente revelan una complejidad adicional que debe tenerse en cuenta cuando se pretende modelar su degradación. Como se tratará en el próximo capítulo, existen propuestas de expresiones cinéticas más o menos complejas cuya “versatilidad y flexibilidad” está muy condicionada por los tipos de sustratos de alta variabilidad utilizados.

2.4.2. Biomasa activa

Como regla general, en microbiología suele afirmarse que los microorganismos simplemente se desarrollan donde encuentran un ambiente propicio para su crecimiento. Esto incluye contar con una fuente de provisión de

energía, micro y macro nutrientes para satisfacer el gasto que demandan sus metabolismos internos y la generación de más biomasa, además de un conjunto de factores ambientales para potenciar su desarrollo tales como pH, humedad, temperatura, disponibilidad de oxígeno y ausencia de inhibidores como antibióticos y condiciones extremas, etc. (Haug 1993; Tchobanoglous et al. 1993; Palmisano et al. 1996; Haruta et al. 2005).

Los RSO en la mayoría de los casos ofrecen un “ecosistema ideal” para el desarrollo de diversas poblaciones microbianas, y por ello suelen encontrarse totalmente colonizados por éstas, constituyendo “los catalizadores” del proceso. Sin entrar en detalle sobre el tema ya que excede a los objetivos del presente trabajo, puede comentarse que debido a las características del sustrato y las cambiantes condiciones fisicoquímicas a lo largo del proceso mencionadas, predominan sucediéndose en el tiempo conjuntos de especies de mesófilos y termófilos, heterótrofos (utilizan el C orgánico contenido en los RSO para su nutrición), aeróbicos estrictos y anaeróbicos facultativos. Bajo condiciones aeróbicas, la temperatura es uno de los principales factores que determina los tipos de microorganismos, la diversidad de especies y la velocidad de las actividades metabólicas presentes en el compostaje (Hassen et al. 2001), al tiempo de que las bacterias mesofílicas y termofílicas (que atacan sustratos más simples como los azúcares y almidones) son reconocidas como el grupo más importante de microorganismos en el período activo del proceso (Tchobanoglous et al. 1993; USEPA 1994; Palmisano et al. 1996; Tuomela et al. 2000; Hassen et al. 2001). Le siguen los actinomicetes (que metabolizan compuestos rápidamente disponibles y otros más complejos como la celulosa y hemicelulosa), y los hongos. Estos últimos

presentan una ventaja nutricional frente al resto de la biomasa, ya que desarrollan una actividad enzimática que les permite atacar compuestos más complejos y de difícil acceso, como los que poseen estructuras lignocelulósicas.

Por otro lado no debe dejar de señalarse que dentro del conjunto de microorganismos intervinientes, existe un grupo considerado como patógenos cuya presencia debe tenerse en cuenta en todo el ciclo del compostaje, en vistas a aplicar las medidas de higiene, seguridad y sanitación pertinentes que minimicen su potencial de causar daño y contaminación. En Tabla B.2 del Apéndice B se exponen los principales grupos de patógenos que con frecuencia son utilizados como *indicadores de calidad* del producto final.

Hasta este punto se han mencionado fundamentalmente a los denominados “*consumidores primarios*”, por ser quienes se alimentan directamente de la materia orgánica proveniente de los residuos. Intervienen también durante el proceso, especialmente luego de la etapa termofílica cuando aún la descomposición no es completa, macroorganismos (lombrices, ácaros de fermentación, cochinillas, caracoles, etc.) y otros considerados como “*consumidores secundarios*” y “*consumidores terciarios*” por alimentarse unos de otros según su posición en la cadena trófica, y ya no predominantemente de la materia orgánica original de los residuos. Entre estos últimos se encuentran las hormigas, ácaros predadores, rotíferos, protozoos, nematodos y gusanos planos de tierra, entre otros insectos pequeños.

2.5 Parámetros del proceso

El proceso de compostaje y la calidad del producto final se ven optimizados cuando se aseguran y mantienen a lo largo de toda su extensión condiciones adecuadas para el desarrollo microbiano, y esto depende en gran medida de la selección y combinación inicial de los RSO (Rynk 1992; Ghaly et al. 2006; Neklyudov et al. 2008). En la Tabla 2.2 se resumen los principales parámetros fisicoquímicos y los rangos que definen condiciones adecuadas de sustrato y de diseño del proceso de compostaje.

La mayor parte de los autores coinciden en considerar que la cantidad y calidad de la materia orgánica (carbono lábil, relación C/N), la humedad, el nivel de oxígeno (aireación), y la temperatura (ver desarrollo en el próximo punto) son las variables más importantes del proceso (Hamelers 2004; Ekinci et al. 2006; Bueno et al. 2008a, b). Cabe destacar que estos parámetros no sólo son *representativos del estado del sistema* en cada momento, sino que también son sencillos de determinar.

Otros nutrientes además del carbono (C) y el nitrógeno (N) tales como el fósforo (P) y el potasio (K) por un lado, y factores como el pH, la porosidad, textura, tamaño de partícula, estructura, *FAS* (Free air space), también determinan las características del sustrato afectando el desarrollo del compostaje. En el Apéndice C puede consultarse una breve descripción de la función dentro del proceso de cada uno de estos parámetros.

Por último debe señalarse que, más allá de que se establezcan inicialmente condiciones adecuadas, por la dinámica descrita del proceso se requiere monitorear y realizar determinaciones periódicas en los parámetros para poder

aplicar los ajustes necesarios (humedecimiento, adición de enmienda, necesidad aireación y/o de mezclado y volteos), para mantenerlas en todo momento dentro de los rangos apropiados.

Tabla 2.2 Parámetros fisicoquímicos y sus rangos recomendados para el compostaje.

| Parámetro | Valores aceptables | Rango sugerido | Referencia |
|----------------------------|---|--|--|
| Relación C/N | 20 – 50 /1 | 25 – 40 /1 | Tchobanougus et al. (1993); Shah (2000); Neklyudov et al. (2008) |
| pH | 5,5 – 9 | 6 – 8 | Shah (2000); Sundberg et al. (2008), Ramírez-Pérez et al. (2009) |
| Humedad (%, b.h.) | 40 – 70 | 50 – 60 | Keener et al. (1996, 2005), Das & Keener (1997); Sánchez-Monedero et al. (2001); Bueno et al. (2008a, b) |
| Tamaño de partícula (a) | 95 % pase la malla 1/2" ASTM (12,7 mm diám. poro) | > 50 mm (para RSO de escasa estructura) Entre 12 y 50 mm (estructura media) | Haug (1993); Tchobanougus et al. (1993); Bueno et al. (2008a, b) |
| Temperatura (°C) | 20 – 70 | 40 – 50 (degradac.), $T \geq 55$ °C (control patógenos) | Haug (1993), Tchobanougus et al. (1993); Tuomela et al., (2000) |
| FAS (%) | 20 – 35 | 30 – 35 | Haug (1993); Das & Keener (1997); Ahn et al. (2007); Alburquerque et al. (2008) |

(a) Depende del tamaño del sistema según la escala de trabajo (laboratorio, piloto o real) y de la estructura del material.

2.6 Importancia de la temperatura dentro del compostaje

Como se comentó en el apartado 2.3, la capacidad del sistema reaccionante de generar y liberar calor al entorno no es constante y fluctúa a lo largo del proceso. Cuando el calor generado en el sistema no es intercambiado o perdido totalmente, la parte acumulada contribuye a elevar la temperatura del sustrato. Dependiendo del tipo de aireación que se implemente, el tipo de superficie de intercambio que tenga con el ambiente circundante, y las diferencias de humedad y de temperatura entre la masa y el exterior que regirán los procesos de evaporación del agua, la temperatura irá cambiando en el tiempo, generando gradientes dentro del propio sustrato.

Las superficies de intercambio constituyen la frontera donde se establecen las “*condiciones de contorno*” del sistema. En función de cómo sean estas últimas, los sistemas se clasifican en “*abiertos*” y “*cerrados o adiabáticos*”. El primer grupo incluye aquellos en los cuáles el sustrato se encuentra expuesto y en contacto directo con el aire (e. g., pilas o hileras abiertas con o sin volteos), con mayores posibilidades de pérdidas de calor hacia el exterior. En el segundo grupo, el diseño contempla el uso de una cobertura aislante dispuesta sobre la superficie (casos de reactores aislados térmicamente y de las pilas estáticas con aireación forzada cubiertas), motivo por el cual las pérdidas de calor son reducidas. Ambos formatos impactan en la *distribución del calor dentro de la pila*. Y en consecuencia, también en el establecimiento de los perfiles de temperatura, afectando la eficiencia del proceso en su conjunto.

La temperatura másica es un parámetro fundamental dentro del compostaje (Yamada & Kawase 2006; Alexander 2007; Bongochgetsakul e Ishida 2008; Bueno et al. 2008a, b; de Guardia et al. 2012) y cumple al menos dos roles muy

importantes. Por un lado, es considerada como un *indicador de la actividad biológica*. En la bibliografía figuran numerosas expresiones que la vinculan con la constante cinética que rige la dinámica poblacional de la biomasa involucrada (Hamelers 2004; Bari & Koeing 2005a, b; Monsalve et al. 2005; Meima et al. 2008; Vlyssides et al. 2009) y, por lo tanto, con la velocidad a la cual ocurre la descomposición del sustrato. Dentro de ciertos límites, las reacciones bioquímicas duplican su velocidad por cada 10 °C de incremento en la temperatura (Haug 1993; Palmisano et al. 1996). Además, como se presentó en la Tabla 2.1, es uno de los parámetros para determinar la estabilidad biológica del compost obtenido.

En función de la evolución de la temperatura es posible distinguir cuatro fases dentro del compostaje (Haug 1993; Haruta et al. 2005; Shilev et al. 2007; Lavado 2012):

A) Etapa mesofílica inicial: Esta etapa puede comenzar con una *fase lag* en la cual se produce la adaptación de la biomasa al ambiente conformado por el sustrato, caracterizada por un crecimiento microbiano limitado y sin variaciones apreciables de temperatura. Dependiendo de las características del sustrato, en muchas ocasiones este fenómeno de aclimatación no se presenta (Haug 1993; Mason 2006), y arranca directamente un período de rápido incremento de temperatura, partiendo desde valores cercanos a la ambiental hasta alcanzar rangos termofílicos (40 – 50 °C). En total, esta etapa puede durar desde un día a varias semanas, dependiendo del tipo de residuo y condiciones de proceso;

B) Etapa termofílica: Constituye la fase de mayor actividad biológica, muy importante desde el punto de vista de reducción de patógenos y de semillas

de maleza (ver a continuación el segundo rol de la temperatura), y su extensión puede variar desde algunos días a varias semanas. Como resultado del incremento en las tasas de crecimiento microbiano, en la producción enzimática y las velocidades de reacción de las enzimas producidas (Richard et al. 2006), se alcanzan y mantienen con cierta fluctuación temperaturas en el rango termofílico. Éstas exceden el límite de tolerancia de los microorganismos mesofílicos, iniciando su actividad los termofílicos, que encuentran su mejor desarrollo entre los 45 y 55 °C (USEPA 1985). En principio ni la disponibilidad de alimento, ni el crecimiento microbiano son limitantes, pero sí lo es la difusión del oxígeno dentro de la interfaz sólida-líquida en las partículas de sustrato. Mediante aireación y/o humedecimiento de la masa debe procurarse que la temperatura no supere los 60 - 65 °C (algunos autores como Yamada & Kawase, 2006, proponen un límite de 70 °C), para prevenir el sobrecalentamiento del sustrato que elimine drásticamente la actividad microbiana, y afecte la tasa de descomposición del sustrato (Marugg et al. 1993; Hassen et al. 2001). Los requerimientos de aireación para remover el exceso de calor generado, pueden ser hasta 10 veces mayor al requerimiento de suministro de oxígeno (Rynk 1992; Haug 1993).

C) Etapa de enfriamiento (segunda mesofílica): La temperatura másica comienza a descender hasta estabilizarse en torno a la temperatura ambiente. La población microbiana sigue siendo abundante pero la disponibilidad de nutrientes es menor, limitando su crecimiento y actividad metabólica, por lo que junto con la temperatura disminuye la generación de CO_2 y el consumo

de O_2 , indicadores del inicio de la siguiente etapa;

D) Etapa de curado (estabilización biológica y maduración del sustrato):

Período de temperaturas estables y cercanas a la ambiente. La mayor parte de la fracción biodegradable y accesible fue mineralizada o transformada, los procesos continúan lentamente a temperatura ambiente, se forman sustancias húmicas, y se reducen las sustancias fitotóxicas. El sólido remanente se da por estabilizado biológicamente cuando se ha reducido la actividad microbiana o la materia orgánica fácilmente degradable por debajo de determinados límites. Se considera maduro cuando no hay efectos tóxicos para las plantas, y para confirmarlo se utilizan indicadores de fitotoxicidad (ver Tabla B.1, Apéndice B).

En la Figura 2.5 se ilustran las etapas descritas antes.

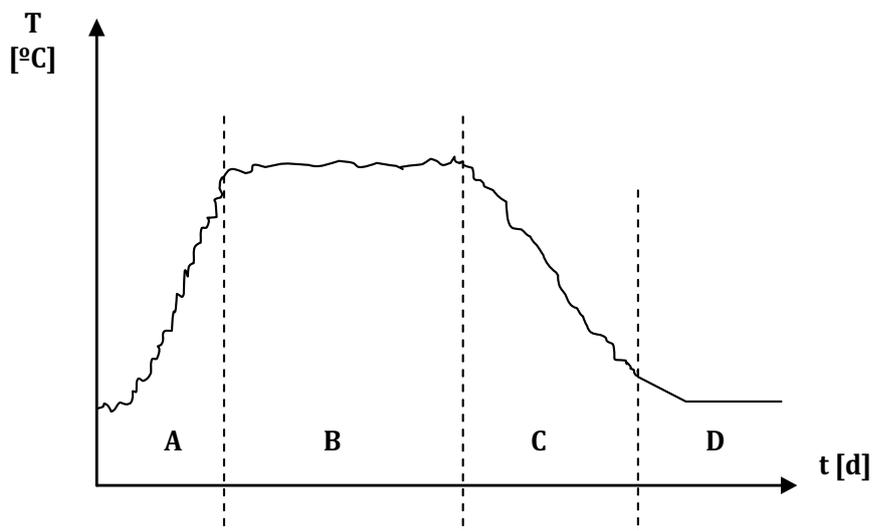


Figura 2.5 Evolución típica de la temperatura másica y etapas del compostaje.

Algunos autores identifican solo tres de las cuatro fases presentadas, considerando las últimas dos descriptas como una sola, tal es el caso de Hassen et al. (2001), Sundberg (2002), Ghaly et al. (2006) y Neklyudov et al. (2008).

Además de ser un indicador de la actividad microbiana, la temperatura tiene un segundo rol como *método de control y reducción de patógenos presentes en la masa de sustrato, reducción de la atracción de vectores y de eliminación de semillas de maleza*. Esta función tiene lugar durante la etapa termofílica antes mencionada, y reviste tal importancia que es incluida mundialmente en normativas y regulaciones en materia de gestión de RSU y vinculadas al compostaje de RSO. En el Apéndice B, a modo de ejemplo se presenta en la Tabla B.3 distintas temperaturas de referencia propuestas para reducción de patógenos en compostaje de biosólidos por EEUU (USEPA 1993), y para compost de residuos orgánicos por Alemania (BioAbfV 1998), Austria (ÖNORM S2220, 1993) y Suiza (Federal Standards “Minimum Quality”), estos últimos dos países tomados de Brinton (2000); mientras que en la Tabla B.4 del mismo apéndice, se presentan los requerimientos de temperatura para reducción de atracción de vectores en EE.UU. (USEPA 1993).

2.7 Producción de compost y usos más frecuentes

Una vez producido el compost, sus atributos físicos, químicos y biológicos (que le otorgan el grado de estabilidad, madurez y calidad al mismo) definirán sus posibilidades de uso. Por ejemplo, el pH y el contenido de sales (medido generalmente como conductividad eléctrica) son parámetros básicos que determinan

la posibilidad de uso como sustrato en la producción hortícola y ornamental (Mazzarino et al. 2012).

Dentro de los usos más frecuentes, se destaca el uso agrícola cumpliendo dos tipos de funciones:

Como enmienda: Se refiere por ley a la capacidad de mejoramiento de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo. En este aspecto es relevante el contenido de materia orgánica del compost que mejora todas estas propiedades, permitiendo reducir la erosión, incrementar la productividad de las plantas y la biomasa microbiana del suelo (Ferreira de Araujo et al. 2010); y

Como abono o fertilizante: Se refiere por ley al mejoramiento de la producción vegetal, y por lo tanto, a la capacidad de liberar nutrientes esenciales para la vegetación, tanto principales (N, P, K) como secundarios (Ca, Mg, Na y S) y micronutrientes como B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn (Laos et al. 2012). Esto permite reducir el uso de fertilizantes sintéticos, especialmente de N y P, de disponibilidad natural limitada (Mazzarino et al. 2012).

Además del uso agrícola en un sentido amplio (incluyendo producción frutícola y horticultura), otros destinos habituales son:

- Como reemplazo parcial de turba en la formulación de mezclas para sustratos de ornamentales, plantines forestales, fruticultura y producción hortícola en general que requiera etapas en contenedores (Rynk 1992; Fitzpatrick et al. 1998; Zubillaga & Lavado 2001; Valenzuela 2009);
- En restauración de suelos y paisajes degradados ya sea por causas

naturales o antropogénicas (Mataix Solera 1999; Risse & Faucette 2001; Kowaljow & Mazzarino 2007, 2012), restauración de bosques (Guerrero et al. 2001; Varela 2005, 2006; Satti 2007; Basil et al. 2009), biorremediación de suelos (Madejón et al. 2006; O'Dell et al. 2007; Branzini et al. 2009);

- En el restablecimiento de vegetación en banquinas y taludes de caminos (Curtis & Claasen 2009; Mazzarino et al. 2012) y la producción y mantenimiento de césped en jardines, canchas de golf, futbol, etc. (Johnson et al. 2006).
- Como cobertura intermedia o diaria en los sitios de disposición final de los RSU (rellenos sanitarios), sobre todo para compost producido a partir de material contaminado o con alto grado de impurezas tales como metales pesados, restos plásticos e inertes (Rynk 1992; Tchobanoglous et al. 1993).

2.8 Aspectos legales sobre RSO y compostaje

En el capítulo 1 se comentó la compleja problemática derivada de la gestión de los RSU y en especial la relacionada a la fracción orgánica de éstos, destacándose las dificultades y costos que causan cuando se disponen en un relleno sanitario (generación y tratamiento de lixiviados, GEIs, etc.), y más aún los problemas sanitarios y ambientales que ocurren cuando son dispuestos en diferentes sitios en forma no controlada. Ante esta situación, el aprovechamiento en

agricultura de los RSO es objeto de políticas de regulación y control a nivel mundial, por ejemplo, EE.UU. y la Unión Europea (UE) limitan la cantidad de materia orgánica depositada en vertederos, y establecen normativas que regulan diferentes aspectos en relación a los RSO, el compostaje y su aplicación en suelos (Elementos Potencialmente Tóxicos o metales pesados, Contaminantes Orgánicos Persistentes, reducción de patógenos y de atracción de vectores, tasa de aplicación de N, etc.), y mantienen en discusión permanente los límites ya establecidos, reduciendo algunos o reglamentando nuevos (Laos et al. 2012). Incluso países latinoamericanos como Chile tienen una norma (la NCh2880.c2003, “Compost clasificación y requisitos”) basada en las normas AS 4454-1999 “Compost, Soil Conditioners and Mulches” (Australian Standard 2003), la NF U44-095 Norme Francaise “Amendements Organiques. Compost contenant des matieres d’intéret agronomique” (AFNOR 2005) y antecedentes técnicos nacionales, que regula entre otros aspectos, los requisitos de la materia prima y del producto compostado.

En nuestro país, si bien Argentina cuenta desde el año 2004 con la *Ley N° 25.916 de Presupuestos Mínimos de Gestión Integral de RS Domiciliarios* (reglamentada a través del *Decreto 1158/04*), y desde 2005 con la citada Estrategia Nacional de Gestión Integral de RSU (ENGIRSU) que *promueve al compostaje como tecnología de valorización de la fracción orgánica*, a la fecha esta normativa no ha sido reglamentada ni complementada con otras brindando especificaciones, por ejemplo, de los tipos de RSO valorizables, condiciones de procesamiento, etc.

No se ha desarrollado aún una política nacional que promueva el reciclaje y la recuperación de la materia orgánica para uso en agricultura. Los abonos orgánicos (estiércoles) son utilizados empíricamente por productores agropecuarios o con el

apoyo de programas implementados por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) o Ministerios provinciales relacionados. En el caso de los RSO domiciliarios, el compostaje es practicado sin regulaciones por municipios del país (Laos et al. 2012). En cuanto a los biosólidos, la Secretaria de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental (SDSyPA) dependiente del Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente de la Nación, a través de la Resolución 097/01 y sus Anexos (1 al 5) aprueba el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos (MDSyMA 2001). Esta normativa excluye lodos según su origen y contenido de determinados compuestos según la Ley N° 24.051 de Residuos Peligrosos. Para su uso en agricultura, en el caso de compostaje, considera que no hay restricciones si se cumplen las condiciones de proceso de la USEPA, y exige además determinaciones de patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Ascaris* e indicadores virales. Sin embargo, su ámbito de aplicación está restringido a las áreas de prestación de servicios de agua y cloacas concesionadas por el gobierno nacional, centradas en el área metropolitana bonaerense y su entorno rural inmediato (Laos et al. 2012).

Por su parte, el SENASA (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agro-Alimentaria Argentina), dependiente de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación, es el organismo que regula la utilización de enmiendas y fertilizantes a través de la Ley N° 20.466 de “Agroquímicos, Fertilizantes, Enmiendas y Registros” del año 1973, y sus decretos reglamentarios y modificatorios. En ella establece la obligatoriedad del registro de fertilizantes y enmiendas en la República Argentina y fija el marco regulatorio a nivel nacional y las normas para la fiscalización de la comercialización de éstos. Sin embargo,

nuevamente en relación al compostaje no aporta parámetros que regulen las materias primas, el proceso y/o el producto final y sus usos. En el año 2010 el SENASA puso a consideración pública el *Proyecto de Ley “Reglamento para el Registro de Fertilizantes, Enmiendas, Sustratos, Acondicionadores, Protectores y Materias Primas en la Republica Argentina”*. En el Apéndice D, se adjunta la contribución personal elaborada ante el llamamiento público a opinar sobre dicho proyecto de Ley, donde se destacan las importantísimas falencias que presenta al centrarse en el producto final, dejando de lado aspectos claves que hacen al desarrollo del proceso en su conjunto. Por ejemplo, establecer cómo lograr la reducción de patógenos buscada, especificar grados de calidad exigibles a las materias primas y al producto final en función del uso posterior que se realice del compost, definir los usos posibles, protocolos y técnicas sencillas y confiables para determinación de parámetros característicos, etc. *Finalmente esta ley fue aprobada en el año 2011, y en contraposición con los principios establecidos tanto en la Ley de Presupuestos Mínimos mencionada como en la ENGIRSU, prohíbe la inscripción de compost elaborados a partir de RSU y, para compost de biosólidos “que hayan sido obtenidos a partir de procesos registrados”, establece que “la inscripción podrá ser evaluada a través de auditorías efectuadas por funcionarios de este organismo, con el fin de definir la factibilidad de su autorización”.*

La provincia de Santa Fe, por su parte, a través de sus Leyes Orgánicas de Municipios y Comunas (Ley N° 2.756 y N° 2.439, respectivamente), determina que el estado local (municipio o comuna) es el propietario y responsable de los RSU una vez que éstos son dispuestos en la vía pública, debiendo asegurar su gestión en forma adecuada. La recientemente promulgada Ley 13.055 de Basura Cero de

diciembre de 2009, plantea que en la reglamentación se establecerá un cronograma de reducción progresiva de la cantidad de residuos depositados en rellenos sanitarios, la prohibición de la disposición final en relleno sanitario de materiales tanto reciclables como aprovechables para el año 2030, y menciona al igual que en la ENGIRSU al compostaje como uno de los métodos de valorización de RSO, pero no brinda mayores especificaciones ya que aún no se encuentra reglamentada.

En definitiva, la falta de normativas nacionales y locales específicas sobre el manejo de residuos orgánicos a través del compostaje, contribuye a que esta tecnología no se termine de consolidar como tal en nuestro país. Como cualquier otro producto, está claro que si se pretende comercializar el abono orgánico y/o darle determinados usos, se debería contar con la autorización de organismos oficiales que aún no tienen en claro las exigencias a solicitar. Esto genera un desconcierto muy importante tanto en los operadores de RSU y elaboradores de enmiendas, como en los laboratorios de análisis, promoviendo indirectamente su uso sin control. En otras palabras, el establecimiento de normas de calidad en función de usos específicos contribuiría a garantizar la homogeneidad del producto, un aspecto generalmente descuidado en la producción de compost que termina limitando su aceptación en el mercado (Cooperband 2000).

Capítulo 3

Revisión del

Estado del Arte

Capítulo 3: Revisión del Estado del Arte

3.1 Introducción al modelado del compostaje

En el capítulo 2 se describió el compostaje en sus diferentes aspectos, destacándose su naturaleza compleja en términos de la interrelación y simultaneidad de los procesos fisicoquímicos y biológicos involucrados. En este contexto surge su modelado basado en postulados clásicos de la ingeniería (balances de materia y energía, relaciones estequiométricas y cinética), como una herramienta útil y de relativo bajo costo (Keener et al. 1993, 1997; Das & Keener 1997) que permite entender mejor, aunque en forma aproximada (son una simplificación de la realidad), los mecanismos acoplados y provee el marco necesario para el diseño racional a escala real del proceso (Higgins & Walker 2001; Lynch et al. 2006).

En el presente capítulo, se define mediante el análisis de la bibliografía la “línea de base o de partida” del conocimiento actual sobre estos temas, para luego evaluar el grado de avance en la misma a partir de las contribuciones que se deriven de esta Tesis.

Desde los primeros trabajos en el tema que aparecieron en la literatura en 1976 (Mason & Milke 2005b), la variedad en el grado de rigurosidad con que ha sido abordado es muy amplia, abarcando desde modelos simplificados de resolución analítica, a los más complejos en 1-D y 2-D que requieren métodos numéricos para su solución, tales como el de diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos, entre los más utilizados (Moraga et al. 2009).

El abanico de posibles aplicaciones que brinda el modelado ha potenciado su

desarrollo, lo cual se ve reflejado en el creciente interés suscitado en los grupos de investigación en los últimos años. Hoy en día es posible encontrar en la bibliografía numerosos ejemplos donde a partir de modelos propuestos se realizan diferentes tipos de análisis, como por ejemplo, sobre los efectos de distintos escenarios de operación en la cinética, condiciones de homogeneidad en el sustrato y costos asociados al proceso (Keener et al. 1993, 1997; Das & Keener 1997; Bongochgetsakul e Ishida 2008), entre otros que serán expuestos a lo largo de este capítulo.

Debe señalarse que la mayoría de los modelos tienen una concepción *macroscópica o global* de los fenómenos de transferencia de materia y energía y no analizan las distribuciones espaciales que tienen lugar (Bongochgetsakul e Ishida 2008), mientras que algunos trabajan a nivel más detallado como lo presentan Hamelers (1993, 2001) y Petric (2008).

De una amplia revisión de los modelos publicados que predicen la temperatura, se observa que en su gran mayoría están desarrollados para sistemas de compostaje de pilas estáticas con aireación forzada, no aplicables a los casos con volteos. Estos modelos utilizan parámetros que describen sistemas a escala laboratorio y/o piloto, y la validación de los mismos (cuando ésta se lleva a cabo), es realizada contrastando valores predichos de las variables analizadas con datos experimentales obtenidos de ensayos realizados en dispositivos de similar escala y que operan en condiciones totalmente controladas. Eventualmente, en trabajos más recientes como los de Moraga et al. (2009) y Zambra et al. (2011), se validan modelos con datos provenientes de procesos de compostaje llevados a cabo a escala industrial, siempre considerando la metodología de aireación forzada. De

Guardia et al. (2012) concluyen en su último trabajo la necesidad llevar adelante futuras investigaciones con sistemas de aireación diferentes, como por ejemplo los de volteo manual.

En cuanto a la capacidad predictiva de los modelos, Sundberg (2005) indica que ningún modelo ha mostrado una aceptable capacidad de predicción para la temperatura, en cambio muchos ajustan bien la degradación del sustrato medida como la pérdida de masa de sólidos totales o de sólidos volátiles. La mayoría de los modelos matemáticos desarrollados, si bien han podido simular con bastante éxito la forma “genérica” de los perfiles de temperatura, no han logrado aceptables grados de precisión en cuanto a la predicción y verificación experimental de parámetros claves y de importancia ingenieril tales como los picos de temperatura y el tiempo requerido para alcanzarlos (Mason 2009). Lo mismo ocurre con otras variables (contenido de agua, masa de sustrato, gases formados, etc.), cuyos valores predichos simulan las evoluciones temporales pero no siempre se correlacionan cuantitativamente con los datos experimentales (Mason & Milke 2005b).

3.2. Validación, análisis de sensibilidad y optimización de los modelos

Sundberg (2005) en base a una amplia revisión de la bibliografía, concluye que son escasos los trabajos publicados que incluyen la *validación de los modelos* con un espectro amplio de datos experimentales obtenidos en diferentes condiciones.

En cuanto al *análisis de sensibilidad de los modelos*, si bien es valorada como

herramienta ya que admite múltiples aplicaciones y permite obtener información de sumo interés de la fiabilidad de los mismos, ha tenido un desarrollo limitado en el ámbito del compostaje y merece mayores estudios e investigación (Mason & Milke 2005b). Uno de los ejemplos corresponde a Higgins & Walter (2001), quienes lo utilizaron para conocer la robustez de su modelo, la sensibilidad de los parámetros claves seleccionados, así como para determinar donde es probable que ocurra el error de propagación. Petric & Selimbašić (2008) realizaron también un análisis de sensibilidad sobre la totalidad de los parámetros de su modelo, y así determinaron cuáles influyen más sobre las características del proceso, en términos de máxima tasa de conversión del material orgánico, máxima concentración de CO_2 y máxima temperatura del sustrato.

Por su parte, el término *optimización* dentro del compostaje hace referencia, por lo general, a la disminución de los tiempos de proceso hasta alcanzar un producto final dado, o a obtener uno de mejor calidad (con conservación de nutrientes, reducción del grado de impurezas mediante distintos pretratamientos y ausencia de sustancias fitotóxicas), generado en condiciones ambientalmente controladas (minimización de la generación de olores y polvo, control de vectores, etc.), y al menor costo posible (construcción y operación, uso de energía, conservación de recursos, entre otros). En este contexto se distinguen dos formas bien diferenciadas de abordaje de este problema.

Un primer enfoque se basa en realizar modificaciones experimentales *sobre el proceso*, variando ciertas condiciones de materia prima o de operación (e.g., combinaciones de sustratos, tasas de aireación), para comparar luego sus efectos sobre la calidad del producto final o sobre los tiempos del proceso, y definir qué

medidas mejoraron la eficiencia del proceso y en qué magnitud. Así por ejemplo Hansen et al. (1989, 1993) y Tognetti et al. (2007b) coinciden en que la frecuencia de los volteos, el tamaño de partícula, y las características químicas y físicas de la mezcla original tienen un gran efecto en la conservación del nitrógeno (lo que valoriza aún más su potencial uso agronómico). Un segundo enfoque, complementario del primero, es el que trabaja con algoritmos computacionales específicos, que definen una función objetivo (de minimización o maximización) *sobre algunas de las variables del modelo* a optimizar. Petric & Selimbaic (2008), por ejemplo, utilizan el método de optimización de Rosenbrock para la estimación de parámetros de su modelo, y a través del método de Runge-Kutta-Fehlberg con aproximación de 4^o y 5^o orden y ajuste del paso de iteración, resuelven numéricamente un sistema de 12 ecuaciones diferenciales que simulan la dinámica del proceso implementado con aireación forzada, en sus tres fases (sólida, líquida y gaseosa), verificándolo en condiciones controladas de laboratorio. Keener et al. (1993, 1996, 1997) estudiaron la optimización del diseño y minimización de los costos operativos de plantas de compostaje incluyendo en su modelo la densidad del compost, condiciones ambientales del aire, altura de la pila, y procesos de operación tales como volteos con o sin disminución de la altura de la masa. En el primero de los trabajos desarrolla un sistema de ecuaciones para representar el compostaje de pilas estáticas aireadas, que luego es tomado como base para el segundo trabajo donde estudia el esquema de volteos óptimo para controlar la humedad. Sin embargo, cabe señalar que el autor además de trabajar solo a nivel teórico (e.i., simula distintas condiciones sin presentar datos experimentales ni describir una fase experimental), no realiza ninguna modificación ni adaptación del

modelo original al caso con volteos, manteniendo términos que incluyen flujos de aire, humedad y entalpía contenidos en el aire que ingresa y que sale los cuales, operando con sistemas abiertos con volteos, serían muy difíciles de mensurar para una posible aplicación y validación experimental del modelo a dichos sistemas. Este mismo autor en trabajos más recientes (2000, 2005), junto a Ekinci et al. (2004a), desarrollaron ecuaciones para minimizar el área requerida por unidad de compost procesado y resolvieron las ecuaciones para varios materiales en escala piloto. Ekinci et al. (2004c, 2005) utilizaron además su modelo para evaluar la potencia empleada para aireación forzada como función del grado de maduración deseado del compost para varias configuraciones, cuantificando las ventajas de bajas tasas de aireación para reducir los costos variables del sistema, y validando los resultados de su modelo con datos de experimentos llevados a cabo en forma controlada a escala piloto. Abordajes similares se pueden encontrar en los trabajos de Das & Keener (1997), Ekinci et al. (2006), Smars et al. (2002) y Sundburg (2005), entre otros, todos ellos también modelando sistemas con aireación forzada.

En el Apéndice E se presentan en la Tabla E.1 los principales trabajos encontrados en la bibliografía sobre modelado del compostaje y las características con que fue desarrollado (tipos de balances, cinética, simulación, análisis de sensibilidad, validación y optimización de los modelos).

3.3 Balances de materia

Ekinci et al. (2005) desarrollaron un modelo en 2D basado en balances de

materia y energía acoplados, que permite estudiar distintas estrategias de aireación en pilas de compostaje con aireación forzada, y analizaron la temperatura, la masa de agua, de sustrato (medida como sólidos totales) y la concentración de O_2 . Respecto del contenido de agua, indican que tuvieron un buen ajuste durante los primeros 7 días de proceso, con diferencias del 1 al 2 % entre los valores predichos por el modelo y los medidos experimentalmente a escala industrial en las capas medias de la pila, pero no así para las de los bordes (inferior y superior) que se vieron afectados por efectos de secado y condensación. Similares resultados habían obtenido Das & Keener (1997). Ekinci et al. (2005) señalan por otro lado que a pesar de obtener con 60 % de humedad la máxima tasa de descomposición del material, hubo mayores requerimientos de energía que elevan los costos de aireación. En cuanto al O_2 informan que el modelo predijo con precisión el rango de concentraciones medido experimentalmente. En cambio, para la masa del sustrato indican que los perfiles de degradación simulados difieren de lo medido experimentalmente.

Por su parte, Mason (2006) en una revisión donde analiza diversos trabajos de modelado concluye que, en términos generales, los perfiles de humedad y de concentración de sólidos logran predecirse en forma adecuada, mientras que el modelado de otros componentes como las tasas de consumo de O_2 o de evolución de CO_2 muestran grandes discrepancias con los datos medidos (e.g., en un trabajo de Higgins & Walker 2001, el rango de error era del 2 al 285 %), requiriéndose mayores esfuerzos de modelado en futuros trabajos. Yamada & Kawase (2006) modelaron el consumo de O_2 mediante una ecuación tipo Monod y representaron la

distribución axial de su concentración a través de un modelo de flujo pistón. Sus ecuaciones pudieron simular satisfactoriamente los datos medidos con una desviación promedio del 7,4 % para la tasa de consumo máximo de O_2 (determinada a partir de la concentración de O_2 en entrada y salida de los gases, el caudal de aire inyectado, la masa de sólidos secos en el reactor y parámetros constantes del modelo); una vez más, tratándose de sistemas con aireación forzada y en condiciones totalmente controladas de operación.

Trabajos más recientes como el de Moraga et al. (2009) presentaron un modelo matemático 2D que incluye términos de difusión de calor en estado no estacionario, y uno 1D para la concentración de O_2 en un medio poroso, resolviéndolo numéricamente con el método de volúmenes finitos. Simularon sistemas de compostaje de pilas estáticas con aireación forzada, a escala industrial con diferentes tamaños de pilas y geometrías, validando experimentalmente su modelo solo para la temperatura global ($T(t)$) a distintas profundidades de la pila. Respecto de la distribución del O_2 en el interior de la pila, de sus resultados estrictamente numéricos concluyen que ésta depende de la geometría y tamaño (altura máxima) de la pila, y que los descensos en la concentración de O_2 se corresponden con los incrementos de la temperatura en el sustrato. En su misma línea de trabajo, Zambra et al. (2011) agregan al modelo presentado por Moraga et al., el modelado en 1D de la humedad. Según estos autores los resultados de su resolución numérica les permitieron reproducir los datos experimentales para el contenido de agua, el calor y el oxígeno. Señalaron que la concentración del O_2 tiende a decrecer con el tiempo, y que el contenido de agua en la parte superficial y

sub-superficial de las pilas es más influenciado por las condiciones atmosféricas externas que en el centro de la pila.

Como puede observarse, el modelado de los balances de materia para los distintos componentes del sistema ha sido estudiado con diferentes grados de aproximación y utilizando la modalidad de pilas estáticas con aireación forzada. Se destaca la importancia que reviste el modelado del oxígeno como variable crucial en todo proceso de compostaje que pretenda ser aeróbico, así como la necesidad de realizar mayores esfuerzos en el modelado de sistemas que contemplen otros medios de aireación, como por ejemplo los volteos periódicos, que hasta la fecha han sido escasamente abordados.

3.4 Cinética de degradación del sustrato

La cinética dentro del modelado del compostaje cumple un rol fundamental ya que de ella se obtiene luego, entre otras cosas, el término de generación de calor así como el de la eficiencia en la reducción másica alcanzada durante el proceso. Tres elementos básicos la definen: el orden de reacción, la constante cinética y la concentración de los reactivos intervinientes (sólidos totales degradables, oxígeno). A continuación se presentan los principales antecedentes en dichos componentes.

Del orden de reacción

La mayor parte de los autores dedicados a este tema, asumen que el período de estudio de mayor interés es el inicial (que puede extenderse desde las primeras horas a varias semanas), por ser el de *mayor actividad biológica*, y que puede representarse mediante una cinética global de 1º orden (Kaiser 1996; Das & Keener 1997; Higgins & Walter 2001; Nakasaki & Ohtaki 2002; Bari & Koeing 2005a, b; Keener et al. 2005; Monsalve et al. 2005; Richard et al. 2006; Yamada & Kawase 2006; Ahn et al. 2007; Mudhoo & Mohee 2007; Ramírez-Pérez 2007; Bueno et al. 2008a, b; Mason 2008, 2009; Vlyssides et al. 2009; entre otros). También hay un acuerdo en que a medida que avanza el proceso, pierde validez esta hipótesis de 1º orden debido fundamentalmente a una disminución en la actividad microbiana (Marugg et al. 1993; Sundberg 2005). Unos pocos autores tales como Petric & Selimbaic (2008) y Briški et al. (2007), han presentado órdenes de reacción superiores con valores entre 1,8 y 2,89 que, si bien *matemáticamente* logran que sus modelos ajusten a sus datos experimentales para un período máximo de 14 días de proceso, superada la etapa mesofílica y termofílica inicial, *físicamente* resultan muy difíciles de justificar. Así mismo, en análisis previos sugieren que las discrepancias no son necesaria ni exclusivamente debidas a un cambio en el orden de reacción, sino que también aparecen posibles cambios en los valores de las constantes cinéticas a lo largo de las distintas etapas del proceso.

El estado del arte en el tema desarrollado en la presente sección, deja en evidencia que no se encuentran trabajos que modelen la cinética a corto y largo plazo dentro del proceso, y que con fundamentos físicos y matemáticos incorporen en sus modelos los sistemas con volteo.

De la constante cinética

Debido a la naturaleza propia del compostaje, es importante señalar que en el modelo de 1° orden planteado, la constante cinética que figura *no es del tipo intrínseca* sino que se trata de una *constante global* o *aparente* (k_G), también denominada *constante de pseudo 1° orden*, ya que en ella quedan incluidos un conjunto de parámetros característicos tanto del sustrato como del proceso de los cuales depende la velocidad de descomposición del material.

En una revisión del tema realizada por Mason & Milke (2005b), se publican valores de k_G en el rango entre 0,002 y 0,15 d^{-1} . Si se tienen en cuenta temperaturas termofílicas entre 50 y 60 °C, según Keener et al. (1993) puede situarse entre 0,025 y 0,190 d^{-1} . Si se evalúa en cambio en función del tipo de residuo utilizado, algunos años más tarde este mismo autor sugiere valores de 0,024 a 0,083 d^{-1} para la fracción orgánica de los RSU y entre 0,16 y 0,248 d^{-1} para residuos verdes o de jardín compuestos de recortes de césped fresco, restos de poda chipeados, etc. (Keener et al. 1997).

Indudablemente, las constantes simplificadas resultan sumamente útiles para simplificar los diseños, a costa de la pérdida de información detallada que se genera en su aplicación. Por esta razón, y siempre tratando de obtener *ecuaciones aplicables a condiciones reales*, diversos autores proponen, complementariamente al uso de constantes globales, el agregado de *funciones matemáticas de corrección* que se aplican a la constante global y que consideran los efectos de otros parámetros. La mayoría de estas funciones son empíricas y unas pocas teóricas como por ejemplo la *ley de Arrhenius* para la temperatura. Los principales

parámetros y combinaciones de éstos que se consideran con frecuencia son: la temperatura (Robinzon et al. 1999; Trémier et al. 2005; Nelson et al. 2007; Mason 2009), temperatura y humedad (Bari & Koenig 2005a, b; Briški et al. 2007), temperatura y oxígeno (Kaiser 1996; Lin et al. 2008), temperatura, agua y O_2 (Higgins & Walter 2001; Monsalve et al. 2005; Mason 2008; Vlyssides et al. 2009), los tres parámetros anteriores y el *FAS* (Ekinci et al. 2005; Xi et al. 2006; Petric & Selimbaic 2008). En menor medida se aplican el diámetro de partícula, la relación C/N , pH , entre otras. Podrían considerarse también el tipo y grado de biodegradabilidad del sustrato, la población microbiana, la superficie externa de las partículas de material expuesta a ésta y la composición de la atmósfera intersticial (O_2 , NH_3 , etc.). En este marco, muchos autores asumen un *modelo multiplicativo de efectos*, representado en la siguiente expresión:

$$k_G(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_{m\acute{a}x.} * f_i(x_i) = k_{m\acute{a}x.} * f_1(x_1) * f_2(x_2) * \dots * f_n(x_n) \quad [3.1]$$

Donde $k_{m\acute{a}x.}$ es la tasa de degradación en condiciones óptimas, f_i es cada una de las expresiones de corrección, y x_i los factores considerados. En la Tabla 3.1 se presentan algunos ejemplos de funciones de corrección aplicados a la k_G mientras que en el Apéndice F se completa en la Tabla F.1 un listado de estas expresiones encontradas en la bibliografía. Más ejemplos pueden consultarse en un trabajo de Haug (1993), donde presenta modelos de simulación para reactores tipo

batch trabajando con biosólidos y aserrín, asumiendo una cinética de 1^o orden.

Otros autores, como Keener et al. (1996), Das & Keener (1997) y Ekinci et al. (2004a, b, c, 2005) desarrollaron modelos para predecir la cinética del proceso de compostaje teniendo en cuenta gradientes espaciales de temperatura y humedad. Ekinci et al. (2005) continuaron con la línea de Haug y le incorporaron la temperatura, humedad, nivel de oxígeno y la porosidad dentro de un modelo de descomposición de primer orden. Con ello investigaron los efectos de la recirculación y/o reversibilidad de las corrientes de aire sobre la humedad, temperatura y perfiles de descomposición en el sistema. En el caso de Das & Keener (1997) estos validaron su modelo con datos de una planta comercial de compostaje operando con una mezcla de biosólidos, corteza y aserrín. En los restantes trabajos mencionados (Keener et al. 1996 y Ekinci et al. 2004a, b, c, 2005), los resultados de los modelos fueron validados con datos de experiencias realizadas en reactores a escala piloto en condiciones controladas de operación, y todos aplicando aireación forzada.

Tabla 3.1 Ejemplos de funciones de corrección aplicadas a la k_G .

| Factor considerado | Expresión | Referencia |
|--------------------------|--|---------------------------|
| Temperatura del sustrato | $f_T = 1,0618^{(T-20)} - 1,39^{(T-65)}$ | Monsalve et al. (2005) |
| | $f_T = \frac{(T - T_{\max})(T - T_{\min})^2}{(T_{\text{opt}} - T_{\min})^* \{(T_{\text{opt}} - T_{\min})(T - T_{\text{opt}}) - (T_{\text{opt}} - T_{\max})(T_{\text{opt}} + T_{\min} - 2T)\}}$ | Higgins & Walker (2001) |
| Contenido de Humedad | $f_{H_2O} = 1/\exp\{-17,684[1-ST]+7,0622\} + 1$ | Petric et al. (2009a) |
| | $f_{H_2O} = 2,76 * \%H_2O - 0,44$ | Meima et al. (2008) |
| | $f_{H_2O} = 1/\exp\{-17,684 \%H + 7,0622\} + 1$ | Higgins & Walker (2001) |
| Disponibilidad de O_2 | $f_{O_2} = 1/\exp [A_3 \cdot (1-\%ST/100)+B_3] + 1$ | Monsalve et al. (2005) |
| | $f_{O_2} = O_2/(K_{O_2} + O_2)$ | Petric & Selimbaic (2008) |
| | $f_{O_2} = 0,614 * \text{atan} (0,4[O_2])$ | Ekinci et al. (2005) |

T = Temperatura del sustrato (en °C); min = mínima; máx = máxima; opt. = óptima; ST = sólidos totales; %H₂O = Porcentaje de humedad; O_2 = concentración de oxígeno (en kg $O_2 \cdot m^{-3} \text{ aire}$), K_{O_2} = cte. saturación del O_2 (en kg $O_2 \cdot m^{-3} \text{ aire}$); B_3 = cte. empírica.

De la concentración de los reactivos involucrados

En esta oportunidad se centrará la atención sobre la concentración del reactivo en términos del sustrato que se degrada, tratando de exponer los distintos criterios y formas en que las cuales es planteado en los modelos cinéticos de pseudo 1º orden que se vienen discutiendo, así como las implicancias que estas tienen en cada caso.

En tal sentido, se encuentra por ejemplo que autores como Haug (1993), Higgins & Walter (2001) y Zhang et al. (2010) expresan la concentración del sustrato en términos de SVB (sólidos volátiles biodegradables) y lo determinan, el primero asumiendo porcentajes de biodegradabilidad del total de DQO (demanda química de oxígeno, cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente el material orgánico presente en una muestra, expresada en $\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$) medido, mientras que el segundo y el tercero como una porción de los sólidos totales (ST o sólidos totales), la fracción volatilizada en la determinación de cenizas por calcinación en mufla (SV o sólidos volátiles). Otros autores como Mason & Milke (2005b) determinan SV y lo asumen directamente como SVB. En muchos trabajos se expresa en términos de ST equivalente a la masa seca total (m_s en kg, base seca), o la relación $\frac{m_s}{m_{s,0}}$ (adimensional, donde $m_{s,0}$ es la masa seca inicial del sustrato) como en Keener et al. (1993), Marugg et al. (1993), Das & Keener (1997) y Ramírez-Pérez (2007). En otros trabajos se expresa en términos de CSA (carbono soluble en agua, se determina siguiendo la misma técnica analítica que la DQO, lo que cambia es la forma de expresar los resultados: mientras en la DQO se expresa

en mg O_2 consumido en el extracto acuoso de compost, para el CSA se informa como mg C).

Como puede observarse, no hay un consenso absoluto respecto a cuál parámetro es más representativo de la concentración del sustrato y su técnica de determinación, y en ocasiones se crean confusiones comparando resultados que se encuentran expresados sobre distintas bases. Tener en claro esta cuestión es vital al interpretar y comparar los resultados alcanzados por los distintos autores cuando intentan, por ejemplo, modelar los fenómenos de transferencia de calor. Se destaca así mismo la especial atención en la selección y forma de determinación de este parámetro, a fin de utilizar aquel que mejor represente el fenómeno de degradación biológica del sustrato que tiene lugar durante el compostaje.

Teniendo en consideración la heterogeneidad de los RSO comentada en capítulos previos, esta es frecuentemente representada en los modelos utilizando el *concepto de multicomponentes*, en referencia a que el sustrato se encuentra compuesto por porciones de materiales de distinta biodegradabilidad y, por lo tanto, cada uno de ellas con una cinética y constantes (k_G) diferentes. Así por ejemplo, Das & Keener (1997) resuelven el balance de masa distinguiendo dos tipos de materiales: sustrato principal (biodegradable) y material de mezcla y/o acondicionamiento (lentamente biodegradable), obteniendo una k_G para cada uno. Ekinci (2001) y Ekinci et al. (2004a, 2005, 2006) encontraron que el uso de dos términos (refiriéndose a materiales de rápida y lenta degradación) simulaba muy bien el compostaje de pasta de celulosa con estiércol de aves de corral.

Por último, otro de los aspectos importantes vinculados a la cinética y a la

forma de expresar y considerar al sustrato, es el que tiene en cuenta la *degradación parcial* del mismo, asumiendo (como ocurre en la realidad y se expresó en la estequiometría de la reacción presentada en la ecuación [2.1] del capítulo 2) que éste no se degrada en forma completa o totalmente. La línea de trabajo desarrollada por Keener et al. (1993, 1996, 1997, 2000, 2005), adoptada también en los últimos años por otros autores, incorpora este aspecto. Reconocen que al final del proceso queda un sólido remanente estabilizado (compost o abono orgánico) al que denominan *masa de equilibrio* ($m_{s,e}$). Esta cantidad suele ser mayor al contenido de cenizas del material y, en un modo simplificado, asumen que está formada principalmente de sustancias recalcitrantes como lignina y compuestos lignocelulósicos. De su consideración se desprenden dos parámetros de utilidad:

$$1) \quad \beta = \frac{m_{s,e}}{m_{s,0}}, \text{ donde } \beta \text{ representa la fracción de material que}$$

permanece luego de un período de estabilización; y

$$2) \quad mR = \frac{m_{s(t)} - m_{s,e}}{m_{s,0} - m_{s,e}}, \text{ este parámetro toma valores entre 1 y 0 y}$$

representa el grado de degradación alcanzado en cada momento o el grado de avance del proceso.

3.5 Balance de Energía Térmica (BET)

En la literatura referida al tema es posible encontrar una variedad de modelos desarrollados para la predicción de la temperatura, basados en balances de materia y energía acoplados por el término cinético, que la obtienen fundamentalmente como variable de salida a nivel global o promediada en todo el volumen. En el Apéndice G (Parte “A”), se sintetiza en la Tabla G.1 los términos frecuentemente incluidos en los BET teniendo presente que en su totalidad modelan la técnica del compostaje de pilas estáticas con aireación forzada.

La temperatura máxima del sustrato, el tiempo en llegar a ésta, la identificación y duración de los períodos mesofílicos y termofílicos, el impacto de distintas operaciones (aireación, volteos, humedecimiento) sobre la tasa de degradación y la capacidad del sistema en términos de generación de calor (por ejemplo, para reducir los patógenos presentes en el sustrato), son algunos de los efectos más estudiados con el modelado de la temperatura. En la mayoría de los casos asumiendo una cinética de pseudo 1º orden (con o sin funciones de corrección sobre la k_G) junto con la hipótesis de mezcla perfecta del sustrato, predicen la evolución de la temperatura global o promedio ($T(t)$). En menor medida se modela y simula la distribución espacial de la temperatura ya sea en 1D o 2D ($T(\underline{x}, t)$), es decir, considerando gradientes horizontales y/o verticales de dicha variable como se desarrolla en los trabajos de Das & Keener (1997), Vander-Gheynst et al. (1997), Nelson et al. (2007), Zambra et al. (2011), entre otros.

A continuación se presentan los resultados más relevantes publicados por diferentes grupos de investigación referentes en el tema, poniendo énfasis en aquellos que más se relacionan con los objetivos y las condiciones de estudio de

esta Tesis.

3.5.1 Efectos estudiados sobre la temperatura del sustrato (T)

3.5.1.1 De la escala de trabajo y la masa crítica inicial

El calor generado es “proporcional” a la concentración de sustrato biodegradable, e indirectamente al volumen ocupado por éste (Petiot & de Guardia 2004). En este aspecto, Xu et al. (2008) quienes trabajaron con una mezcla de estiércol de pollo y aserrín, probando distintos tamaños de reactores (18, 24, 30 y 42 L) a escala laboratorio, determinaron que el volumen mínimo debe ser de 30 L en base a distintos parámetros descriptivos del proceso. Mason & Milke (2005) observaron que si bien la forma característica de la curva de la temperatura en función del tiempo se mantiene comparando resultados de distintas metodologías de compostaje, los períodos de tiempo en los cuales la $T \geq 40^\circ\text{C}$ o $T \geq 55^\circ\text{C}$ son más cortos conforme se pasa de sistemas de escala industrial o full a otros de menor tamaño. También es posible encontrar en manuales de divulgación elaborados tanto por organismos internacionales como la OPS (Organización Panamericana de la Salud) y la OMS (Organización Mundial de la Salud) como por instituciones gubernamentales y/o privadas, en los cuales se informa que se requiere una masa mínima (o masa crítica inicial) entre 50 a 100 kg de RSO en base húmeda (equivalente a $0,5 - 1 \text{ m}^3$), para que el compostaje se desarrolle en *condiciones de auto calentamiento* (es decir, sin adición externa de calor). En todos los casos, basando estas conclusiones en la sola observación fenomenológica.

Considerar el volumen de material (e.g., la energía generada) para predecir si la temperatura en una pila alcanzará y mantendrá valores aceptables, es sólo una parte del problema. Existen otros elementos fundamentales que deben considerarse en los balances térmicos (pérdidas de calor, su inercia térmica), que están asociados al concepto de *masa o concentración crítica* y con ello a las *distintas escalas* de los sistemas estudiados, como se menciona en el capítulo 2 de esta Tesis. En tal sentido, Sundberg (2005) determinó que las pérdidas superficiales de calor simuladas a distintas temperaturas (37, 55 y 70 °C) resultaron en sistemas de gran escala menores al 10 % del calor generado, mientras que a escala laboratorio este valor se encontraba entre 20 y 45 % . Similares resultados se pueden encontrar en Bach et al. (1987), Weppen (2001), Mason & Milke (2005b), Mason (2006), entre otros autores. Por su parte, las pérdidas por radiación que suelen ser despreciadas a pequeña escala (Keener et al. 1993; Mason 2006, de Guardia et al. 2012), resultan importantes en pilas de mayor tamaño como se encontró en los trabajos de Robinzon et al. (1999) y de Anh et al. (2007).

Un segundo elemento que juega un papel relevante en este contexto es la *geometría de la pila*, ya que define la superficie expuesta al ambiente y, consecuentemente, las pérdidas de calor por convección superficial. El parámetro *relación $\frac{A}{V}$ (área total/volumen)* que caracteriza a los sistemas, contempla ambos efectos al variar no solo con el volumen sino también con la *forma geométrica de la pila* que determina el área (Vander-Gheynst et al. 1997; Petiot & de Guardia 2004). Permite evaluar, por ejemplo para un mismo volumen de sustrato, como inciden las distintas formas geométricas que se adopten. Tomando de base la forma cilíndrica

comúnmente elegida para el diseño de los reactores de escala laboratorio o piloto, manteniendo el diámetro igual a la altura, el valor de $\frac{A}{V}$ disminuye conforme aumenta el volumen, reduciéndose las pérdidas de calor superficial (Petiot & de Guardia 2004). En su revisión sobre los tipos de reactores utilizados para el estudio del compostaje, Mason & Milke (2005a) utilizan este parámetro para clasificar la escala de los dispositivos y para calcular el porcentaje de las pérdidas de calor que tendrían lugar en cada caso. En el Apéndice G (Parte “B”), se resume dicho criterio en la Tabla G.2.

Un tercer factor que debe considerarse junto con las superficies expuestas al ambiente tratadas en el párrafo anterior, son tipos de *condiciones de contorno* del sistema, ya que en conjunto gobernarán los intercambios de flujo calórico con el medio circundante, como se explica a continuación.

3.5.2.2 De otras condiciones de proceso

Das & Keener (1997) desarrollaron un modelo numérico para simular patrones de aireación forzada (sin volteos), cinética de degradación y procesos de transferencia de materia y energía en 2D, y poder predecir las variaciones espaciales y temporales de algunas variables (sólidos secos, temperatura, contenido de humedad y concentración de O_2). Analizaron el efecto de la *humedad inicial* (en el rango de 40 a 60 % , en base húmeda), la *altura del sustrato* y la *temperatura del aire ingresado* (a 15, 25 y 40 °C). El modelo fue validado para la temperatura y el contenido de humedad con datos de una planta comercial de compostaje de

biosólidos mezclados con corteza y aserrín. Compararon la T global simulada a distintas profundidades con datos medidos por un período de 7 días. Encontraron que a medida que se incrementa la altura de la pila, se presentan procesos de compactación y anaerobiosis en las capas inferiores de la pila. También que a mayor temperatura del aire ingresado, incrementa la tasa de degradación del sustrato, así como los requerimientos de aireación y el secado. Concluyeron que en general las condiciones de borde y el pico de temperatura máxima a distintas profundidades de la masa fueron “pobremente simuladas” (en este último con diferencias de 5 a 18 °C), notándose aún más las discrepancias pasados los 4,5 días de proceso. En la misma línea de trabajo, Ekinci et al. (2004a, 2005) desarrollaron un modelo numérico de diferencias finitas en 2D basado en cinética de pseudo 1º orden con dos componentes y balances de materia y energía acoplados, y lo validaron con la performance de 4 sistemas a escala industrial utilizando *diferentes estrategias de aireación*. Al igual que Das & Keener (1997), los gradientes de descomposición (contenido de cenizas y pérdida de materia orgánica), humedad, O_2 y temperatura no fueron bien simulados en los bordes pero sí en las partes centrales del reactor. Destacan que la formación de lixiviado, corrientes convectivas y la condensación ocurrida en la práctica no fueron tenidas en cuenta por el modelo.

Por su parte, Petric (2008) desarrolló un modelo integrando ecuaciones de reacciones cinéticas con balances de materia y energía planteándolos para las tres fases del sistema (sólida, líquida y gaseosa). Validó su modelo con experimentos llevados a cabo en condiciones controladas de laboratorio en un reactor de 32 L con aireación forzada, utilizando una mezcla de estiércol de aves de corral y paja de trigo. Al comparar los resultados durante un período de 14 días, en general (excepto

en la fase inicial) obtuvo un buen ajuste de la $T(t)$ simulada con los datos experimentales. El pico máximo de C/N es predicho por el modelo, mientras que el tiempo en alcanzarlo resultó menor al medido. Simulaciones de T considerando distintas humedades iniciales (variando de 45 a 75 %), mostraron como disminuye la T_{\max} y se alargan los tiempos en alcanzarla conforme aumenta la humedad. Este autor sugiere que efectos de la relación C/N y órdenes de reacción mayores a 1 deberían incluirse en la cinética para una mejor descripción del proceso. En una de las publicaciones más recientes que pertenece a De Guardia et al. (2012), también utilizando dispositivos que operan con aireación forzada pero ahora a escala piloto (reactores de 300 L), propusieron un modelo que predice la $T(t)$ detallando los distintos mecanismos de transferencia de calor. Comparando los datos simulados versus los medidos, obtienen diferencias para la temperatura inferiores a 2,5 °C y los picos de temperatura máxima con una ocurrencia desfasada en 8 horas. Para la mitad de sus experiencias la diferencia entre la temperatura simulada y la medida fue inferior a 5 °C. Ajustado el modelo, realizaron simulaciones para evaluar los efectos que tienen sobre la temperatura del sustrato: el espesor del material aislante, la temperatura ambiente y el incremento o disminución de la masa de sustrato. Observaron en sus resultados que reduciendo la capa aislante de 10 a 1 cm disminuye la T del material hasta en más de 10 °C cuando la actividad biológica es máxima. En cambio, variando la T ambiente o T_{ref} de 25 a 10 °C se provoca un descenso de menos de 5 °C sobre la T del sustrato, al tiempo que ésta se incrementa conforme aumenta la masa compostando.

La influencia de la *forma y el tamaño de la pila* sobre las pérdidas de calor por

convección y radiación y sobre la temperatura del material fue abordada en el trabajo de Moraga et al. (2009). En su misma línea de trabajo, Zambra et al. (2011) simularon la influencia de las *condiciones ambientales* (humedad atmosférica, precipitación, etc.) sobre la reacción biológica y química dentro de una pila trapezoidal de unos 150 m³ de material. Incluyeron en sus ecuaciones variaciones de la porosidad con la altura de la pila y la radiación. Ambos grupos de autores, en sus trabajos comparan datos experimentales y simulados de temperatura a distintas profundidades de la pila durante 6 semanas, observando que los perfiles simulados “siguen la misma tendencia que lo medido experimentalmente”, no presentando perfiles de temperatura en función de la posición. En el caso de Moraga et al. (2009) concluyen finalmente que la altura de la pila es un parámetro importante que afecta los procesos de calentamiento del material.

Respecto del modelado de *otras metodologías de aireación como por ejemplo los volteos o la ventilación natural*, debe señalarse que la mayoría de los estudios conducidos a full escala (Larney & Olson 2006; Larney & Hao 2007; Larney et al. 2008; Curtis et al. 2005), se han basado más en la descripción fenomenológica de los impactos que se generan sobre distintos parámetros del proceso, y el análisis estadístico de los resultados, que en su modelado físico-matemático, debido principalmente a las dificultades encontradas al controlar los parámetros y variables operacionales cuando se trabaja en sistemas de estas dimensiones. Un antecedente se encontró en Bongochgetsakul e Ishida (2008), los cuales utilizaron un software comercial de tipo caja negra, BioDuCom, derivado de otro originalmente desarrollado por investigadores de la Universidad de Tokio para simular la durabilidad del hormigón (DuCOM, Durability Concrete Models). Allí señalan que esta herramienta

adaptada permite simular los balances acoplados en distintas condiciones de proceso para el compostaje a escala industrial, incluyendo el modelado de los volteos con una variable de entrada que representa “porcentajes de pérdidas” de materia y energía. En el trabajo contrastan, para distintas alturas de la pila, datos simulados de $T(t)$ con datos medidos experimentalmente obtenidos en condiciones controladas a escala laboratorio.

Respecto de los efectos del *uso o no de cobertura aislante sobre las pilas*, en la revisión bibliográfica realizada se encontraron muy pocos trabajos que lo abordaron. Algunos autores como Goldstein (1988) destaca que su implementación puede mejorar la eficiencia de proceso en términos, por ejemplo, de la minimización de los olores durante la etapa activa. Otros como Randle (1983) que analiza sus efectos sobre la evolución y distribución de la temperatura medida (sin entrar en su modelado y simulación), concluye que las pilas con cobertura registraron una T en promedio 5 °C mayor que aquellas sin cubrir. Publicaciones más recientes como la de Hua et al. (2011) que analizaron los efectos combinados del régimen de volteos y el uso de cobertura, concluyeron que si bien los volteos pueden promover la degradación del sustrato, incrementar la T y mejorar los valores de IG (índice de germinación) finales, también aumentar las emisiones de NH_3 , no deseadas causando pérdidas significativas de nitrógeno. Por su parte, revelan que el uso de cobertura logró prolongar por más tiempo altas temperaturas y reducir las emisiones de NH_3 , al tiempo que disminuyó las tasas de descomposición del sustrato, sin ahondar demasiado en los motivos de dicha respuesta.

3.6 Dispositivos utilizados para la verificación experimental de los modelos

Para verificar los resultados predichos por los modelos, como se mencionó al comienzo de este capítulo, frecuentemente se utilizan reactores de escala laboratorio y/o piloto de diversas geometrías, variando desde tambores o torres cilíndricas a paralelepípedos, dispuestos tanto en posición horizontal como vertical. Por lo general están contruidos en acero inoxidable o similar, aislados térmicamente en la parte exterior aplicando materiales de baja conductividad térmica como el poliestireno (Vander-Gheynst et al. 1997; Ekinci et al. 2004a, b, c), poliestireno expandido, lana de vidrio (Sundberg et al. 2003), lana mineral (Barrington et al. 2002), poliuretano, entre otros, con espesores entre 12.7 y 120 mm (Mason & Milke 2005a). Entre los principales componentes de estos dispositivos experimentales figuran: sistemas de aireación forzada (con o sin humidificación y/o calentamiento previo del aire a su ingreso, operando bajo distintos regímenes), sistemas de captación de gases (forzando en la salida del reactor el pasaje de los gases a través de soluciones químicas formuladas para capturar CO_2 y NH_3 de la corriente gaseosa), y caudalímetro de gases.

En función de las condiciones de operación y la forma en que son gestionados los flujos de calor a través de las paredes de los reactores, Mason & Milke (2005a) presentaron la siguiente distinción de categorías:

- 1) A temperatura fija: En general los reactores se montan dentro de incubadoras que permiten controlar y aplicar externamente el calentamiento o enfriamiento necesario para mantener una temperatura fija de operación. Si bien éstos son criticados por operar en condiciones

“irreales”, han sido utilizados en un amplio rango de operación, es decir, realizando ensayos a distintos valores de temperatura (Mason & Milke 2005a). Otra alternativa a la incubadora es la aplicada por Smars et al. (2001), que implementó el calentamiento previo del aire, combinado con recirculación de los gases y agregado de aire fresco y frío en las proporciones necesarias para mantener la temperatura a un determinado valor;

- 2) De auto-calentamiento: Aquellos donde el calor generado depende exclusivamente de la actividad biológica del material, no teniendo un control externo más allá de la cubierta aislante diseñada. Estos reactores han sido muy utilizados para estudiar el proceso en su conjunto y la degradabilidad del sustrato;
- 3) Diferencia de temperatura controlada: La gestión del sistema se realiza utilizando una fuente de calor externa de modo tal de conservar el calor generado por el proceso. Es decir, se trata de minimizar las pérdidas de calor hacia el entorno, operándolo como un *reactor idealmente adiabático*. La temperatura externa (del ambiente o de la sala del laboratorio), se mantiene levemente inferior a la del material utilizando un sistema automático de corrección, con el fin de asegurar un flujo neto mínimo de salida de calor del sistema. Esta diferencia con el exterior, se mide como gradiente de temperatura, y
- 4) Flujo de calor controlado: Similar al caso anterior, solo que la diferencia de temperatura con el exterior se expresa como “diferencia de flujo de calor”.

En base a lo descrito, se puede afirmar que las características constructivas y operacionales de los reactores utilizados en la actualidad para realizar la verificación experimental de los modelos, describen sistemas que son totalmente controlados y focalizados en la técnica de aireación forzada, poniendo en evidencia la necesidad de contar con nuevos dispositivos que operen en condiciones menos controladas, y fundamentalmente, que representen otras metodologías de aireación.

3.7 Consideraciones finales

La actualización del estado del arte sobre el tema de compostaje permite establecer dos “escuelas” de trabajo. Por un lado, la que se dedica a investigar el proceso a escala laboratorio o piloto (Hansen et al. 1989; Marugg et al. 1993; Eklind et al. 2000a, b; Bari & Koeing 2001; Smars et al. 2001, 2002; Barrington et al. 2002; Ekinci et al. 2004a, b, c, 2005, 2006; Xi et al. 2005; Komilis 2006; Richard et al. 2006a, b; Yamada & Kawase 2006 y Raut et al. 2008; entre otros), en sistemas totalmente controlados (e.g., caudal de aireación, control externo de temperatura, etc.), obteniendo resultados y conclusiones difícilmente trasladables a escala industrial. Por otra parte, los resultados obtenidos en escala planta (Iannotti et al. 1994; Bernal et al. 1998a, b; Tiquia et al. 1997; Hassen et al. 2001; Laos et al. 2002; Parkinson et al. 2004; Hobson et al. 2005; Tognetti et al. 2005, 2007a, b; Ramírez-Pérez et al. 2007; Das & Keener 1997a, b; Leconte et al. 2009; entre otros), en su mayoría fenomenológicos y dependientes en forma directa del tipo de experimento

desarrollado, con la dificultad en estos casos de obtener conclusiones extrapolables a otras condiciones de trabajo.

Al momento de realizar la presente revisión bibliográfica, no se han encontrado modelos desarrollados sobre la base de fundamentos físicos y matemáticos, que representen sistemas diferentes al de pilas estáticas aireadas. Unos pocos trabajos se encuentran que modelan variables tan importantes como la temperatura considerando su distribución espacial (en 1D o 2D) además de la típicamente modelada evolución temporal de dicha variables, por lo que constituye un “nicho” dentro del modelado en el cual debería realizarse mayores esfuerzos para ampliar la línea de conocimiento del problema. Por otro lado, quedó manifestada la necesidad de contar con nuevos dispositivos a escala laboratorio que permitan obtener datos confiables para validar experimentalmente los modelos, que contemplen otras alternativas como mecanismos de aireación, y que a la vez sean más sencillos (reduciendo los costos iniciales de investigación), flexibles en términos de su capacidad para representar distintas condiciones de diseño y operativas, y que operen en condiciones de mayor representatividad del sistema real objeto de estudio.

En el próximo capítulo, se describe el reactor y la metodología de operación desarrollada y utilizados durante la fase experimental de esta Tesis, cuyo diseño buscó dar respuesta a algunas de las limitaciones y vacancias en dicho aspecto planteadas en el presente estado del arte.

Capítulo 4

Desarrollo

Fase Experimental

Capítulo 4: Desarrollo Fase Experimental

4.1 Introducción

En el presente capítulo se describe el *set up experimental* desarrollado para esta Tesis, que permitió estudiar a escala laboratorio el proceso de compostaje aplicando volteos periódicos manuales como metodología de aireación, y operarlo bajo distintas condiciones.

En la sección 4.2, se incluyen las principales definiciones derivadas de una serie de estudios previos, que permitieron la puesta a punto de las técnicas analíticas a aplicar, así como del dispositivo experimental. Dichos estudios contribuyeron también a definir los lineamientos para el monitoreo y muestreo del proceso durante su estudio, y la selección de los tipos de RSO a utilizar durante los ensayos. Con los resultados de esta primer parte, en las secciones siguientes de la 4.3 a la 4.6 del presente capítulo, se describen los diferentes aspectos inherentes a la metodología y logística diseñada e implementada para la ejecución de cada paquete experimental. En el apartado 4.7 se describen el conjunto de condiciones operativas y de diseño estudiadas en este trabajo, mientras que en el 4.8 se detallan las corridas experimentales realizadas.

Finalmente con los datos de calidad resultantes de esta fase experimental, como se verá más adelante en el capítulo 7 de Resultados y Discusión, se llevó a cabo la calibración del modelo (es decir, la estimación de los parámetros libres del modelo), así como la verificación experimental y validación cuantitativa del modelo propuesto, cumpliendo así con uno de los objetivos principales de esta Tesis.

4.2 Estudios previos

Como se comentó anteriormente, para cumplir con el objetivo final y poder concretar con éxito la fase experimental de esta Tesis, se debió llevar a cabo una serie de estudios previos que permitieron definir entre las cuestiones más sobresalientes, las que se mencionan a continuación:

1. Los tipos de RSO a utilizar;
2. La configuración, diseño y puesta a punto del dispositivo experimental a utilizar;
3. La puesta a punto de las técnicas analíticas para la determinación de parámetros; y
4. El diseño de una metodología de trabajo que tenga en cuenta toda la logística necesaria para la ejecución de los ensayos.

A partir de resultados provenientes de las actividades experimentales iniciales (datos no mostrados aquí), se obtuvieron algunas conclusiones preliminares de interés que permitieron:

- establecer las distintas frecuencias de volteos para poder estudiar su efecto;
- identificar como la *fase térmicamente más activa*, caracterizada por el desarrollo de temperaturas termofílicas y variaciones apreciables en los parámetros fisicoquímicos evaluados, al período comprendido dentro de los primeros 10 días del proceso, para la escala de trabajo utilizada;

y

- que la masa inicial de 10 kg (máxima probada en los ensayos), permitía mejores desarrollos térmicos y un estudio completo del proceso incluyendo todas sus etapas.

En relación a los *volteos periódicos manuales*, por ejemplo, se observó en general que su implementación no se realizaba como *práctica de control de la temperatura máxima* (esto es, cuando se alcanzan y/o superan en el sustrato valores de 65 - 70 °C considerado por varios autores como límite superior a partir del cual es posible la inactivación de la biomasa), sino más bien como práctica orientada a revertir posibles limitaciones de oxígeno en el interior de la masa. Por otro lado, la identificación del período más activo en los ensayos permitió diseñar la frecuencia del monitoreo y de los muestreos, de modo tal de obtener una descripción más detallada durante esta primera etapa, y en forma más espaciada en la fase siguiente hasta dar por finalizado el ensayo, incluyendo las etapas de enfriamiento y de estabilidad biológica del sustrato.

4.3 Tipos de RSO utilizados

En la Tabla 4.1 se presentan los residuos sólidos orgánicos finalmente seleccionados para el desarrollo de los ensayos, la función que cumple cada uno dentro de la mezcla de sustrato a compostar y el origen de los mismos.

Cabe mencionar que dicha selección estuvo ligada tanto a su disponibilidad en la zona, como a su elevado porcentaje en peso y en volumen que alcanzan del total de RSO generados en ciudades como Santa Fe y otras de nuestro país. Por tal motivo, se espera que los resultados y aportes al proceso de compostaje que se deriven de esta Tesis, además de expandir la frontera del conocimiento dentro del ámbito estrictamente científico, y puedan compararse, por ejemplo, con datos de la bibliografía obtenidos en condiciones experimentales diferentes (en cuanto a la escala utilizada, técnica de compostaje, composición del sustrato y controles implementados); también puedan extrapolarse a la sociedad y contribuir a un mejor funcionamiento de las plantas de compostaje que se encuentren ya en operación, así como de aquellas en etapa de diseño y planificación.

Tabla 4.1 Residuos orgánicos utilizados en los ensayos.

| Tipo de RSO | Función y aportes a la masa a conformar ^(a) | Origen |
|-----------------------|--|--|
| 1. Residuos de comida | Sustrato principal. Aporta humedad, biomasa y nutrientes biodisponibles (C, N) | Servicio de comedor. Predio CCT-CONICET Santa Fe. |
| 2. Estiércol equino | Sustrato principal / inóculo. Aporta humedad, nutrientes biodisponibles (C, N, P) y biomasa activa. | Hipódromo de Las Flores (Santa Fe, Provincia de Santa Fe). |
| 3. Paja de trigo | Enmienda. Bajo contenido de humedad, absorbe olores. Degradabilidad, aportes de C y estructura media a baja. | |
| 4. Restos de poda | Estructurante. Biodisponibilidad de nutrientes y escasa humedad. Aporta estructura y porosidad a la mezcla. | Servicio de mantenimiento del parque. Predio CCT-CONICET Santa Fe. |
| 5. Recortes de | Enmienda. Aporta N biodisponible, | |

| | |
|---------------|---|
| césped fresco | moderada humedad, escasa o nula estructura y es rápidamente degradable. |
|---------------|---|

^(a) Fuente: Rynk (1992).

De acuerdo a la clasificación presentada en la sección 2.4, apartado 2.4.1. “RSO: clasificaciones y características” del capítulo 2 de esta Tesis, los residuos de comida (restos de frutas y verduras tanto frescas como cocidas) y el estiércol equino, se utilizaron como *sustratos principales* y portadores de la biomasa activa. Como *material estructurante* los restos de poda (chips de madera, ramas y corteza), y como *enmienda* tanto los residuos verdes de jardín (recortes de césped fresco) para balance de nitrógeno, como la paja de trigo como regulador de la humedad del sustrato.

4.4 Descripción del dispositivo experimental

Luego de haber realizado pruebas con contenedores de distintos tamaños y tipo de material durante los estudios previos, finalmente para las experiencias definitivas se utilizaron contenedores rectangulares de 63 L de capacidad como los que se muestran en las Figuras 4.1 y 4.2, con paredes laterales y base de fondo cerradas de polietileno de alta densidad (PEAD), de aproximadamente 1 cm de espesor, abiertos en la parte superior.

Cada dispositivo se operó en forma batch, es decir, con una única carga de

sustrato desde el inicio del proceso y hasta finalizar el ensayo, llevándose a cabo paquetes de experiencias en cada uno de los cuales se realizó el montaje y la operación en paralelo de entre 3 y 6 reactores.



Figura 4.1 Reactores operando en paralelo. Caso experiencias con un único punto de medición de la temperatura másica.

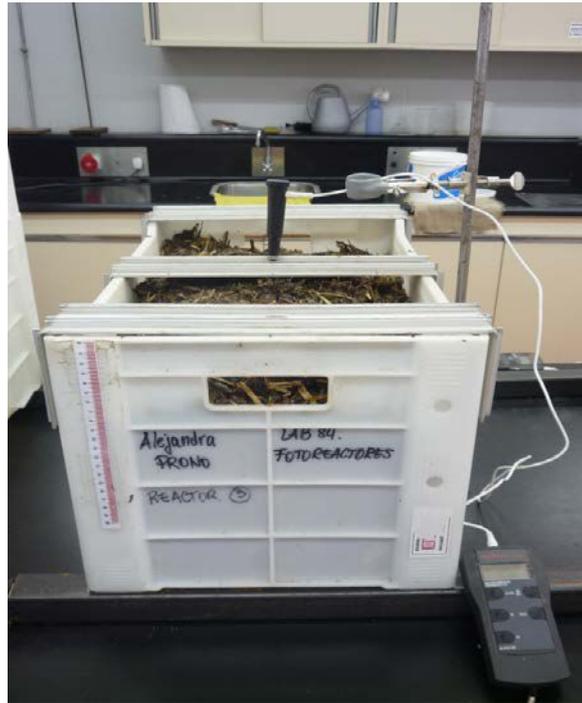


Figura 4.2 Reactor utilizado en experiencias con múltiples puntos de medición de la temperatura másica.

Cabe señalar que el diseño experimental utilizado resultó ser además de sencillo y económico, flexible y versátil, ya que permitió trabajar bajo múltiples condiciones que reproducen prácticas de manejo llevadas a cabo a escalas mayores, entre ellas: intercambio calórico permanente (casos de sistemas abiertos), o bloqueo del mismo (casos de sistemas adiabáticos) mediante la incorporación de una cobertura superior aislante (ver descripción en el siguiente apartado), distintas masas y condiciones de sustrato iniciales, y diferentes regímenes de volteos y formas geométricas de la pila. En definitiva, permitió llevar adelante el estudio del *compostaje* implementando el método de *pilas con volteos manuales*, en todas sus etapas (mesofílica inicial, termofílica, de enfriamiento y de estabilización / maduración) en la escala de trabajo propuesta, minimizando las pérdidas de calor a través de las paredes, en *condiciones semi controladas* de operación, cumpliendo

así con los objetivos de verificación experimental del modelo propuestos en esta Tesis.

4.5 Técnicas analíticas

Tanto para la caracterización inicial de los RSO como para seguir la evolución del proceso y medir el impacto de cada condición estudiada durante los sucesivos muestreos, se determinaron en distintos momentos en el sustrato los siguientes parámetros: humedad, pH, densidad aparente, granulometría (distribución del tamaño de partícula), X (contenido de cenizas), SV (sólidos volátiles), C_{org} (carbono orgánico), N_T ¹ (nitrógeno total), L_T (Lignina Total, insoluble + soluble) e IG (Índice de Germinación). Cabe destacar que cada uno de ellos se determinó por triplicado, calculándose e informándose luego su valor promedio.

Como puede observarse, en su mayoría las determinaciones realizadas corresponden a parámetros de rutina en laboratorios de suelos y aguas, para los cuales se emplearon técnicas analíticas ya estandarizadas y que pueden consultarse en numerosos manuales, normas y bibliografía de referencia. Por tal motivo, en lugar de desarrollar dichas técnicas aquí, en el Apéndice H dentro de la sección “Métodos analíticos utilizados”, se presenta la Tabla H.1 que sintetiza en para cada variable considerada el procedimiento principal, el instrumental requerido, y la bibliografía de referencia utilizada.

¹ La mayor parte del nitrógeno hallado en los materiales utilizados en compostaje es orgánico (Sánchez-Monedero et al. 2001). Teniendo en cuenta esta afirmación aceptada también por otros autores, en lo que resta de este trabajo se considerará al N_T como N_{org} (N_{org}).

Un caso particular constituye la determinación del contenido de lignina insoluble. La determinación de este parámetro es un ensayo comúnmente realizado en el ámbito de la industria del papel, y las técnicas para su obtención han sido desarrolladas y ajustadas para materiales como la madera. En ellas, por ejemplo, es común la extracción previa de solventes orgánicos, ya que suelen ser utilizados en el tratamiento de las maderas, pudiendo alterar los resultados de lignina.

Entre los métodos utilizados para aislar este componente se distinguen: 1) los que la remueven selectivamente y la recuperan en una solución final y, 2) los que la obtienen como un residuo insoluble luego de la disolución en ácido de los restantes compuestos carbonosos. El Número de Kappa (oxidación de la lignina utilizando una solución de permanganato de potasio) y la lignina de Klason (determinada gravimétricamente luego de la disolución en ácido sulfúrico al 72 % del resto de los componentes), son dos de las técnicas más utilizadas. Otras técnicas implementadas comprendidas dentro de los métodos para aislar distintas fracciones de la materia orgánica son: Neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) y acid detergent lignin (ADL), siendo estas últimas propuestas por Van Soest & Wine en la década del sesenta en Estados Unidos.

En el ámbito del compostaje, los residuos lignocelulósicos que suelen utilizarse (restos de podas, hojas y ramas, residuos agrícolas), están compuestos principalmente de un 40 % de celulosa, seguidos de un 20 a un 30 % de hemicelulosa, y un 20 a un 30 % de lignina (Tuomela et al. 2000), y en general, no son tratados con solventes orgánicos como las maderas.

Diferentes grupos de investigación que estudian la biodegradación de este componente a través del compostaje, lo determinan aplicando en forma directa

alguna de las técnicas analíticas antes mencionadas, o realizando adaptaciones a las mismas que no siempre son bien informadas. En este contexto, si bien por ejemplo los últimos métodos citados (NDF, ADF y ADL) han sido tomados como referencia para determinar el Índice de Estabilidad Biológica (Index of Biological Stability, IBS, en inglés) incorporado a la ley francesa (AFNOR, 2005), en general se observa que no hay un consenso para el uso de una única técnica estándar para su cuantificación.

Así por ejemplo mientras en Vargas-García et al. (2007) y en Yu et al. (2008) la hemicelulosa es estimada como la diferencia entre NDF y ADF, celulosa como la diferencia entre ADF y ADL, y finalmente la lignina se obtiene por diferencia entre ADL y el contenido de cenizas; en trabajos como los de Ko J-J. et al. (2009) aplican directamente el método clásico de Klason para su obtención.

En esta Tesis, basada en la revisión y análisis de la bibliografía específica en el tema y por recomendación de docentes de la Cátedra de “Fundamentos de la producción de Pastas celulósicas”, de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral (FIQ, UNL), especialistas en el tema, se decidió realizar una serie de adaptaciones a la técnica clásica de Lignina de Klason tomando como referencia la *Tappi Method T 222 om-88* de Estados Unidos, que fuera desarrollada para materiales en el ámbito de la industria del papel; para su mejor aplicación al tipo de matriz con las características y propiedades definidas por los RSO. En la segunda parte el Apéndice H se describen con detalle las adaptaciones implementadas.

A partir del conjunto inicial de parámetros determinados con las técnicas

analíticas de la Tabla H.1 del Apéndice H que se hacía referencia, se estimó un segundo grupo de parámetros derivados de los primeros denominado “*parámetros secundarios*”, a saber: relación C/N, m_s o ST (sólidos totales, (kg, b.s.)), % SSR (sólidos secos remanentes), % SSR_{Bio} (SSR biodegradables), mR (avance del proceso), R_d (relación de degradación), C_{Bio} (carbono biodegradable), incrementos netos de L_T , X y de N_T , así como pérdidas de C_{org} y de N_T . Las pérdidas de N_T y de C_{org} fueron estimadas utilizando la corrección en base al contenido de cenizas propuestas por Sánchez-Monedero et al. (2001) y Leconte et al. (2009). El IG se estimó a partir de la germinación y el crecimiento relativo de raíces de semillas de ryegrass estacional.

Las expresiones de cálculo de cada uno de los parámetros secundarios utilizados en esta Tesis pueden consultarse en el Apéndice N.

4.5.1 Tamaño, representatividad y conservación de las muestras

Los muestreos periódicos llevados a cabo durante los ensayos consistieron en la extracción de una muestra compuesta por cada reactor, formada a su vez por cinco alícuotas tomadas de diferentes puntos de la masa; procediendo luego a su mezclado hasta lograr una muestra homogénea.

En cuanto al tamaño o cantidad de masa (en base húmeda) a extraer por muestra, se determinó en función de la masa de sustrato contenida en el reactor, extrayéndose como criterio general el equivalente al 1 % en peso de la masa total registrada en cada momento.

Un esquema representativo del procedimiento de muestreo y manipulación de las muestras se ilustra en la siguiente Figura 4.3:

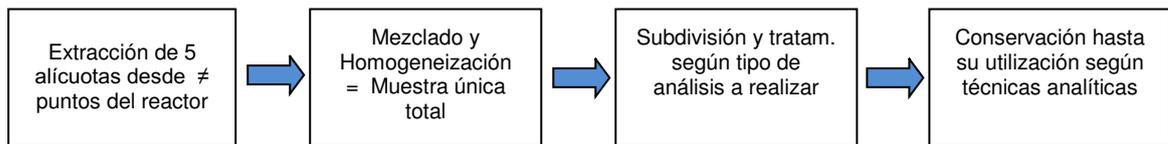


Figura 4.3 Esquema de muestreo y manipulación de las muestras.

Cabe mencionar que el tipo de procesamiento y modo de conservación de cada sub-muestra homogénea hasta su análisis, dependió de las técnicas analíticas a aplicar para la determinación de los diferentes parámetros. En la Tabla J.2 del Apéndice J (Parte B) se resume dicha información.

4.6 Metodología de trabajo aplicada

Una vez definidas las materias primas con las cuales trabajar, y realizada la puesta a punto tanto de las técnicas analíticas a aplicar, así como del dispositivo experimental a utilizar, el paso siguiente fue diseñar una metodología de trabajo que tenga en cuenta la logística necesaria para el desarrollo adecuado de los ensayos, la cual se fue perfeccionado con el avance de la presente fase experimental.

En los siguientes puntos se describe la metodología implementada, que

contempla aspectos como la caracterización inicial de los RSO, el pre acondicionamiento requerido para cada material, la formulación del sustrato para cada ensayo, la planificación de los muestreos y el monitoreo de variables representativas del proceso, y por último la forma de llevarlos cabo.

4.6.1 Caracterización inicial de los RSO seleccionados

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados de la caracterización inicial de los RSO utilizados en los ensayos, determinada en base a las técnicas analíticas que se hiciera mención en el punto 4.5. A continuación, en la Tabla 4.3 se expone la fórmula de composición elemental para cada residuo calculada a partir de los % en peso de C, H, O, N y S contenido en los mismos (datos obtenidos de bibliografía), siguiendo la metodología propuesta por Tchobanoglous et al. (1993). La memoria de cálculo se puede consultar en el Apéndice I.

Tabla 4.2 Propiedades fisicoquímicas y biológicas iniciales de los RSO utilizados.

| Tipo de Sustrato | Humedad (%, b.h.) | pH | Sól. Volátiles (%, b.s.) | Cenizas (%, b.s.) | $\frac{C_{org}}{C_{org}}$ (%, b.s.) | Densidad aparente (kg · m⁻³) | $\frac{N_{org}}{N_{org}}$ (%, b.s.) | Relación C/N | Lignina Total (%SV, b.s.) |
|---------------------------|------------------------------|-----------|---|------------------------------|--|--|--|-------------------------|--------------------------------------|
| Residuos de comida | 69,0 | 7,1 | 92,4 | 7,6 | 51,3 | 150 - 250 | 2,35 | 21,8 | 0,4 |
| Estiércol equino | 51,1 | 7,3 | 89,6 | 10,4 | 46,7 | 362 | 1,83 | 25,5 | 7,3 |
| Paja de trigo | 10,5 | 7,8 | 89,8 | 10,2 | 46,4 | 20,1 | 0,40 | 116,0 | 8,9 |
| Restos de poda | 9,7 | 6,9 | 94,0 | 6,0 | 52,2 | 145,1 | 0,09 | 580,0 | 13,8 |
| Recortes de césped fresco | 70,5 | 7,7 | 85,2 | 14,8 | 47,3 | 59 - 150 | 3,6 | 13,1 | ND (*) |

Los valores de la tabla corresponden, para cada parámetro, al valor medio calculado en base a tres réplicas. (*) ND: No detectado.

Tabla 4.3 Composición elemental de los RSO.

| Tipo de Sustrato | Fórmula Química (N = 1) ¹ | |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| | Sin agua | Con agua |
| Residuos de comida | $C_{21,5}H_{34,5}O_{12,7}N$ | $C_{21,5}H_{167,6}O_{79,2}N$ |
| Estiércol equino | $C_{26,2}H_{39,7}O_{19}N$ | $C_{26,2}H_{128,5}O_{63,4}N$ |
| Paja de trigo | $C_{150,4}H_{226,3}O_{98,4}N$ | $C_{150,4}H_{276,9}O_{123,7}N$ |
| Restos de poda | $C_{578,4}H_{827,4}O_{371,4}N$ | $C_{578,4}H_{994,5}O_{455,1}N$ |
| Recortes de césped fresco | $C_{15,6}H_{25,1}O_{10,1}N$ | $C_{15,6}H_{136,1}O_{65,6}N$ |

¹ Expresada en base molar N = 1 (es decir, dividiendo el número de moles de cada elemento por el número de moles del nitrógeno, ver desarrollo en Apéndice I).

4.6.2 Pre acondicionamiento de los RSO

Independientemente de la cantidad requerida de cada RSO en los ensayos, en forma previa a su utilización, en todos los casos fue requerido un *pre procesamiento o acondicionamiento* del material definido en función de su estado y características iniciales y de las correspondientes finales a las cuales se lo pretendía llevar.

En la Tabla 4.4 se detalla el tipo de procesamiento aplicado a cada residuo y una imagen que ilustra el estado final alcanzado en cada caso, es decir, ya en condiciones de ser incorporado a la mezcla de sustrato inicial a compostar en los ensayos.

Tabla 4.4 Pre procesamiento aplicado a los RSO utilizados en los ensayos.

| Tipo de sustrato | Pre acondicionamiento necesario | Imagen del RSO procesado |
|---------------------------------------|--|---|
| Residuos de comida | Reducción de tamaño (picado manual con cuchilla). Tamaño final de partícula 1 cm ² aprox. |  |
| Estiércol equino | Desmenuzamiento manual |  |
| Paja de trigo | Reducción de tamaño (chipeado). Tamaño final de partícula 1-5 cm (de largo) |  |
| Restos de poda (ramas, corteza, etc.) | Reducción de tamaño (chipeado). Tamaño final de partícula ≤ 1 - 3 cm aprox. |  |
| Recortes de césped fresco | Ninguno. Tamaño de partícula en función de la altura del césped. |  |

De los residuos anteriores, solo en el caso de la paja de trigo y de los restos de poda, se almacenaron cantidades excedentes pre acondicionadas en bolsas de consorcio semi abiertas, en la sala de laboratorio a temperatura ambiente,

reservándose en stock para futuras experiencias. El resto de los residuos utilizados, debido a su naturaleza putrescible y moderados a elevados contenido de agua (ver datos Tabla 4.2), se recolectaban y pre acondicionaban el mismo día de inicio de los ensayos.

4.6.3 “Formulación” del sustrato inicial para las experiencias

Una vez seleccionados, caracterizados y pre-acondicionados los RSO por un lado, y fijadas las condiciones a estudiar por el otro (ver más adelante en sección 4.7), el paso siguiente en cada corrida experimental es proceder a la “formulación” del sustrato o el armado de la mezcla de residuos a compostar, buscando obtener las características y composición definidas previamente para cada ensayo. A continuación se describen los pasos llevados a cabo para la conformación de dicho sustrato:

1. Definición del valor de la relación C/N de diseño (balance de nutrientes);
2. Cálculo de la cantidad requerida de cada RSO (en función del aporte de nutrientes ya conocido de cada uno), expresada en términos del porcentaje en peso;
3. Ajuste del contenido de humedad inicial; y
4. Ajuste cualitativo del resto de las propiedades físicas de la mezcla (textura, estructura y porosidad, etc.)

Para llevar adelante el punto 2, conociendo a partir de la caracterización de los materiales el contenido de nutrientes de cada RSO, se siguió la metodología propuesta por Rynk (1992) y Tchobanoglous et al. (1993), ampliamente utilizada en el ámbito de la gestión y tratamiento de los RSU. En el Apéndice K (sección K.1 Ajustes de nutrientes) se expone la secuencia de cálculo propuesta por dichos autores con un ejemplo para dos residuos genéricos a compostar A y B, con la cual se estima la proporción de mezcla necesaria ($\text{kg residuo "A" / kg residuo "B"}$) para obtener una determinada relación C/N inicial, y con ello, la cantidad requerida total de cada material. Cabe señalar en relación a dicha metodología aplicada, que ésta se basa en la hipótesis de que solo dos de los residuos que se van a compostar son los que realizan el aporte necesario de los nutrientes a la mezcla, mientras que los demás residuos que pueden ser incorporados a la misma, se los considera como enmienda (ya sea balanceando el contenido de humedad, estructura o textura), y no participando en el balance de nutrientes biodisponibles al proceso. En la Tabla 4.5 se presenta la composición inicial en términos de porcentaje en peso que finalmente tuvo cada mezcla utilizada en los ensayos.

Para el punto 3, en el mismo Apéndice K (sección K.2 Ajuste del contenido de agua) se expone un ejemplo del cálculo de agua a adicionar (si está en defecto en el sustrato original conformado), o de enmienda a agregar (si está en exceso), para alcanzar una determinada humedad inicial en un ensayo.

Respecto del último punto, se agregó material estructurante (chips de poda) en cantidades necesarias.

Tabla 4.5 Composición inicial del sustrato para las distintas experiencias

| Exp. N° | Porcentaje en peso de cada componente (% b.h.) | | | | | | Porcentaje en peso total (%) |
|---------|--|------------------|---------------|---------------|-----------------|---------|------------------------------|
| | Res. Comida | Estiércol equino | Paja de trigo | Chips de poda | Recortes césped | Aserrín | |
| 1 | 0,0 | 61,2 | 0,0 | 8,6 | 3,3 | 26,9 | 100 |
| 2 | 0,0 | 60,9 | 0,0 | 9,5 | 3,3 | 26,4 | 100 |
| 3 | 0,0 | 69,2 | 0,0 | 8,2 | 2,6 | 20,0 | 100 |
| 4 | 0,0 | 76,2 | 9,5 | 14,3 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 5 | 0,0 | 87,9 | 3,9 | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 6 | 0,0 | 76,2 | 9,5 | 14,3 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 7 | 0,0 | 75,4 | 9,5 | 15,1 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 8 | 0,0 | 88,1 | 4,0 | 7,9 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 9 | 0,0 | 75,4 | 9,5 | 15,1 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 10 | 0,0 | 65,0 | 2,5 | 2,5 | 30,0 | 0,0 | 100 |
| 11 | 25,0 | 70,0 | 2,5 | 2,5 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 12 | 10,0 | 70,0 | 2,0 | 6,0 | 12,0 | 0,0 | 100 |
| 13 | 1,7 | 58,6 | 33,8 | 5,0 | 1,0 | 0,0 | 100 |
| 14 | 20,2 | 35,4 | 1,0 | 3,0 | 40,4 | 0,0 | 100 |
| 15 | 10,0 | 70,0 | 2,0 | 6,0 | 12,0 | 0,0 | 100 |
| 16 | 10,0 | 70,0 | 2,0 | 6,0 | 12,0 | 0,0 | 100 |
| 17 | 10,0 | 70,0 | 2,0 | 6,0 | 12,0 | 0,0 | 100 |
| 18 | 10,0 | 70,0 | 2,0 | 6,0 | 12,0 | 0,0 | 100 |
| 19 | 10,0 | 70,0 | 2,0 | 6,0 | 12,0 | 0,0 | 100 |
| 20 | 10,0 | 70,0 | 2,0 | 6,0 | 12,0 | 0,0 | 100 |
| 21 | 15,0 | 55,0 | 5,0 | 15,0 | 10,0 | 0,0 | 100 |
| 22 | 15,0 | 55,0 | 5,0 | 15,0 | 10,0 | 0,0 | 100 |
| 23 | 25,0 | 15,0 | 5,0 | 5,0 | 50,0 | 0,0 | 100 |
| 24 | 15,0 | 20,0 | 5,0 | 60,0 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 25 | 25,0 | 15,0 | 5,0 | 5,0 | 50,0 | 0,0 | 100 |
| 26 | 20,0 | 60,0 | 5,0 | 5,0 | 10,0 | 0,0 | 100 |
| 27 | 20,0 | 60,0 | 5,0 | 5,0 | 10,0 | 0,0 | 100 |
| 28 | 20,0 | 60,0 | 5,0 | 5,0 | 10,0 | 0,0 | 100 |

4.6.4 Armado y montaje de los RSO dentro del reactor

A continuación se detalla la secuencia de pasos para el armado y montaje de los RSO dentro del dispositivo experimental, llevada a cabo momentos antes del inicio de cada ensayo, independientemente de su condición a estudiar:

- Tara del reactor vacío. Registro en planilla;
- Pesaje de la cantidad de cada RSO requerida por reactor (ya pre acondicionados, y de acuerdo a los cálculos previos);
- Volcado de cada uno dentro de la cuba de mezclado y realización de ajustes necesarios (de humedad, estructura, nutrientes), en caso que la mezcla lo requiriera;
- Homogeneización (mezclado manual) de los distintos componentes hasta obtener un sustrato inicial de características uniformes;
- Extracción muestra N° 1 (correspondiente al inicio de proceso, día 0) con tamaño según lo descrito en el apartado 4.4.1 del presente;
- Traslado cuantitativo del sustrato desde la cuba de homogeneización al reactor;
- Armado de la pila a compostar con la forma geométrica según lo planificado (ver más adelante Figura 4.6);
- Pesaje y registro en planilla de la masa total inicial (reactor + RSO);
- Montaje de estructura metálica (para monitoreo de la temperatura másica) y colocación de la cobertura aislante (sólo en los casos de estudiar sistemas adiabáticos);

- Registro en planilla (una por cada dispositivo) de datos complementarios: fecha y hora de inicio, temperatura de la sala y del sustrato inicial, observaciones varias, etc. Un ejemplo de estas planillas se adjunta en el Apéndice L.

Para la ejecución de los pasos anteriores y el monitoreo de parámetros durante las experiencias, se utilizó el equipamiento e instrumental listados a continuación:

- Balanza electrónica, precisión $0,005 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, capacidad máxima 30 kg (Marca: Systel, modelo: Clipse, Bumer 30);
- Indicadores portátiles con sensores de temperatura y humedad relativa ambiente (Marca: Rotronic ag, modelo: Hygropalm 1);
- Medidores de temperatura portátiles con microprocesador y termocupla con sonda de 1 m de largo (Marca: Hanna, modelo: HI 93510);
- Estructura metálica de guía para el monitoreo detallado de la temperatura (construida con perfiles de aluminio de 5 cm ancho, abertura en el centro de 2 cm de diámetro, por 36 cm de largo con dobleces a cada lado de 5 cm para sujetarse de las paredes laterales del reactor), complementada con pie y brazo con abrazadera con gancho (para sostener termocupla);
- Cobertura aislante (casos de condición de contorno adiabático) compuesta de dos capas: una de guata celulósica de 3 cm de espesor (conductividad térmica $0,039 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) y otra de membrana asfáltica aluminizada de 1 cm de espesor (material utilizado como

aislante para techos, conductividad térmica $0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

4.6.5 Planificación de los muestreos y monitoreos

En la Tabla 4.6 se presenta a modo de ejemplo un cronograma del muestreo y monitoreo de parámetros llevados a cabo en cada experiencia.

El período identificado como “activo” incluye la fase mesofílica inicial, termofílica y de enfriamiento, mientras que la fase de estabilización y maduración se corresponde con la etapa de curado del sustrato, descritas como tales en el capítulo 2 (sección 2.6) de esta Tesis.

Tabla 4.6 Cronograma de muestreos y determinaciones analíticas.

| Parámetros a determinar, muestreo y/o mediciones a realizar | Días de proceso | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|----|----|-------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | ... | 14 | 30 | 60; 90; 180 |
| Extracción de muestra para análisis | X | X | X | X | X | X | X | X | | | X | | X | X | X |
| Humedad | X | X | X | X | X | X | X | X | | | X | | X | X | X |
| pH | X | | X | | X | | | X | | | X | | X | X | X |
| % Cenizas, %SV, %C _{org} | X | X | X | X | X | X | X | X | | | X | | X | X | X |
| Lignina Total | X | | | | X | | | X | | | X | | X | X | X |
| Nitrógeno Total | X | | X | | X | | | X | | | X | | X | X | X |
| Pesadas Reactor | X | X | X | X | X | X | X | X | | | X | | X | X | X |
| Altura máxima de la pila | X | X | X | X | X | X | X | X | | | X | | X | X | X |
| Densidad aparente | X | X | X | X | X | X | X | X | | | X | | X | X | X |
| Distribución del tamaño de partículas (granulometría) | X | | | | | | | | | | X | | X | X | X |
| Temperatura másica y ambiental | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Índice de Germinación | | | | | | | | | | | | | | X | X |

Ref.:  Período Activo
 Fase Estabilización / Maduración

4.6.5.1 Monitoreos y registro de variables y condiciones de proceso durante el desarrollo de las experiencias

a) Medición y registro de la temperatura másica (T)

La misma se llevó a cabo según los siguientes criterios:

- Período térmicamente más activo: entre 4 y 6 mediciones diarias,
- Fase de estabilización y maduración: entre 2 y 3 mediciones diarias;
- En cada caso, se registró como “temperatura de post volteo” a la temperatura de la masa medida 5 minutos posterior a cada volteo;
- En cada reactor y momento de muestreo, las mediciones se realizaron siempre en los mismos puntos de la masa, pudiendo localizarse en:
 - Único punto (ver Figura 4.4, a y b): medición en el centro medio de la masa;
 - Múltiples puntos (ver Figura 4.5, a y b): medida en tres niveles distintos según la altura del sustrato (fondo, medio y sub superficial), y en dos lugares según el ancho del reactor (borde y centro).

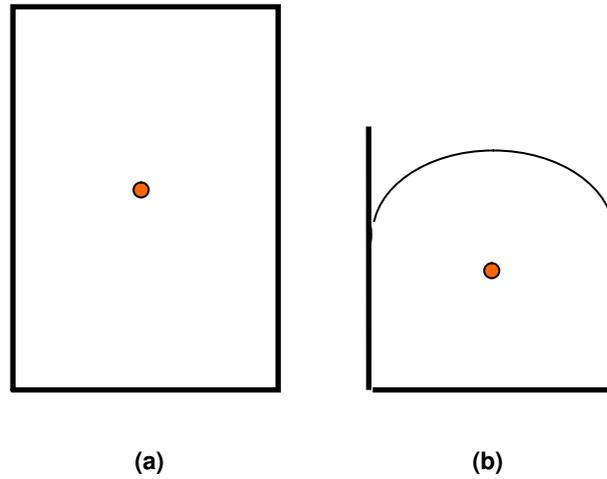


Figura 4.4 (a) Vista superior; (b) transversal (lateral) del reactor con un único punto de monitoreo de T .

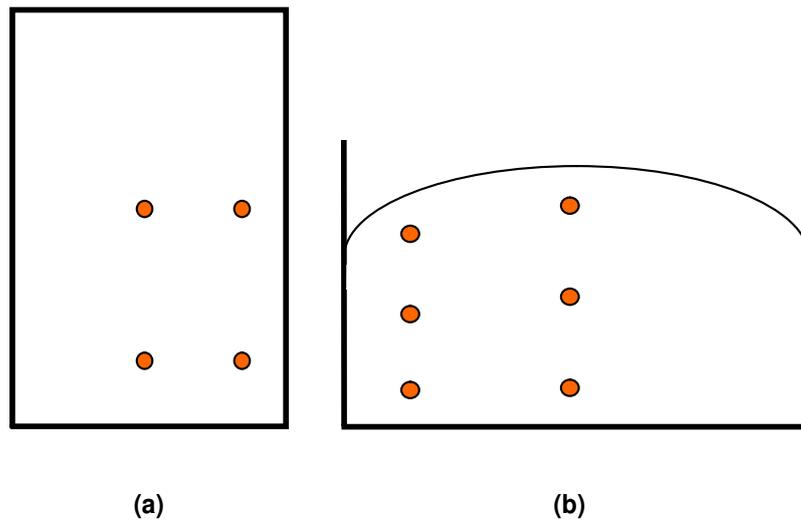


Figura 4.5 (a) Vista superior; (b) transversal (frente) del reactor con múltiples puntos de monitoreo de la temperatura másica. Los puntos en naranja indican la localización de la termocupla.

b) Medición y registro de la temperatura de la sala de laboratorio (T_{ref})

- La medición y registro de este parámetro se llevó a cabo con la misma

frecuencia que el monitoreo de la temperatura másica;

- Con un higrómetro calibrado se midió la temperatura y humedad relativa del aire de la sala sobre la superficie superior de la pila de sustrato (a unos 2 cm aproximadamente); y
- Con termocupla calibrada se registró en cada oportunidad el valor de la temperatura de la sala en un punto fijo alejado de los reactores. Los valores de temperatura media de la sala resultaron, en promedio:
 - Para los meses septiembre a marzo: 23,8 °C
 - Para los meses de abril a agosto: 17,2 °C

c) Requerimientos de agua adicional

A partir de determinaciones de humedad llevadas a cabo durante sucesivos muestreos, se determinó el agua evaporada, reponiéndose dicha cantidad en forma artificial (riego superficial, en forma de lluvia, con agua corriente), a fin de mantenerla aproximadamente constante respecto del valor inicial propuesto.

d) Implementación de los volteos manuales

En el marco de la metodología de compostaje estudiada, los volteos del sustrato se implementaron en cada caso de la siguiente forma:

- Modalidad: Mezclado manual en forma envolvente, trasladando repetidas veces el sustrato desde la zona media-central de la pila (por lo general a mayor temperatura) hacia la zona exterior (menos

caliente), y viceversa;

- Duración: 2 min aproximadamente;
- Frecuencia: según lo previsto por la planificación y condición estudiada (volteos tipo “A” o “B”, ver descripción en la sección 4.7).

e) Registro de pesadas y altura de la pila

Según la frecuencia establecida por la planificación, se procedió a pesar el reactor (residuos + contenedor), y a tomar una muestra de material.

A partir de la determinación de la humedad promedio, y descontando al valor de pesada total la tara del reactor, se determinó la masa seca de sólidos remanente en cada momento. Por otro lado, con la medición y registro de la altura máxima de la pila de sustrato y teniendo en cuenta la forma geométrica de cada pila, se calculó el volumen másico ocupado por ésta. Con el dato de la masa de material y este último de volumen, se calculó en cada momento la densidad aparente del sustrato *en el reactor*, comparándosela luego con la determinada aplicando la técnica analítica sobre la muestra extraída, pudiéndose constatar con mayor precisión el efecto de densificación sufrida por el sustrato a lo largo de los ensayos.

4.7 Condiciones estudiadas

En base a lo expuesto hasta el momento tanto en el presente capítulo como en los precedentes, se definieron como condiciones de estudio a ser abordadas en esta Tesis las mencionadas en la siguiente Tabla 4.7:

Tabla 4.7 Condiciones y rangos estudiados del compostaje de RSO a escala laboratorio.

| Condición | Rango estudiado |
|---|--|
| Masa de sustrato inicial (kg, b.h.) | 1 a 10 |
| Composición inicial (relación C/N) | 20 a 65 |
| Contenido de humedad inicial (% , b.h.) | 50 a 85 |
| Régimen de volteos | Tipo A; Tipo B |
| Condición de contorno (superficie superior de la pila) | Sistemas abiertos vs. cerrados o adiabáticos |
| Forma geométrica de la pila | Rectangular; semicilíndrica; triangular |

En relación a los tipos de regímenes de volteos, los que finalmente se estudiaron se definen como sigue:

- **Volteos “Tipo A”:** Realizados a intervalos de tiempo variable, luego de un pico de temperatura, y una vez manifestada una tendencia descendente de T en el sustrato;

- **Volteos “Tipo B”:** Realizados a intervalos de tiempo constante y prefijado arbitrariamente (e.g., diariamente, o cada 2, 4 o 7 días), independientemente de la evolución térmica del sustrato;

En cuanto a las formas geométricas de las pilas trabajadas, estas se ilustran en la siguiente Figura:

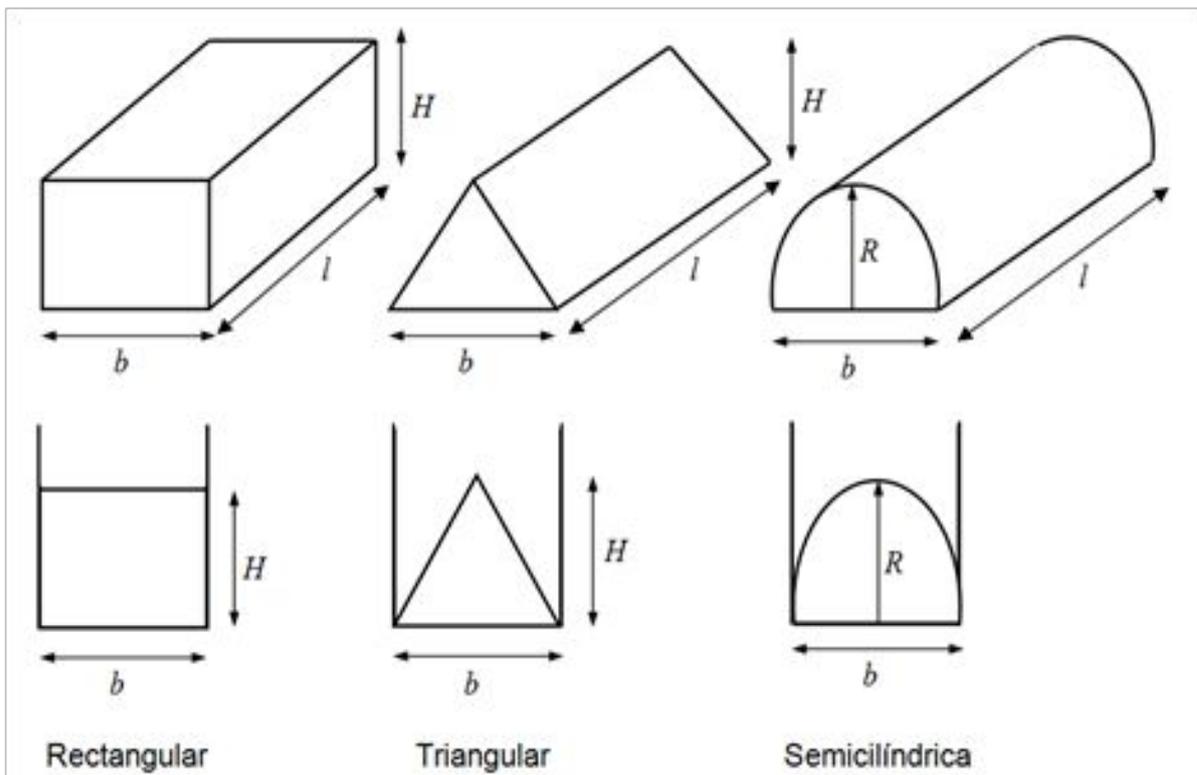


Figura 4.6 Representación gráfica de las distintas geometrías de pilas estudiadas.

4.8 Corridas experimentales

El total de experiencias realizadas incluyendo previas, repeticiones y de control (blanco) para garantizar la calidad de los resultados se compone de un completo set de veintiocho (28) ensayos. Cada uno de ellos, se llevó a cabo en reactores a escala laboratorio como los descritos, organizados en “paquetes” de corridas experimentales operadas en paralelo, de distinta duración y condiciones operativas. Dichas corridas se realizaron entre marzo de 2009 y septiembre de 2011, en instalaciones del laboratorio de la Planta Piloto del Predio CCT-CONICET Santa Fe destinado para tal fin, a temperatura ambiente y humedad relativa de la sala.

En el Apéndice M puede consultarse una ficha técnica por cada paquete de corridas experimentales realizado. En él puede constatarse que cada paquete se diseñó en función de un ensayo o configuración de “referencia” (es decir, con una determinada mezcla de RSO, relación C/N, pH y humedades iniciales, densidad, granulometría, condición de contorno, etc.), a partir del cual se fijaban las condiciones de las restantes experiencias operadas en paralelo, variando un parámetro por vez. Un ejemplo de la evolución típica que tienen las principales variables monitoreadas y parámetros fisicoquímicos determinados durante los ensayos, se puede consultar en el Apéndice O.

De los 28 ensayos iniciales, finalmente aquellos realizados con diferentes masas iniciales (los N° 4 al 9 y 17 al 20), si bien se informa su configuración, no se analizaron ni se presentan sus resultados en esta Tesis. Esto se debe a que las primeras (experiencias N° 4 a la 9), junto con las N° 1, 2 y 3, formaron parte de las utilizadas para poner a punto de las técnicas analíticas y realizar los ajustes necesarios en la metodología implementada en esta fase experimental de la Tesis. Por su parte, los ensayos N° 17 al 20 también realizados con masa inicial diferente,

ante la imposibilidad de manejar tantas variables durante la etapa de validación cuantitativa del modelo, también se decidió no incluir sus resultados en el presente trabajo. Por tal motivo, se optó utilizar entonces datos únicamente provenientes de experiencias con la máxima masa inicial de sustrato probada (igual a 10 kg), ya que se comprobó que permitían un mejor desarrollo térmico de las experiencias y con ello, el estudio global del proceso, a la vez de contribuir para el análisis de las restantes condiciones estudiadas con datos comparables entre sí.

Bajo esta premisa, resultaron elegidos quince (15) ensayos que mantenían dicha condición inicial como constante, a partir de los cuales se obtuvieron a su vez dos “paquetes de datos experimentales”. Con uno de ellos se realizó la estimación de los parámetros libres del modelo, mientras que con el segundo fue posible estudiar las restantes condiciones inicialmente propuestas (e.g., el contenido de humedad inicial, composición del sustrato, condición de contorno, forma de la pila y frecuencia de volteos), cuyos resultados se presentan y discuten más adelante en el capítulo 7.

Como puede deducirse de lo anterior, el conjunto de datos experimentales derivados de la presente fase experimental y que finalmente fueron utilizados, permitieron obtener como resultado un modelo calibrado y validado experimentalmente, alcanzando así uno de los objetivos principales que motivaron este trabajo de Tesis.

Capítulo 5

Modelado del

Proceso

Capítulo 5: Modelado del Proceso

5.1 Introducción

El proceso de compostaje se lleva a cabo en sistemas que desde el punto de vista de la ingeniería química, resultan de lo más complejos. Desde los pequeños y controlados dispositivos experimentales de laboratorio hasta las escalas de aplicación, en todos los casos rigurosamente se combinan balances de movimiento, materia y energía, en medios que son heterogéneos, multifásicos, reactivos y multicomponentes (con cambios de fase), mayoritariamente abiertos en su relación con el medio exterior. Más aún, los balances se encuentran íntegramente acoplados por lo cual su formulación y resolución completa utilizando herramientas de cálculo numérico representa un esfuerzo fenomenal.

Si bien este trabajo de Tesis se centra en el modelado de los balances de materia y energía térmica, dándole mayor relevancia a la etapa inicial *térmicamente más activa* del proceso, en este capítulo se presentan a modo introductorio las bases de un modelo “completo” de ecuaciones de balance, señalando en cada término los aspectos más destacados y avanzando mediante hipótesis simplificadoras en el desarrollo de un grupo de “ecuaciones de trabajo” que, en su modo operativo, se adapten a un sistema de compostaje que utiliza el volteo periódico como método de aireación, abordando así uno de los puntos pendientes a desarrollar en el área de modelado del compostaje.

Las ecuaciones que se derivan representan matemáticamente un modelo que, luego de verificarse y ajustarse con un conjunto de datos experimentales, puede

utilizarse de dos maneras distintas. Por un lado como herramienta de simulación, i.e. que permita dadas determinadas condiciones iniciales (e.g., tipo de sustrato, contenido de agua, forma pila) y operativas (frecuencia de volteo, aislación térmica, condiciones meteorológicas), “predecir” la evolución temporal y espacial de variables críticas como la temperatura o el grado de avance de la reacción. Por otro lado, operando en modo “diseño”, partiendo de ciertas condiciones iniciales poder estimar cuáles son las condiciones óptimas para lograr un determinado “requerimiento” de salida, como por ejemplo la temperatura máxima y su duración, la frecuencia de volteos, la relación área interfase/masa, la forma de la pila que optimiza la relación anterior, etc.. Debe señalarse que, dada la amplia variabilidad de los sustratos a procesar, son necesarios de cualquier manera un conjunto de parámetros físicos y químicos propios del sistema a procesar, que pueden obtenerse de estudios experimentales específicos y a la vez sencillos, o de correlaciones empíricas, como se describe en el capítulo 6.

Finalmente, utilizando la misma metodología existe la posibilidad de ampliar el modelo incorporando nuevos términos que representen el efecto y evolución de otras variables o condiciones, como por ejemplo: expresiones cinéticas más complejas y detalladas, balances de N , balances en cada fase, convección forzada de aire, volteo mecánico; de manera de expandir los campos de aplicación de las “ecuaciones de trabajo” al estudio de otras etapas del proceso vinculadas a la estabilización y maduración, la conservación de nutrientes, la calidad del compost producido, cuestiones que exceden este trabajo de Tesis.

5.2 Ecuaciones Generales de Balance

Las ecuaciones [5.1] a [5.3] expresan el principio de conservación de materia, de cantidad de movimiento y de energía en forma diferencial. Las mismas describen la variación (distribución) de la densidad, la velocidad y la temperatura con respecto al tiempo y a la posición para un dado sistema coordenado (Whitaker S., 1977):

$$\frac{\partial \rho_{(\underline{x}, t)}}{\partial t} + [\underline{\nabla} \cdot (\rho_{(\underline{x}, t)} \underline{v}_{(\underline{x}, t)})] = 0 \quad [5.1]$$

$$\rho_{(\underline{x}, t)} \left(\frac{\partial \underline{v}_{(\underline{x}, t)}}{\partial t} + \underline{v}_{(\underline{x}, t)} \cdot \underline{\nabla} \underline{v}_{(\underline{x}, t)} \right) = \rho_{(\underline{x}, t)} \frac{D \underline{v}_{(\underline{x}, t)}}{Dt} = \rho_{(\underline{x}, t)} \underline{g} + \underline{\nabla} \cdot \underline{\underline{T}} \quad [5.2]$$

$$\rho_{(\underline{x}, t)} c_p \left(\frac{\partial T_{(\underline{x}, t)}}{\partial t} + \underline{v}_{(\underline{x}, t)} \cdot \underline{\nabla} T_{(\underline{x}, t)} \right) = -\underline{\nabla} \cdot \underline{q}_{(\underline{x}, t)} + T_{(\underline{x}, t)} \beta \frac{Dp}{Dt} + \underline{\nabla} \underline{v}_{(\underline{x}, t)} : \underline{\underline{\tau}} + \phi_{(\underline{x}, t)} \quad [5.3]$$

donde $\underline{\nabla} \cdot \underline{\underline{T}} = -\underline{\nabla} p - [\underline{\nabla} \cdot \underline{\underline{\tau}}]$, y tanto la densidad ($\rho_{(\underline{x}, t)}$) como la velocidad ($\underline{v}_{(\underline{x}, t)}$) corresponden a valores “totales” en cada punto del volumen.

Como se verá en secciones posteriores, ecuaciones equivalentes se pueden formular para cada uno de los componentes considerados del sistema. Además, las ecuaciones pueden ser integradas en un determinado volumen para obtener los balances macroscópicos. Esta integración permite pasar de una escala “micro” a una “macro” en la cual, si bien se pierde el detalle de los campos de concentración (densidad), velocidad y temperatura, permite modelar los fenómenos intervinientes en un dado proceso en términos de variables “promedios” (temperatura, concentraciones) y flujos globales de materia, energía y cantidad de movimiento que entran y salen del

sistema, y que son de interés a la hora de resolver problemas aplicados de ingeniería. En esta Tesis se trabaja en ambas escalas, tratando de lograr un set de herramientas de modelado de distinto grado de complejidad matemática y de aplicación.

Por otra parte, si bien cada uno de estos balances será tratado en forma particular, es oportuno señalar que se trata de ecuaciones diferenciales no ordinarias (en derivadas parciales ya que poseen más de una variable independiente), que pueden contener funcionalidades no lineales, en estado no estacionario, de carácter vectorial e incluso tensorial, y en la mayoría de los casos acopladas. Todos estos aspectos exponen la complejidad matemática de estas ecuaciones y de los métodos numéricos requeridos para su resolución.

5.2.1 Balance de Cantidad de Movimiento (BCM)

La resolución de la ecuación [5.2] permite obtener el perfil de velocidades del sistema, el cual debe incorporarse al resto de ecuaciones de balance al representar las condiciones hidrodinámicas del mismo.

Es necesario en este punto señalar que, específicamente en el compostaje, este tipo de balance adquiere mayor relevancia cuando se modelan, por ejemplo, sistemas que operan con convección forzada o inducida como método de aireación. Un adecuado desarrollo del problema puede revisarse en los trabajos de Das & Keener (1997), Keener et al. (2005), Bari (2011) y Zambra et al. (2011). Otro caso particular de aplicación del BCM es cuando se modela la convección natural, originada por las variaciones de densidad por efectos de gradientes de temperatura que tienen lugar en el interior de la pila durante el proceso; resultando también de suma complejidad su abordaje y resolución (Haug, 1993).

Como se describe en el capítulo 1, los objetivos de esta Tesis se centran en el modelado y verificación experimental de un sistema que utiliza la técnica de compostaje de pilas con volteos manuales. En ese caso, considerando que los flujos de material son despreciables, las velocidades pueden suponerse iguales a cero y, por lo tanto, el conjunto de componentes del sistema está en “reposo”, i.e., no existen flujos convectivos de materia. Rigurosamente, para poder simplificar el BCM existen un conjunto de hipótesis complementarias que deben señalarse, como por ejemplo:

- el proceso se lleva a cabo en condiciones de presión constante;
- el sistema es incompresible ($\rho_{(x,t)} = \text{cte.}$);
- los efectos viscosos y los de campos de fuerzas (e.g., gravitatorio) son despreciables.

En estas condiciones todos los términos del BCM pueden considerarse $\equiv 0$. Esta simplificación, que será utilizada luego en el resto de ecuaciones de modelado, es posible efectuarla por el tipo de sistema y las condiciones utilizadas en esta Tesis, pero debe quedar perfectamente claro que en otros casos en los que sí exista convección (forzada o natural), se puede incorporar el modelado del BCM y su resolución, calculando las distribuciones de velocidades para su incorporación al resto de balances.

5.2.2 Balance de Materia (BM)

La ecuación [5.1] conocida como “ecuación de continuidad”, describe la

variación temporal de la densidad del sistema para cada punto fijo, como consecuencia de la divergencia del vector velocidad másica $\rho_{(x,t)}\underline{v}_{(x,t)}$ (Bird et al., 1992) y, como se dijera antes, representa el principio de conservación de la materia, con el término de la derecha igual a cero aun en el caso de existir reacciones químicas (exceptuando procesos como los radiactivos donde puede haber transformación de materia en energía).

Expresiones equivalentes pueden ser formuladas para cada componente (i) , como se presenta en la ecuación [5.4] donde, manteniendo el sistema en condiciones de estado no estacionario de operación similar a lo propuesto por varios autores (entre ellos Ekinci et al. 2005; Keener et al. 2005; Lin et al. 2008; Petric 2008; de Guardia et al. 2012), el término de la derecha $R_{i(x,t)}$ representa las reacciones químicas en las cuáles participa el componente (i) , con el signo correspondiente.

$$\frac{\partial \rho_i(\underline{x}, t)}{\partial t} + \left[\underline{\nabla} \cdot (\rho_i(\underline{x}, t) \underline{v}_i(\underline{x}, t)) \right] = R_i(\underline{x}, t) \quad [5.4]$$

Para el modelado del sistema objeto de esta Tesis, como se detalla en la sección del BCM, se supone que la velocidad másica global $(\underline{v}_{(x,t)})$, así como las velocidades de cada componente $(\underline{v}_i(\underline{x}, t))$ son iguales a cero, eliminándose con ello el segundo término de la izquierda de la ecuación [5.4]. Sin embargo, para ampliar la “utilidad” del uso de las ecuaciones a distintas condiciones del proceso de compostaje, se puede incorporar un término “fuente o sumidero” representado por $\pm \Omega(\underline{x}, t)$, donde se pueden incluir matemáticamente algunos efectos de incorporación y/o salidas de

materia al/del sistema que en general son de muy difícil modelado a partir de flujos máscicos, como por ejemplo el agregado de agua, el efecto de las lluvias, pérdidas de materia por distintas razones, etc.. Bajo dichas consideraciones se obtiene la ecuación [5.5]:

$$\frac{\partial \rho_i(\underline{x}, t)}{\partial t} = \pm R_i(\underline{x}, t) \pm \Omega_{i,j}(\underline{x}, t) \quad [5.5]$$

De acuerdo con la expresión anterior, en cada punto del sistema, el cambio en el tiempo de la concentración del componente “i” es igual a su velocidad neta de desaparición o generación (representados respectivamente por el signo \pm de $R_i(\underline{x}, t)$) y las variaciones debidas a los “j” procesos físicos contenidos en $\pm \Omega_{i,j}(\underline{x}, t)$, por unidad de volumen del sistema.

Considerando la dificultad de obtener y verificar valores puntuales de concentraciones, y teniendo en cuenta el objetivo de obtener herramientas de relativa simplicidad en su aplicación, la ecuación [5.5] puede integrarse término a término en el volumen (V_R):

$$\int_{V_R} \frac{\partial \rho_i(\underline{x}, t)}{\partial t} dV = \pm \int_{V_R} R_i(\underline{x}, t) dV \pm \int_{V_R} \Omega_{i,j}(\underline{x}, t) dV \quad [5.6]$$

Asumiendo la hipótesis de que el volumen de integración no depende del

tiempo (Kaiser, 1996; Petric & Selimbašić, 2008; De Guardia et al., 2012), la derivada puede intercambiarse con el operador integral de modo que:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_R} \rho_i(\underline{x}, t) dV = \pm \int_{V_R} R_i(\underline{x}, t) dV \pm \int_{V_R} \Omega_{i,j}(\underline{x}, t) dV \quad [5.7]$$

Aplicando el Teorema del Valor Medio (o la definición de promedio) en cada término de la ecuación anterior, se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \langle \rho_i(t) \rangle_{V_R} = \pm \langle R_i(t) \rangle_{V_R} \pm \langle \Omega_{i,j}(t) \rangle_{V_R} \quad [5.8]$$

que se resuelve con la condición inicial:

$$\rho_i(t=0) = \rho_i(0) = \rho_{i,0} \quad \forall V_R \quad [5.9]$$

siendo $\rho_{i,0}$ la concentración inicial del componente (i).

Debe notarse que en la ecuación [5.8] la concentración del componente (i) es sólo función del tiempo, i.e., la concentración está representada por un valor promedio en el volumen. En este planteo subyace el considerar al sistema reaccionante como

pseudo-homogéneo, hipótesis que también fuera asumida por numerosos autores entre ellos Keener et al. (1993, 2005), Das & Keener (1997), Higgins & Walker (2001) y Lin et al. (2008). Con esta hipótesis se permite resolver la ecuación, para los componentes de interés del sistema, con mayor simplicidad. Para ello es necesario incorporar ecuaciones cinéticas que representen las velocidades de reacción de los mismos, como se presenta a continuación.

5.2.2.1 Modelado de la cinética del proceso

Uno de los objetivos de esta Tesis es el modelado detallado de los balances de materia y energía durante la etapa térmicamente más activa del proceso. Por esta razón, de los elementos químicos que participan en la reacción de descomposición del sustrato, se seleccionan como reactivos claves a los sólidos totales (C_s) y al oxígeno (C_{O_2}), mientras que de los productos generados se escoge el agua (C_{H_2O}). Esta selección no es arbitraria, sino que responde a la relevancia que tienen estos tres compuestos tanto en el balance de materia como en el de energía por medio de la generación y consumo de calor. De interés el estudio del compostaje en términos de las características del compost obtenido (conservación de nutrientes, madurez, calidad, etc.), la elección de los compuestos claves sería distinta e incluiría, por ejemplo, a los gases generados. De cualquier manera, como se indicó al comienzo, la metodología instrumentada permite extender las ecuaciones a otros componentes.

Además de las expresiones cinéticas que modelen las velocidades de reacción de los compuestos seleccionados, se necesita una relación estequiométrica de degradación del sustrato como la presentada en la ecuación [2.1] del capítulo 2, para obtener coeficientes estequiométricos que vinculen a reactivos y productos, que

permitan modelar las tasas de consumo y generación de éstos.

Como se detalla en el capítulo 3, muchos autores proponen cinéticas simplificadas de tipo pseudo primer orden con una constante global k_G (entre ellos Kaiser 1996; Higgins & Walter 2001; Monsalve et al. 2005; Richard et al. 2006; Mudhoo & Mohee 2007; Bueno et al. 2008a, b; Mason 2008, 2009 y Vlyssides et al. 2009). Además, de acuerdo a la línea de trabajo desarrollada por Keener et al. (1993, 1996, 1997, 2000, 2005) y asumida luego por otros autores, una forma de expresar el contenido de material “orgánico” no reactivo o recalcitrante, es incorporando a la expresión cinética la concentración de equilibrio $C_{s,e}$. El resultado es la siguiente ecuación:

$$R_s(t) = -k_G \cdot (C_s(t) - C_{s,e}) \quad [5.10]$$

donde:

$R_s(t)$ = Velocidad de degradación de los sólidos totales
 (kg Sólido · m⁻³ · d⁻¹);

k_G = Constante cinética *global o aparente* de pseudo 1° orden (d⁻¹).

Se debe mencionar que tanto la $C_{s,e}$ como la k_G que caracterizan a cada sustrato, se pueden obtener a partir de sencillos experimentos. Una vez más es

importante remarcar que la k_G no es intrínseca sino que se trata de una *constante global o aparente* en la cual quedan incluidas las dependencias con otras variables que afectan la velocidad de descomposición del material.

Con el objetivo de incorporar a la expresión cinética el efecto de la concentración de oxígeno, escasamente modelado en sistemas con volteo, se propone una función semi-empírica decreciente en el tiempo " $f_{O_2}(t)$ " que represente en forma fenomenológica a la C_{O_2} , como la que se presenta a continuación:

$$f_{O_2}(t) = \frac{(t_v - t)}{t_v} C_{O_2,0} \quad \text{con } f_{O_2}(t) \in [0, C_{O_2,0}] \wedge t \in [0, t_v] \quad [5.11]$$

siendo $t_v = t_{\text{volteo}}$ el tiempo de volteo, y $C_{O_2,0}$ la concentración de oxígeno en aire al tiempo $t = 0$, y que cumple con las siguientes condiciones:

$$t = 0, \quad f_{O_2} = C_{O_2,0} \quad [5.12]$$

$$t = t_v, \quad f_{O_2} = 0, \quad \text{con } t_v = t_{\text{volteo}} = \text{tiempo de volteo (d)} \quad [5.13]$$

Realizando dicha incorporación en la expresión de la velocidad de descomposición del reactivo, se llega a:

$$R_s(t) = -k_G \cdot f_{O_2}(t) \cdot (C_s(t) - C_{s,e}) \quad [5.14]$$

Con la función de ajuste $f_{O_2}(t)$ propuesta se observa que cuando $t = t_{\text{volteo}}$, $f_{O_2}(t) = 0 \Rightarrow R_s(t) = 0$ y el proceso de degradación aeróbica se detiene. Este efecto condice con el planteo realizado en los trabajos de Lin et al. (2008) y Petric (2008), donde aplican en sus modelos la hipótesis de que las reacciones son predominantemente del tipo aeróbicas, despreciando la contribución de reacciones anaeróbicas en la degradación del material. Por otra parte, esta función se puede normalizar dividiendo por la concentración de oxígeno en aire, pudiéndose representar así la condición de oxígeno no limitante, en la cual a $t = 0 \Rightarrow f_{O_2} = 1$. En el siguiente capítulo 6 de Resolución y Análisis de Sensibilidad del Modelo, se ilustran algunos ejemplos de los efectos que el oxígeno como reactivo limitante representado a través de la función anterior, ejerce sobre la velocidad de descomposición del sustrato y, por ende, sobre la evolución térmica del sistema; así como también simulaciones en condiciones de oxígeno no limitante. Luego en el capítulo 7, se retoma este aspecto incluyendo ejemplos donde se analiza el efecto de los volteos periódicos sobre el desarrollo de la temperatura, contrastando datos experimentales con datos teóricos resultantes del modelo.

Para completar el desarrollo de la cinética de los elementos claves seleccionados, resta modelar la velocidad de generación de agua. Considerando que

ésta es un producto de la reacción principal (Das & Keener 1997; Higgins & Walker 2001; Zhang et al. 2010), puede escribirse en función de la evolución de los sólidos totales, resultando:

$$R_{H_2O}(t) = -b_{H_2O} \cdot R_s(t) = b_{H_2O} \cdot k_G \cdot f_{O_2}(t) \cdot (C_{s(t)} - C_{s,e}) \quad [5.15]$$

siendo

b_{H_2O} = coeficiente estequiométrico para el agua formada en la reacción de descomposición del sustrato, en $(\text{kg}_{H_2O} \cdot \text{kg Sólido degr.}^{-1})$, y

$R_s(t)$, k_G , $C_{s(t)}$ y $C_{s,e}$ definidos como antes, pudiéndose estimar b_{H_2O} a partir de relaciones estequiométricas aproximadas (Tchobanoglous et al. 1993; Shah 2000; Ghaly et al. 2006),

5.2.3 Balance de Energía Térmica (BET)

El primer paso para abordar el modelado de la transferencia de energía térmica es retomar la ecuación [5.3]:

$$\rho_{(x,t)} c_p \left(\frac{\partial T_{(x,t)}}{\partial t} + \underline{v}_{(x,t)} \cdot \underline{\nabla} T_{(x,t)} \right) = -\underline{\nabla} \cdot \underline{q}_{(x,t)} + T_{(x,t)} \beta \frac{Dp}{Dt} + \underline{\nabla} \underline{v}_{(x,t)} : \underline{\underline{\tau}} + \phi_{(x,t)} \quad [5.3]$$

Y, como primera consideración, despreciar aquellos términos fuente que pueden simplificarse directamente:

$\underline{\nabla} \underline{V}_{(x,t)} : \underline{\tau}$ Disipación viscosa, sólo importante en procesos moleculares que involucran el movimiento de fluidos (gases o líquidos);

$T_{(x,t)} \beta \frac{Dp}{Dt}$ Trabajo reversible, despreciable en procesos a presión constante;

$\left(\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \right)$ y uniforme ($\underline{\nabla} p = 0$) en todo el sistema.

obteniendo la ecuación [5.16], que conserva los términos de acumulación $\left(\frac{\partial T_{(x,t)}}{\partial t} \right)$, convección $\left(\underline{V}_{(x,t)} \cdot \underline{\nabla} T_{(x,t)} \right)$, flujos $\left(-\underline{\nabla} \cdot \underline{q}_{(x,t)} \right)$, y fuentes de generación/desaparición $\left(\phi_{(x,t)} \right)$ debida a otros procesos (e.g., reacción química).

$$\rho_{(x,t)} c_p \left(\frac{\partial T_{(x,t)}}{\partial t} + \underline{V}_{(x,t)} \cdot \underline{\nabla} T_{(x,t)} \right) = -\underline{\nabla} \cdot \underline{q}_{(x,t)} + \phi_{(x,t)} \quad [5.16]$$

Como se mencionara, la ecuación diferencial no ordinaria [5.16] es la expresión matemática de la distribución temporal y espacial de la temperatura, representada por la función escalar de variable vectorial $T(\underline{x}, t)$, y que puede tomar estructuras más o menos complejas de resolver, de acuerdo al sistema coordenado que se utilice (Ozisik et al., 1980). El término fuente o sumidero representado de manera “formal” por

$(\phi_{(\underline{x}, t)})$, en realidad es una suma y/o resta de términos de distinto origen (nuclear, eléctrico, químico, u otras fuentes), que en algunos casos pueden incorporar incluso no linealidades en la ecuación diferencial, cuestión que excede a esta Tesis.

Previo a la derivación de las ecuaciones “de trabajo”, debe recordarse que en esta Tesis el desarrollo del modelado de los procesos térmicos presentes en el compostaje es uno de los objetivos más importantes, y por ello se analizan dos dominios que resultan complementarios en cuanto a la información que proveen. Por una parte el modelo detallado de distribución espacio-temporal de $T(\underline{x}, t)$ que permite predecir, para cada tiempo de proceso, cómo se distribuye la temperatura dentro del sistema reaccionante, los flujos de calor, los efectos que pueden producir distintas condiciones de contorno (e.g., efectos meteorológicos, uso o no de cobertura superficial), las temperaturas máximas, el efecto de la forma del “reactor”, etc. Por otra parte, y no menos importante, se desarrollan expresiones integrales del sistema, i.e., a partir de balances macroscópicos se obtienen promedios volumétricos de la temperatura en función del tiempo que, a pesar de perder información detallada del campo de temperatura, resultan de menor complejidad matemática y por lo tanto de mayor simpleza y utilidad para el estudio de procesos como el compostaje.

5.2.3.1 Distribución espacial y temporal de la temperatura

a) La ecuación diferencial

Considerando lo expresado en la sección 5.1.1 $\underline{V}(\underline{x}, t) = 0$ y despreciando los complejos flujos debidos a la radiación $(\underline{q}^R_{(\underline{x}, \underline{\Omega}, t)})$, la ecuación [5.16] puede tomar la forma de la ecuación diferencial general de conducción de calor:

$$\rho_{(\underline{x}, t)} c_P \left(\frac{\partial T_{(\underline{x}, t)}}{\partial t} \right) = -\underline{\nabla} \cdot \underline{q}_{(\underline{x}, t)} + \phi_{(\underline{x}, t)} \quad [5.17]$$

en la cual $\underline{q}_{(\underline{x}, t)}$ representa exclusivamente los flujos de conducción, y $\phi_{(\underline{x}, t)}$ al conjunto de términos de “generación-desaparición” o “fuente-sumidero” de calor por distintos mecanismos, que ha perdido su carácter de función vectorial para pasar a ser escalar.

Introduciendo en la ecuación [5.17] la Ley de Fourier $\underline{q}_{(\underline{x}, t)} = -k \underline{\nabla} T_{(\underline{x}, t)}$, se obtiene:

$$\rho_{(\underline{x}, t)} c_P \left(\frac{\partial T_{(\underline{x}, t)}}{\partial t} \right) = \underline{\nabla} \cdot [k \underline{\nabla} T_{(\underline{x}, t)}] + \phi_{(\underline{x}, t)} \quad [5.18]$$

donde k es la conductividad térmica. Si ésta se considera constante en el volumen e independiente de la temperatura:

$$\rho_{(\underline{x}, t)} c_P \left(\frac{\partial T_{(\underline{x}, t)}}{\partial t} \right) = k \underline{\nabla}^2 T_{(\underline{x}, t)} + \phi_{(\underline{x}, t)} \quad [5.19]$$

Debe notarse que el operador Laplaciano (∇^2) representa las derivadas segundas de la función $T(\underline{x}, t)$ respecto al sistema coordenado elegido para representar el problema.

La ecuación [5.19] es estrictamente válida para un pequeño volumen material. Para extender su aplicación a todo el volumen del “reactor” considerado como un continuo, debe aplicarse nuevamente la hipótesis de que las propiedades dentro del mismo se mantienen uniformes, i.e., suponer que se puede aproximar a un sistema pseudo-homogéneo, del mismo modo como se procedió para el desarrollo del BM. La condición “crítica” de esa hipótesis, que es ampliamente utilizada en la bibliografía, merece una vez más aclararse ya que a costo de la pérdida de cierta información microscópica se pueden lograr modelos “simples y aplicables” al tipo de sistemas complejos como el compostaje de residuos, que es el objetivo de esta Tesis.

b) Condiciones de contorno e iniciales

La ecuación [5.19] se complementa con la definición del intervalo o región de validez (V_R) , y tiene asociadas las condiciones de contorno e iniciales correspondientes al sistema físico estudiado, que pueden representarse en forma genérica y siguiendo la nomenclatura de Ozisik et al. (1980), como:

$$k_n \frac{\partial T(\underline{x}, t)}{\partial n_n} + h_n T(\underline{x}, t) \equiv F_n(\underline{x}, t) = h_n T_{ref}, \text{ en las fronteras } A_n \text{ de } V_R \quad [5.20]$$

$$T(\underline{x}, t) = T(\underline{x}, t = 0) = T_0(\underline{x}) \quad \text{condición inicial} \quad [5.21]$$

La ecuación [5.20] es conocida como condición de contorno de 3er. Tipo, y representa la existencia de intercambio de energía térmica por convección, a través de las superficies límites de la región, siguiendo la Ley de enfriamiento de Newton respecto a la temperatura exterior T_{ref} , i.e., un flujo de calor por conducción caracterizado por la conductividad térmica k (en el “sólido”), igualado a un flujo por convección al interior del fluido que rodea al sólido, caracterizado por el coeficiente de transferencia de calor pelicular h_n , el cual depende entre otras cosas de las condiciones hidrodinámicas (número de Reynolds) y del número de Nusselt (ver aplicación en el capítulo siguiente).

c) Términos fuentes y sumidero

Como se menciona en párrafos anteriores, $\phi(\underline{x}, t)$ es una expresión formal ya que representa a la sumatoria de un conjunto de términos que pueden ser mayores o menores que 0, que no deben confundirse con los flujos de energía térmica que ingresan o salen por las fronteras, ya que tanto la “generación” como la “desaparición” ocurren “dentro” del volumen material, pudiéndose redefinir de la siguiente forma:

$$\phi_T(\underline{x}, t) = \sum_i \phi_i^{+,-}(\underline{x}, t) \quad \text{T: total, (+): incorpora, (-): pierde} \quad [5.22]$$

Es oportuno señalar que dentro de los términos de generación y/o pérdidas se incluyen los calores involucrados en las reacciones químicas (exotérmicas [+], endotérmicas [-]), los calores latentes de cambios de fases (evaporación [-], condensación [+]) y sensibles dados por el c_p , todos del tipo volumétrico.

5.2.3.2 Balance térmico macroscópico

Existen ecuaciones integradas y simplificadas para el modelado del balance de energía térmica, que son comúnmente utilizadas en problemas de compostaje (Mason, 2006), que se pueden obtener a partir de la formulación del balance macroscópico de energía térmica, considerando los términos “integrados” en todo el volumen del sistema (V_R). De acuerdo a Bird et al. (1992) el sistema está representado por:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Veloc. de} \\ \text{Acumulación} \\ \text{de Energía} \end{array} \right)_{V_R} = \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{Entrada de energía} \end{array} \right)_{V_R} - \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{Salida de energía} \end{array} \right)_{V_R} \pm \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{Producción / Consumo} \\ \text{de energía} \end{array} \right)_{V_R} \quad [5.23]$$

Aplicando los teoremas de la Divergencia, de Transporte de Reynolds, y del Valor Medio sobre la ecuación [5.19] se llega a:

$$\rho c_P \frac{d\langle T \rangle_{V_R}}{dt} = - \left[U \frac{A}{V_R} \cdot (\langle T \rangle_{V_R} - T_{ref}) \right] + \sum_i \langle \phi_i^{+,-}(t) \rangle_{V_R} \quad [5.24]$$

donde las propiedades son promedios volumétricos y por lo tanto dependen únicamente del tiempo. La ecuación anterior se resuelve con la condición inicial:

$$T(t) = T(t=0) = T_0(0) \quad \forall V_R \quad [5.25]$$

Si bien la ecuación [5.24] pierde información detallada del campo de temperaturas (en realidad es complementaria de la ecuación [5.19]), es de mucha utilidad para estudiar, sin mayores complejidades matemáticas y numéricas, el impacto de una serie de parámetros globales sobre el proceso de compostaje.

5.3 Ecuaciones de “trabajo”

En este último punto, partiendo de las ecuaciones derivadas en las secciones anteriores, se obtiene un conjunto de “ecuaciones de trabajo” adaptadas en geometría y características al set up experimental descrito en el capítulo 4, de manera de poder contrastar datos del modelo o “teóricos” con los resultados experimentales, en las distintas condiciones en que fueron obtenidos. Debe señalarse que debido a las distintas configuraciones geométricas de las pilas utilizadas (ver figura 4.6 del capítulo

4), las mismas se aproximan utilizando sistemas coordenados cartesiano y cilíndrico, haciendo la hipótesis en ambos casos de la existencia de simetrías, y resolviendo el problema de BET en 1D al suponer que las variaciones más importantes de temperatura se producen en la dirección de la altura de la pila (Das & Keener 1997, Moraga et al. 2009).

En la Tabla 5.1 se presenta el conjunto de ecuaciones y las condiciones iniciales y de contorno correspondientes, mientras que en la Tabla 5.2 se listan los parámetros físicos y químicos del modelo, detallándose en cada caso el tratamiento que se le dará a cada uno en este trabajo (ya sea adoptado de la literatura, estimado mediante la optimización de datos del modelo, calculado en forma directa y/o determinado o medido experimentalmente).

5.3.1 La geometría del “reactor”

Para modelar los dispositivos experimentales utilizados en la Tesis, las ecuaciones formales de BM y BET puntuales (ec. [5.5], [5.19]) e integradas (ec. [5.8], [5.24]), cada una según el caso con sus respectivas condiciones iniciales y de borde (ec. [5.9], [5.20], [5.21] y [5.25]), deben expandirse en dos sistemas coordenados distintos válidos para todo el volumen material considerado, obteniéndose los BM y BET que se presentan a continuación.

5.3.1.1 Balances de materia por componentes

Retomando la ecuación general de Balance de Materia para componentes genéricos en su “versión integrada”, reemplazando el uso de “ ρ_i ” por “ C_i ”, e

incorporando las expresiones cinéticas a los BM para los componentes claves considerados, resulta:

a) Para el BM de los sólidos totales:

$$\frac{d}{dt} \langle C_{s(t)} \rangle_{V_R} = \langle R_{s(t)} \rangle_{V_R} \pm \langle \Omega_{s,j(t)} \rangle_{V_R} \quad [5.26]$$

$$C_s(t=0) = C_s(0) = C_{s,0} \quad \forall V_R \quad (\text{condición inicial}) \quad [5.27]$$

Con $R_s(t) = -k_G \cdot f_{O_2}(t) \cdot (C_{s(t)} - C_{s,e})$ la cinética de pseudo primer orden para la degradación del sustrato, $C_{s,0}$ es la concentración inicial del sustrato, y donde $\langle \Omega_{s,j(t)} \rangle_{V_R}$ puede considerarse = 0.

b) Para el BM del contenido de agua:

$$\frac{d}{dt} \langle C_{H_2O(t)} \rangle_{V_R} = \langle R_{H_2O(t)} \rangle_{V_R} \pm \langle \Omega_{H_2O,j(t)} \rangle_{V_R} \quad [5.28]$$

$$C_{H_2O}(t=0) = C_{H_2O}(0) = C_{H_2O,0} \quad \forall V_R \quad (\text{condición inicial}) \quad [5.29]$$

Con $R_{H_2O}(t) = -b_{H_2O} \cdot R_s(t)$ la cinética de formación biológica del agua. En

este caso la suma de términos $\langle \Omega_{H_2O,j}(t) \rangle_{V_R}$ no necesariamente es equivalente a cero, ya que existen procesos físicos (no de reacción) como la evaporación y/o la condensación y otros como la incorporación de agua por distintos medios (e.g., riego, lluvia), que podrían considerarse en este último término. En particular para el caso de “sistemas abiertos” donde existe evaporación de agua, esta se modela como:

$$\langle \Omega_{H_2O,evap} \rangle_{V_R} = -x_{evap} \cdot \langle R_{H_2O}(t) \rangle_{V_R} \quad [5.30]$$

es decir, el agua evaporada es proporcional a la generada a través del coeficiente x_{evap} , que puede tomar distintos valores e impactar fuertemente en el balance de energía térmica.

5.3.1.2 BET puntuales (considerando un modelo 1D)

Por las características del sistema estudiado, asumiendo la hipótesis de simetría en los ejes x y z para el sistema coordenadas cartesianas, y en los ejes θ y z en el correspondiente cilíndrico, se obtiene:

5.3.1.2.1 En coordenadas rectangulares ($T \equiv T(y, t)$)

$$\begin{aligned} (C_S(t)C_{P,S}) \left(\frac{\partial T(y,t)}{\partial t} \right) &= k_S \nabla^2 T(y,t) + \phi_T(y,t) \\ &= k_S \left[\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + \sum_i \phi_i(y,t) \end{aligned} \quad [5.31]$$

$\forall t \geq 0$, en la región comprendida entre $0 \leq y \leq H$.

Condiciones de borde:

En $y = 0$

$$-k_S \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} + h_1 T(y,t) = h_1 T_{ref} \quad \forall t > 0 \quad [5.32]$$

En $y = H$

$$k_S \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} + h_2 T(y,t) = h_2 T_{ref} \quad \forall t > 0 \quad [5.33]$$

Condición inicial ($t = 0$):

$$T(y,0) = T_o(y) \quad \forall y \in [0, H] \quad [5.34]$$

5.3.1.2.2 En coordenadas cilíndricas ($T \equiv T(r, t)$)

$$\begin{aligned}
 (C_{S(t)}C_{P,S}) \left(\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \right) &= k_S \nabla^2 T(r,t) + \phi_T(r,t) = \\
 &= k_S \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \sum_i \phi_i(r,t) \quad [5.35] \\
 &= k_S \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \right] + \sum_i \phi_i(r,t)
 \end{aligned}$$

$\forall t \geq 0$, en la región comprendida entre $0 \leq r \leq R$.

Con las condiciones de borde:

$$\text{En } r = 0 \quad \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = 0 \quad (\text{flujo nulo, condición de simetría}), \quad [5.36]$$

$$\text{En } r = R \quad k_S \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} + h_2 T(r,t) = h_2 T_{ref} \quad (\text{flujo impuesto}), \quad [5.37]$$

$\forall t > 0$, y la condición inicial ($t = 0$):

$$T(r,0) = T_o(r) \quad \forall r \in [0, R] \quad [5.38]$$

Cabe aclarar que mientras en el sistema cartesiano la altura de la pila de compost se representa con la coordenada “y” abarcando el rango $[0, H]$, su equivalente en el sistema de coordenadas cilíndricas es “r” en el rango $[0, R]$.

5.3.1.3 BET integrado ($T \equiv T(t)$)

$$C_S c_{P,S} \frac{d\langle T \rangle_{V_R}}{dt} = - \left[U \frac{A_4}{V_R} \cdot (\langle T \rangle_{V_R} - T_{ref}) + h_2 \frac{A_2}{V_R} (\langle T \rangle_{V_R} - T_{ref}) \right] + \sum_i \langle \phi_i^{+,-}(t) \rangle_{V_R} \quad [5.39]$$

$$\forall t \geq 0$$

cuya condición inicial genérica es:

$$T(t=0) = T_o \quad \forall V_R. \quad [5.40]$$

donde:

$A_4 =$ Área de interfase del material en contacto con otras superficies sólidas (paredes laterales y base del reactor), en (m^2);

$A_2 =$ Área superior de la pila, en (m^2)

siendo $C_S = C_s + C_{H_2O}$, $c_{P,S} = x_s \cdot c_{P,s} + x_{H_2O} \cdot c_{P,H_2O}$, (con x_i la fracción másica de cada componente), y k_S , $\langle T \rangle_{V_R}$, U , T_{ref} y $\sum_i \langle \phi_i^{+,-}(t) \rangle_{V_R}$ definidos como antes.

5.3.1.4 Los términos fuentes y sumidero

Los términos fuentes y sumideros representados en forma genérica por $\sum_i \phi_i^{+,-}(\underline{x},t)$ en las ecuaciones [5.31] y [5.35] y por $\sum_i \langle \phi_i^{+,-}(t) \rangle_{V_R}$ en la [5.39], se definen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sum_i \phi_i^{+,-}(\underline{x},t) \equiv \sum_i \langle \phi_i^{+,-}(t) \rangle_{V_R} &= \Delta H_{rxn} \frac{d}{dt} \langle C_s(t) \rangle_{V_R} - L_v \langle \Omega_{H_2O,evap} \rangle_{V_R} + \dots \\ &\dots + L_c \langle \Omega_{H_2O,cond} \rangle_{V_R} \end{aligned} \quad [5.41]$$

Siendo:

- La energía generada por las reacciones químicas: $\Delta H_{rxn} \frac{d}{dt} \langle C_s(t) \rangle_{V_R}$

Con $\frac{d}{dt} \langle C_s(t) \rangle_{V_R}$ proveniente del BM de los sólidos totales, y ΔH_{rxn} la entalpía de la reacción de descomposición del sólido;

- La energía por cambios de fase: $L_v \langle \Omega_{H_2O,evap} \rangle_{V_R}$ y $L_c \langle \Omega_{H_2O,cond} \rangle_{V_R}$

Con $\langle \Omega_{H_2O,evap} \rangle_{V_R}$ y $\langle \Omega_{H_2O,cond} \rangle_{V_R}$ provenientes del BM del agua, y L_v, L_c los calores latentes de vaporización y condensación, respectivamente.

A modo de sinopsis en la siguiente Tabla se resume el conjunto de ecuaciones, condiciones iniciales y de contorno que constituyen el modelo desarrollado para el estudio del sistema de compostaje objeto de este trabajo.

Tabla 5.1 Ecuaciones de trabajo del modelo propuesto.

| Descripción | Ecuación | Condiciones y Observaciones |
|--|--|---|
| Balances de Materia (BM) | | |
| Sólidos Totales | $\frac{d}{dt} \langle C_s(t) \rangle_{V_R} = \langle R_s(t) \rangle_{V_R} = \langle -k_G \cdot f_{O_2}(t) \cdot (C_s(t) - C_{s,e}) \rangle_{V_R} \quad [5.26]$ | $C_s(t=0) = C_s(0) = C_{s,0} \quad \forall V_R \quad [5.27]$ <p>con $f_{O_2}(t) \in [0, C_{O_2,0}] \wedge t \in [0, t_v]$</p> <p>$f_{O_2}(0) = 1, f_{O_2}(t_v) = 0, t_v$ tiempo de volteo</p> |
| Agua | $\frac{d}{dt} \langle C_{H_2O}(t) \rangle_{V_R} = \langle -b_{H_2O} \cdot R_s(t) \rangle_{V_R} \pm \langle \Omega_{H_2O,j}(t) \rangle_{V_R} \quad [5.28]$ | $C_{H_2O}(t=0) = C_{H_2O}(0) = C_{H_2O,0} \quad \forall V_R \quad [5.29]$ <p>Con j = evap., condens., adic.</p> |
| Balances de Energía Térmica | | |
| BET Puntual – Sistema Cartesiano | $(C_S(t)C_{P,S}) \left(\frac{\partial T(y,t)}{\partial t} \right) = k_S \left[\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + \sum_i \phi_i(y,t) \quad [5.31]$ | $\forall t \geq 0, \text{ en la región comprendida entre } 0 \leq y \leq H$ |

$$T(y,0) = T_o(y) \quad \forall y \in [0, H] \quad (t = 0) \quad [5.34]$$

$$-k_s \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} + h_1 T(y,t) = h_1 T_{ref}$$

$$\forall t > 0 \text{ en } y = 0 ; \quad [5.32]$$

$$k_s \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} + h_2 T(y,t) = h_2 T_{ref}$$

$$\forall t > 0 \text{ en } y = H \quad [5.33]$$

BET Puntual –
Sistema
Cilíndrico

$$(C_{S(t)} C_{P,S}) \left(\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \right) = k_s \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \right] + \sum_i \phi_i(r,t)$$

[5.35]

$\forall t \geq 0$, en la región $0 \leq r \leq R$

C.I. $T(r,0) = T_o(r) \quad \forall r \in [0, R], (t = 0)$

[5.38]

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = 0 \quad \forall t > 0 \text{ en } r = 0; \quad [5.36]$$

$$k_s \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} + h_2 T(r,t) = h_2 T_{ref}$$

$$\forall t > 0 \text{ en } r = R \quad [5.37]$$

BET
INTEGRADO

$$C_S C_{P,S} \frac{d\langle T \rangle_{V_R}}{dt} = - \left[U \frac{A_4}{V_R} \cdot (\langle T \rangle_{V_R} - T_{ref}) + h_2 \frac{A_2}{V_R} (\langle T \rangle_{V_R} - T_{ref}) \right] + \sum_i \langle \phi_i^{+,-}(t) \rangle_{V_R} \quad \forall t \geq 0$$

$$T(t=0) = T_o \quad \forall V_R \quad [5.40]$$

[5.39]

Términos fuente
o sumidero del
BET

$$\sum_i \phi_i^{+,-}(\underline{x}, t) \equiv \sum_i \langle \phi_i^{+,-}(t) \rangle_{V_R} = \Delta H_{rxn} \frac{d}{dt} \langle C_s(t) \rangle_{V_R} - \dots$$

$$\dots - L_v \langle \Omega_{H_2O, evap} \rangle_{V_R} + L_c \langle \Omega_{H_2O, cond} \rangle_{V_R} \quad [5.41]$$

5.3.1.5 Parámetros del modelo

En la siguiente Tabla se resume el conjunto de parámetros y coeficientes contenidos en el modelo propuesto, indicando en cada caso si finalmente será adoptado de la bibliografía o fijado de mediciones experimentales, o estimado en forma óptima con la resolución del modelo.

Tabla 5.2 Parámetros del modelo.

| | Descripción | Símbolo | Observaciones y comentarios |
|----|--|----------------|--|
| 1. | Área de interfase del sustrato en contacto con otras superficies (paredes reactor) o con el aire | A_2, A_4 | Se calcula a partir de medidas experimentales |
| 2. | Coeficiente estequiométrico para el agua formada en la reacción de descomposición del sustrato | b_{H_2O} | Se utiliza el promedio de los valores calculados por estequiometría para cada experiencia |
| 3. | Capacidad calorífica específica del agua, a presión constante | c_{P,H_2O} | Adoptado de bibliografía |
| 4. | Capacidad calorífica específica del sólido, a presión constante | $c_{P,s}$ | Adoptado de bibliografía |
| 5. | Concentración de oxígeno en aire (“inicial”, a $t = 0$) | $C_{O_2,0}$ | Adoptado de bibliografía |
| 6. | Concentración de “equilibrio” del sólido | $C_{s,e}$ | Se calcula asumiendo un porcentaje de la concentración de ST inicial en función de la composición del sustrato. Se determina experimentalmente en algunos ensayos (para validación cuantitativa del modelo). |
| 7. | Coeficiente de transmisión pelicular de calor en $y, r = 0$ | h_1 | Optimizado con el modelo |
| 8. | Coeficiente de transmisión pelicular de calor, en $y, r = H, R$ | h_2 | Optimizado con el modelo. En alguna corrida se fija igual a 0 (caso sistema adiabático o cerrado) |

| | | | |
|-----|--|------------------|---|
| 9. | Constante cinética global o aparente de pseudo 1° orden | k_G | Optimizado con el modelo |
| 10. | Conductividad térmica del sustrato | k_S | Optimizado con el modelo |
| 11. | Calor latente de vaporización o condensación, respectivamente | L_v, L_c | Adoptado de bibliografía |
| 12. | Tiempo de volteo | t_v | Fijado de datos experimentales. En una aplicación del modelo calibrado se estima su valor óptimo. |
| 13. | Temperatura de referencia | T_{ref} | Se fija el valor promedio de mediciones experimentales |
| 14. | Coeficiente global de transmisión de calor | U | Optimizado con el modelo |
| 15. | Volumen material o del sistema | V_R | Se calcula a partir de mediciones experimentales |
| 16. | Coeficiente empírico de proporción agua evaporada | x_{evap} | Optimizado con el modelo |
| 17. | Delta de entalpía de la reacción de descomposición del sólido (calor de combustión del sustrato) | ΔH_{rxn} | Optimizado con el modelo |

Capítulo 6

Resolución y

Análisis de

Sensibilidad del

Modelo

Capítulo 6: Resolución y Análisis de Sensibilidad del Modelo

6.1 Introducción

En base al modelo propuesto en el capítulo anterior, se desarrollaron dos programas computacionales en lenguaje Matlab 7.0 que permiten resolver numéricamente, en los distintos niveles trabajados (puntual e integrado), el sistema de ecuaciones diferenciales acoplado que describe la cinética, los balances de materia por componentes y balances de energía térmica; de donde se obtienen en modo simulación, para distintos valores de parámetros:

- i) la evolución temporal de la concentración de sólidos totales y de agua promediada en el V_R ;
- ii) la distribución espacial de la temperatura ($T_{(x,t)}$) para cada tiempo del proceso; y
- iii) la evolución temporal de la temperatura promedio ($T_{(t)}$).

Para resolver numéricamente el sistema de ecuaciones que contiene al BET puntual se desarrolló un programa basado en el método de Diferencias Finitas, mientras que para el que contiene al BET integrado, uno que resuelve utilizando la subrutina disponible en Matlab “*ode45*”, basada en el método explícito de *Runge-Kutta-Fehlberg* de 4to y 5to orden de precisión, con ajuste

variable del paso de iteración, indicado para este tipo de problemas. Este algoritmo permite estimar el error de truncamiento en cada paso de tiempo, y es capaz de decidir el tamaño del paso que requiere la tolerancia del error especificada por el usuario.

En el presente capítulo, antes de proceder a la estimación de los parámetros libres del sistema de ecuaciones propuesto como modelo, se presentan los resultados de unas primeras corridas del modelo obtenidas adoptando para la totalidad de los parámetros incluidos en el mismo, valores publicados en la bibliografía de referencia y/o fijándolos arbitrariamente, definiéndose asimismo las condiciones iniciales y de contorno. Seguidamente dichos valores y condiciones adoptadas fueron luego modificados uno a la vez, variando cada uno dentro de ciertos rangos, para analizar la respuesta del modelo ante los cambios propuestos. De este modo, se evaluó la sensibilidad de la herramienta de modelado del compostaje desarrollada, en términos de su capacidad para reproducir o predecir los distintos efectos esperados sobre las variables de interés que se simulan, validándola cualitativamente.

A continuación, en la Tabla 6.1 se presentan los valores que fueron adoptados de los parámetros y las condiciones iniciales tomados como de referencia para dichas corridas, mientras que en las Figuras 6.1 a 6.16 incluidas en los apartados siguientes, los resultados obtenidos de las mismas, en cuyos respectivos comentarios se detallan los demás valores y condiciones adoptados en cada simulación.

Tabla 6.1 Valores de referencia de los parámetros y condiciones iniciales utilizados en la validación cualitativa del modelo

| Parámetro | Valor | Unidades |
|-------------------------|----------------------|---|
| b_{H_2O} | 0,65 | $\text{kg}_{H_2O} \cdot \text{kg Sólido degr.}^{-1}$ |
| $c_{P,S}$ | 0,45 | $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| $C_{H_2O,0}$ | 60 | % (en b. h.) |
| $C_{S,0}$ | 250 | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| $C_{S,e}$ | $0,35 \cdot C_{S,0}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| h_1 (base pila) | 71,90 | $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ |
| h_2 (superficie pila) | 90,10 | $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ |
| H (altura de la pila) | 1,25 | m |
| k_G | 0,08 | d^{-1} |
| k_s | 4,4 | $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ |
| T_{ref} | 20,0 | $^\circ\text{C}$ |
| U | 20,0 | $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ |
| x_{evap} | 3,5 | (adimens.) |
| ΔH_{rxn} | - 4060,38 | $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ |

| | | |
|-------------------|------|--------------------|
| $\frac{A_2}{V_R}$ | 3,33 | $m^2 \cdot m^{-3}$ |
|-------------------|------|--------------------|

6.2 Simulaciones preliminares para la validación cualitativa del modelo

6.2.1 Balance de Materia (BM)

6.2.1.1 BM de los sólidos totales

Resolviendo la ec. [5.26] del BM se obtiene la evolución temporal de la concentración de sólidos totales (C_S). Si se simula variando los valores de la constante cinética global de pseudo primer orden (k_G) y asumiendo $f_{O_2} = 1$ (i.e., condiciones de oxígeno no limitante), se obtienen resultados como los que se muestran en la Figura 6.1. En la parte (a) de dicha figura, se representan los valores de C_S para tiempos cortos (etapa térmicamente más activa), mientras que en la parte (b) de la misma se extiende el intervalo a tiempos largos de proceso. En este último caso se observa la convergencia de las curvas a $\frac{C_{S,e}}{C_{S,0}}$ (concentración de equilibrio o recalcitrante), una variable muy importante que caracteriza al sustrato, y para la que se adoptó para esta corrida el valor de 0,25.

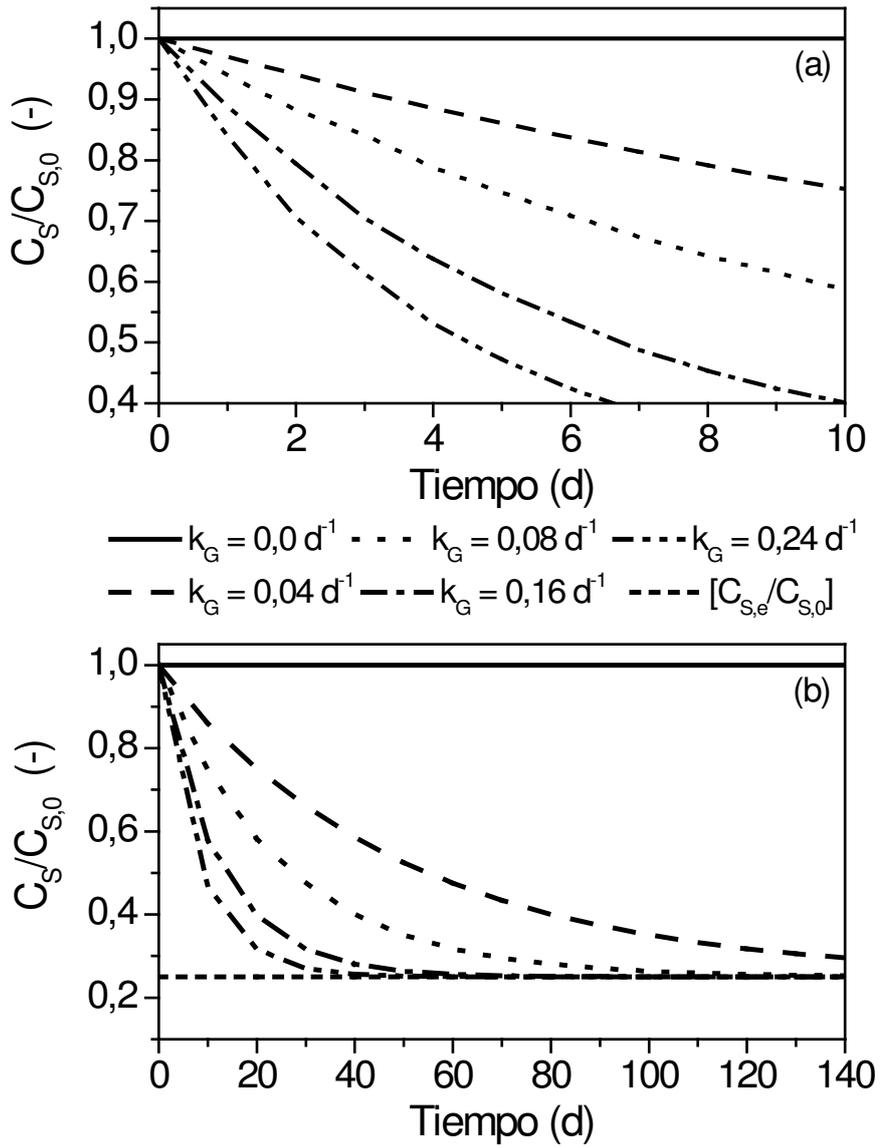


Figura 6.1 Simulación del efecto de distintos valores de k_G sobre la evolución de $[C_s / C_{s,0}]$ considerando $f_{O_2} = 1$. (a) Período activo inicial; (b) Período completo.

En la figura anterior puede observarse que al aumentar k_G aumenta la velocidad de degradación del sustrato, por lo cual se llega antes a la concentración de equilibrio ($C_{s,e}$). Por ejemplo, con una $k_G = 0,24 \text{ d}^{-1}$ ésta se alcanza a los 40 días, mientras que con un valor de 0,08 se requieren

aproximadamente 110 días, y con una $k_G = 0,04 \text{ d}^{-1}$ aún luego de 140 días de proceso no se alcanza dicha concentración de equilibrio. Por último, puede constatarse también en el gráfico el caso más extremo ($k_G = 0$), donde como era de esperar la degradación es nula y la concentración inicial de sólidos totales no registra cambios (perfil constante).

a) Efecto del oxígeno sobre la evolución de los sólidos totales

En la siguiente Figura 6.2 se representa el efecto del oxígeno a través de la función $f_{O_2}(t)$ sobre la cinética de descomposición del sustrato (ver definición en la sección 5.2.2.1 del capítulo 5). Para realizar una mejor interpretación de los resultados, a modo de comparación se presentan en ella dos curvas de $[C_s / C_{s,0}]$, una asumiendo nuevamente $f_{O_2} = 1$ (en línea de trazos), y otra con f_{O_2} variable y tendiendo a cero hasta alcanzar un $t_{\text{volteo}} = 4 \text{ (d)}$ (en línea continua), considerando en ambas el valor de $k_G = 0,08 \text{ d}^{-1}$.

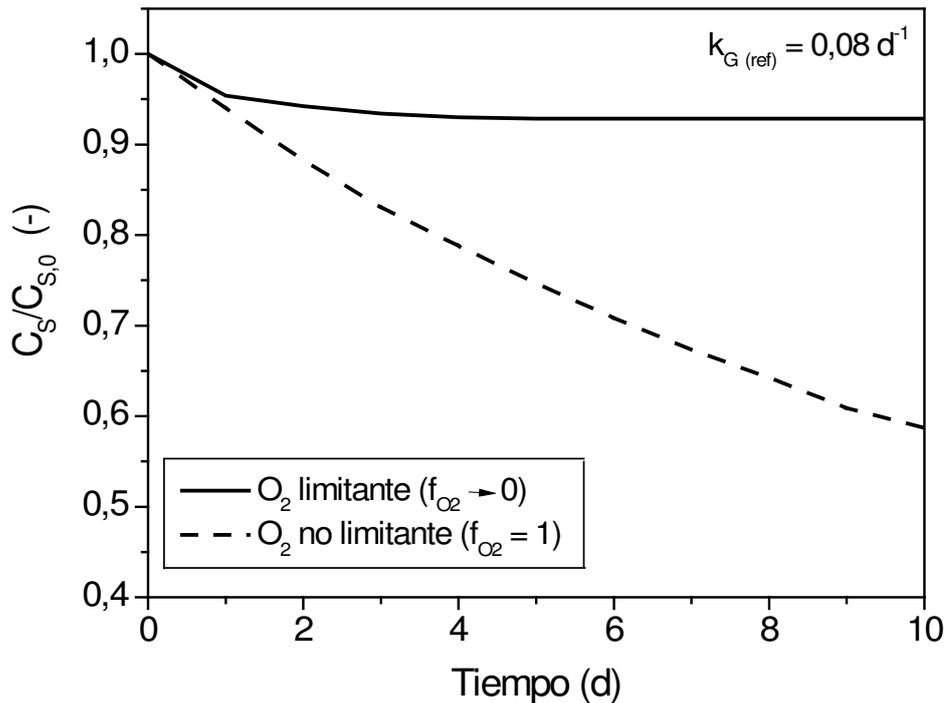


Figura 6.2 Simulación del efecto limitante del oxígeno sobre la evolución temporal de $[C_s / C_{s,0}]$ para $k_G = 0,08 \text{ d}^{-1}$.

En ella puede observarse que cuando el oxígeno comienza a consumirse al avanzar la reacción, actúa como un reactivo limitante generando el aplanamiento de la pendiente de la curva $[C_s / C_{s,0}]$ vs $[t]$, hasta llegar incluso a detener la descomposición del sustrato, representada en la figura con la meseta final a partir del cuarto día.

Una vez más debe destacarse que tanto k_G como f_{O_2} impactan fuertemente en los procesos de generación y transferencia de calor dentro de una pila en proceso de compostaje, como se verá más adelante.

Por otro lado, el modelo desarrollado incluye el efecto de incorporar el oxígeno al sistema mediante los volteos, como se ilustra en la siguiente Figura

6.3:

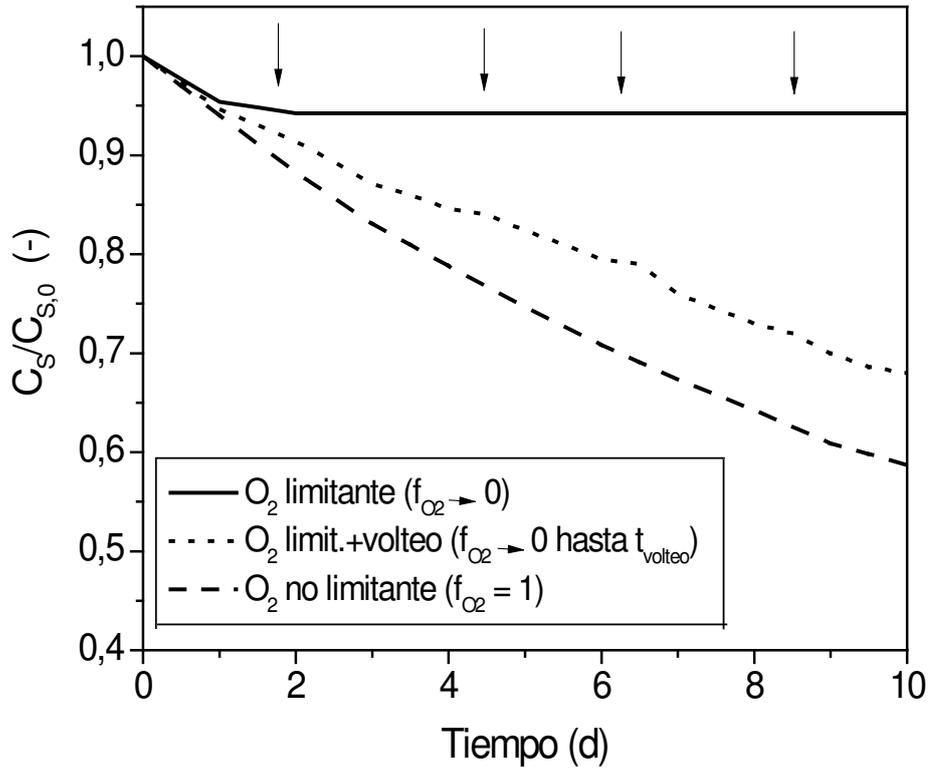


Figura 6.3 Simulación del efecto de los volteos sobre la evolución temporal de $[C_s / C_{s,0}]$.
 (↓) Volteo.

A las dos curvas representadas en la Figura 6.2., se incorpora en la presente gráfica una tercera (en línea de puntos), en la cual se observa cómo con cada volteo implementado a los distintos t_{volteo} , se modifica la pendiente de la curva $[C_s / C_{s,0}]$ vs $[t]$ reiniciándose en cada caso la degradación del sustrato. Este comportamiento es esperable, dado que mediante los volteos se revertirían

las condiciones de oxígeno limitante.

6.2.1.2 BM del agua

En este caso se resuelve la ecuación [5.28] con su correspondiente condición inicial [5.29]. En la Figura 6.4 se muestra la evolución temporal de $[C_{H_2O} / C_{H_2O,0}]$ para distintos valores de k_G y un valor de referencia de $b_{H_2O} = 0,65 \text{ kg}_{H_2O} \cdot \text{kg Sólido degr.}^{-1}$. Complementariamente en la Figura Q.4 del Apéndice Q se grafica la misma variable para distintos valores de b_{H_2O} .

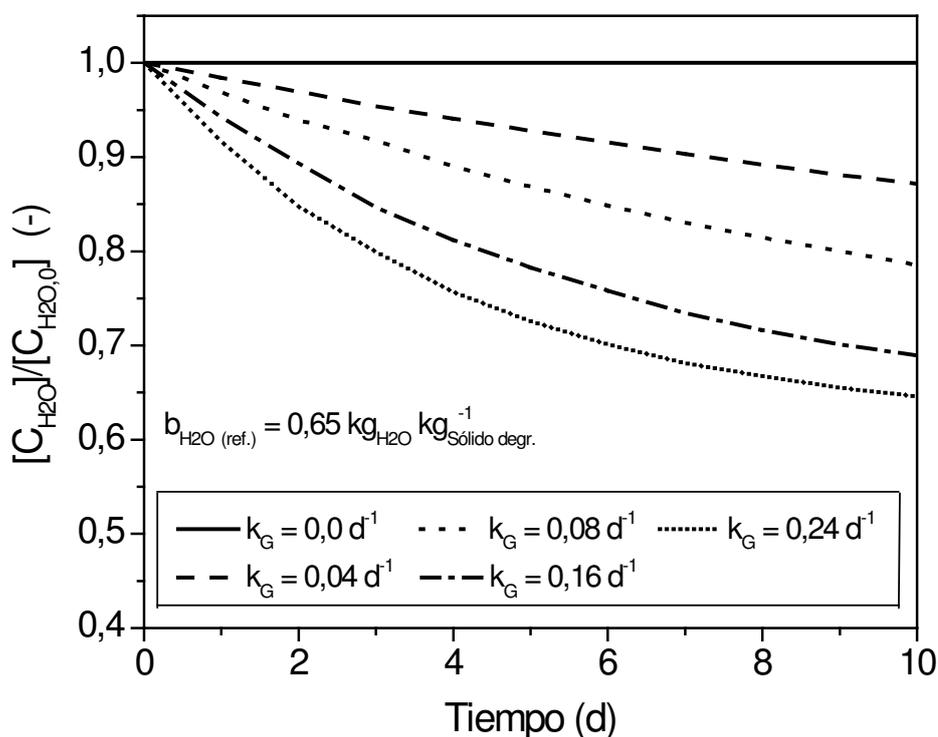


Figura 6.4 Simulación de la evolución temporal de $[C_{H_2O} / C_{H_2O,0}]$ para distintos valores de k_G y un valor fijo de $b_{H_2O} = 0,65 \text{ kg}_{H_2O} \cdot \text{kg Sólido degr.}^{-1}$.

Si bien el agua es un producto de la reacción de descomposición del sustrato (ver ecuación [2.1], capítulo 2), y sería “esperable” que a mayor tasa de degradación se incremente su contenido en el material (proporcional a b_{H_2O}), en “sistemas abiertos” como los simulados, por los efectos combinados de generación química y evaporación física, el agua contenida en el sistema puede incluso disminuir, como se observó en la figura anterior.

6.2.2 Balance de Energía Térmica (BET)

6.2.2.1 Distribución espacial y temporal de la temperatura ($T(\underline{x}, t)$)

Partiendo de la ecuación [5.31] en coordenadas cartesianas en 1-D, con su condición inicial [5.34] y de contorno definidas ([5.32] y [5.33], respectivamente), se pueden estudiar el impacto de distintas condiciones como las que se exponen a continuación.

a) Efecto de las condiciones de contorno

En la Figura 6.5 se presentan perfiles de temperatura para distintos tiempos, con el eje x (posición) variando entre 0 (base inferior de la pila) y H (altura máxima), considerando un sistema abierto con flujo de calor en ambos extremos de la pila y la totalidad de los parámetros del modelo con su valor de referencia.

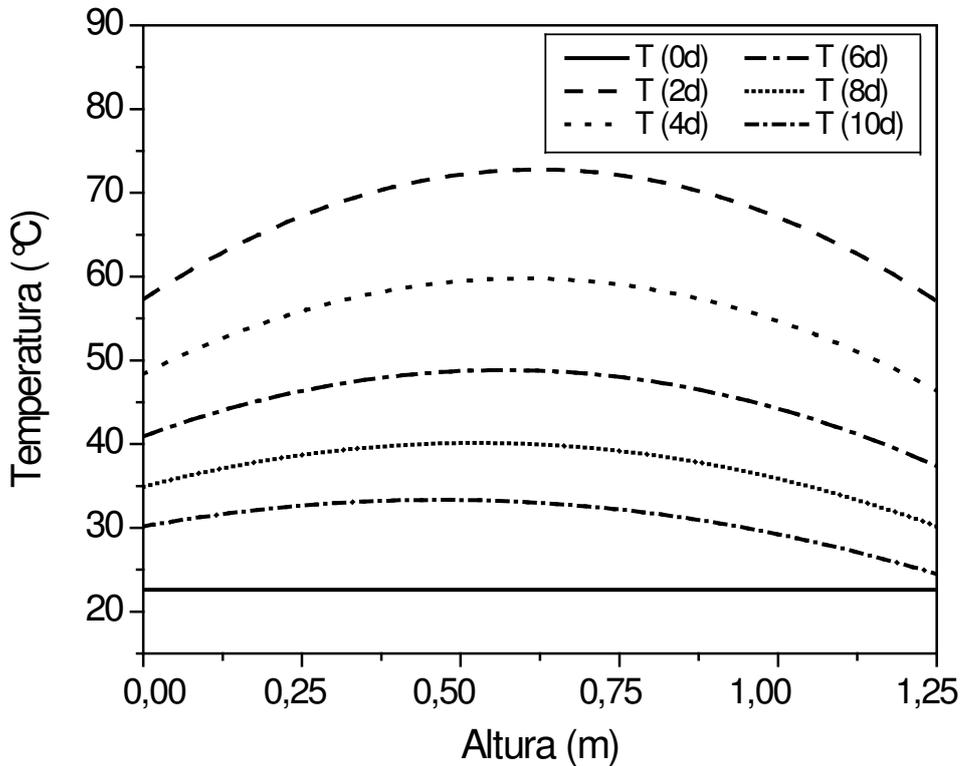


Figura 6.5 Simulación de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Condición de contorno: flujo de calor en ambos extremos. Valores de referencia para la base de la pila (h_1) y la superficie de la pila (h_2): $h_1 = 71,90 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ $h_2 = 90,10 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

En ella puede observarse como se va distribuyendo la temperatura en función de la posición, alcanzando para los distintos tiempos un máximo en el centro de la pila como consecuencia de las condiciones de borde consideradas (i. e., valores asumidos de h_1 y h_2). Por otro lado debe destacarse que desde el inicio del proceso hasta el segundo día, la temperatura registra un aumento y llega a un máximo a partir del cual comienza a descender progresivamente.

Tomando como condición de borde $h_i = 0$ en $y = 0$ (base de la pila),

se obtiene como resultado lo expuesto en la Figura 6.6 (a), mientras que si dicho valor se fija en $y = H$ (superficie superior de la misma) se obtienen los perfiles de temperatura de representados en la Figura 6.6 (b), como puede verse a continuación.

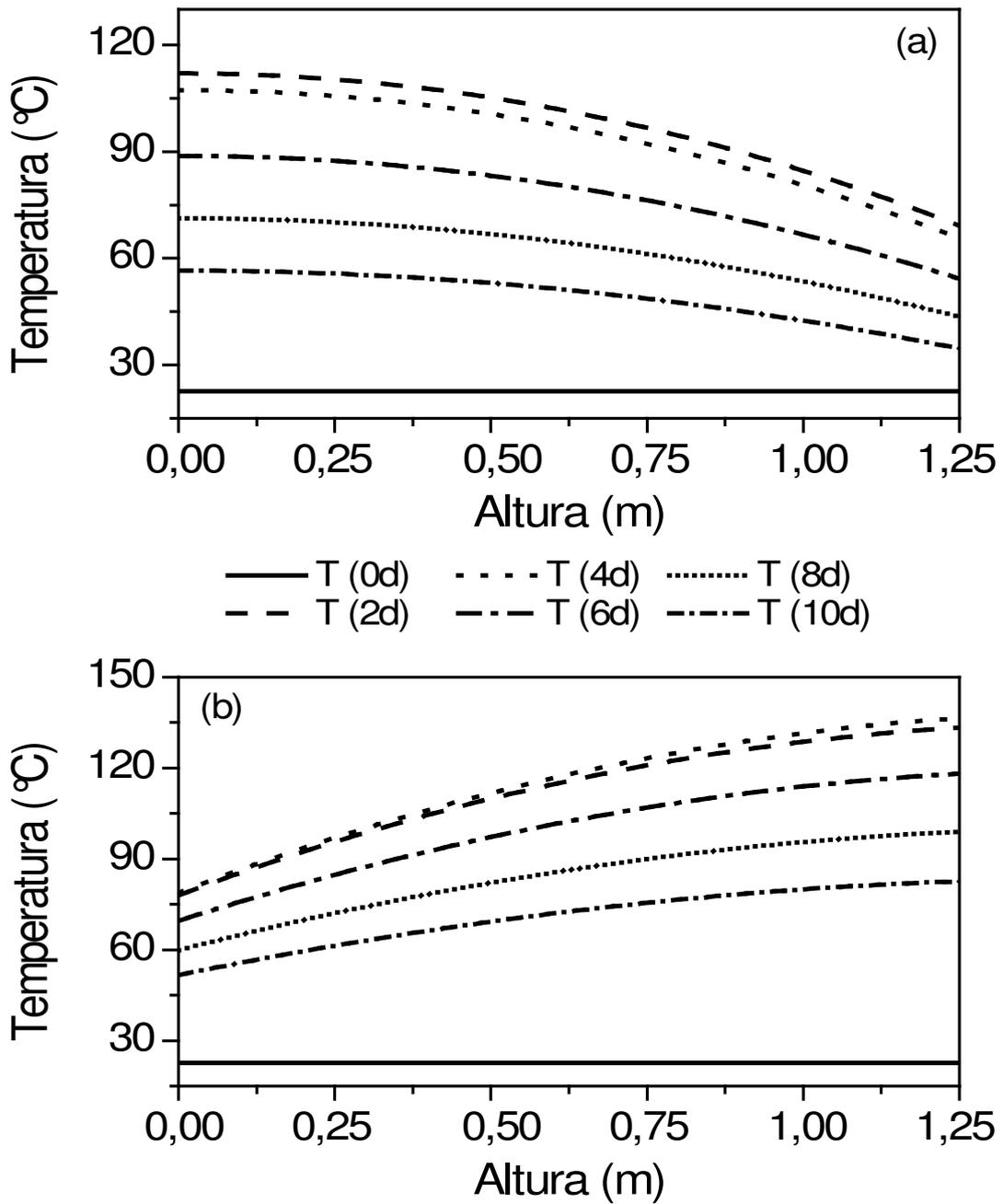


Figura 6.6 Simulación de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Condición de contorno:
 (a) En $y = 0$ $h_1 = 0 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, $h_2(\text{ref.})$; (b) En $y = H$ $h_1(\text{ref.})$, $h_2 = 0$
 $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

Si se considera en cambio la condición límite de “flujo nulo” o “frontera adiabática” en ambos extremos (i.e., fijando $h_1 = h_2 = 0$ en $y = 0$ como en $y = H$), resulta:

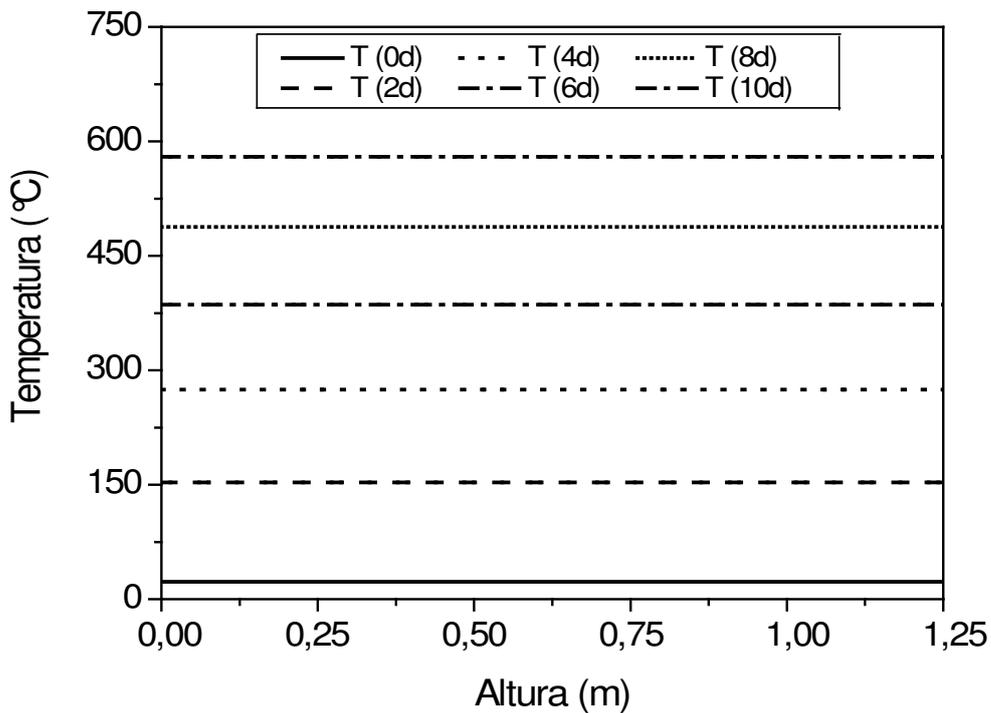


Figura 6.7 Simulación de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Condición de contorno: $h_1 = h_2 = 0$ en ambos extremos (condición adiabática).

Observando las figuras 6.6 (a, b) y 6.7 puede constatarse como influyen las diferentes condiciones de contorno en la formación de los perfiles de temperatura dentro de la pila. En la primera de ellas, debido al flujo térmico que se establece en función del valor que toma h_i y de los gradientes de temperatura formados (sean estos entre un punto y otro de la pila, y/o entre la interfase y el

medio que la rodea); mientras que en la segunda (Figura 6.7), los perfiles de temperatura son constantes e incrementan progresivamente su valor debido a la conservación “ideal” del calor generado por la reacción (condición límite adiabática en ambos extremos).

Finalmente a modo de comparación, en la Figura 6.8 se presentan perfiles de temperatura a un dado $t = 48$ h, considerando a las diferentes condiciones de contorno antes simuladas. Si se define el “Hot Point” del reactor como aquel punto de la masa de residuos donde se alcanzan los mayores valores de temperatura, puede observarse como éste cambia de posición según los valores que tome h_i , dando lugar a perfiles más suaves (trazo continuo) o acentuados (puntos o trazo con puntos), exceptuando la condición adiabática en ambos extremos (línea de trazos) donde la temperatura es uniforme en toda la masa.

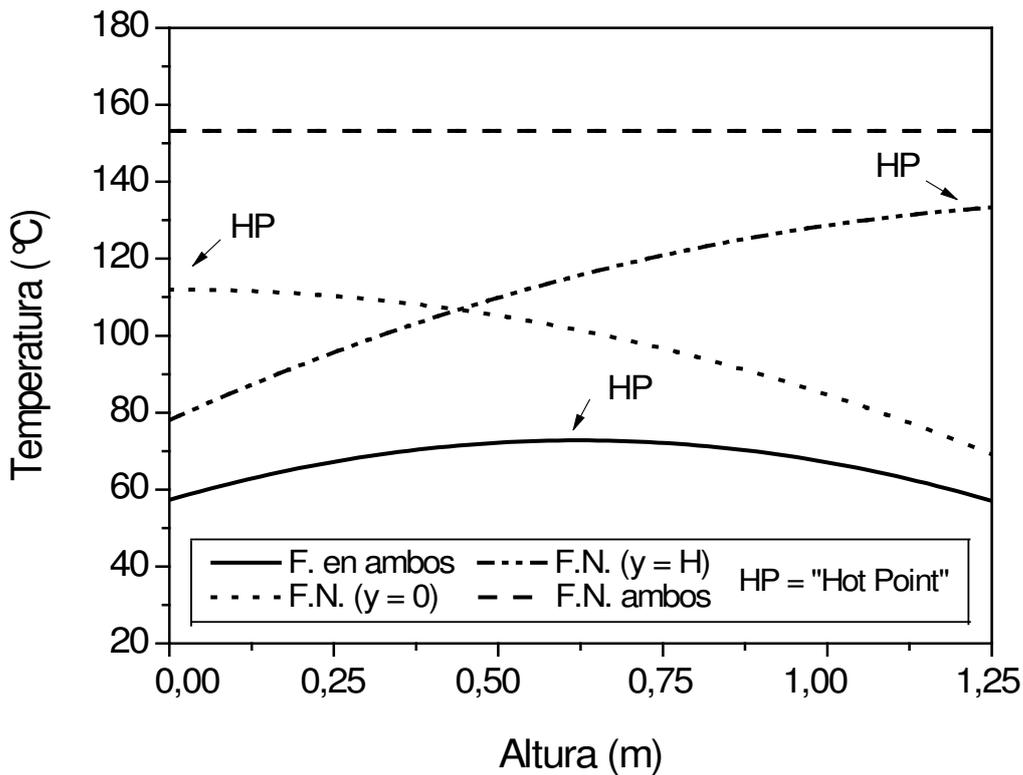


Figura 6.8 Simulación de perfiles de temperatura con diferentes condiciones de contorno, para $t = 48$ h de proceso. F. (Flujo) en ambos; F.N.: Flujo nulo; HP: Hot Point.

b) Efecto de parámetros termodinámicos

En la Figura 6.9 se muestra el impacto que tiene la conductividad térmica del sustrato (k_s) sobre la distribución de temperatura dentro de la pila, para un dado $t = 48$ h de proceso, manteniendo constantes el resto de los parámetros del modelo. Para ello se varió su valor de referencia indicado en la figura desde un 25 % menos, hasta diez veces más que dicho valor, obteniéndose como resultado:

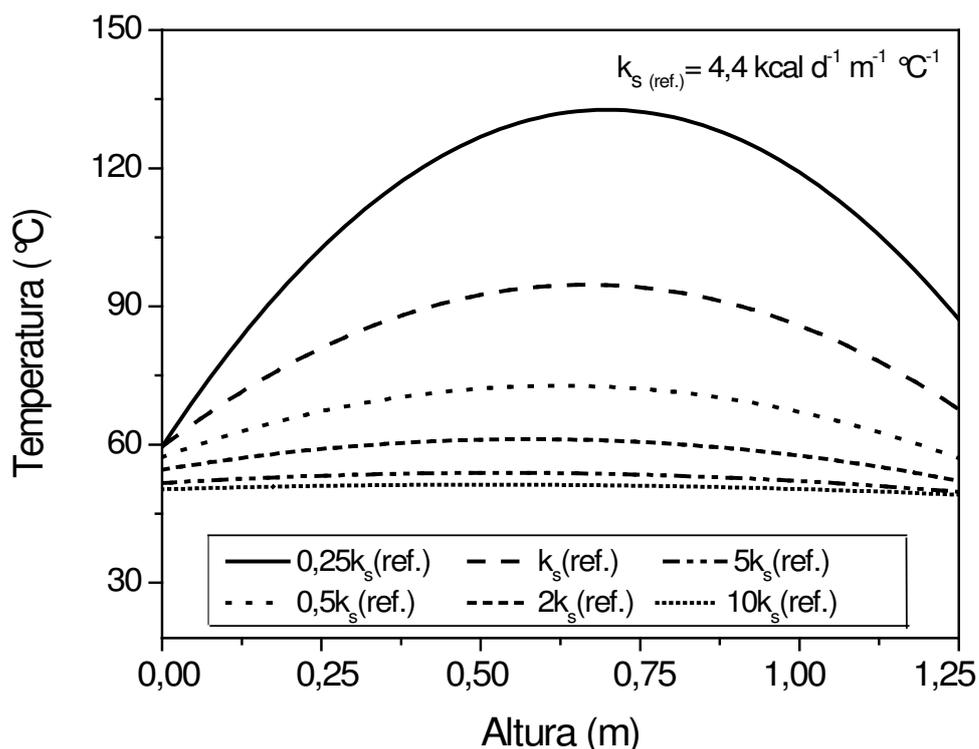


Figura 6.9. Simulación de perfiles de temperatura con diferentes valores de conductividad térmica del sustrato (k_s), para $t = 48$ h de proceso. Valor de referencia: $k_s = 4,4$ $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

En coherencia con la física del problema estudiado, se observa que al aumentar el valor de k_s los perfiles de temperatura se aplanan debido al aumento de la transferencia (flujo) de energía dentro de la pila (desde el centro hacia las fronteras), para un dado valor de h_i . Ocurre lo opuesto a medida que el valor de k_s disminuye, i.e., los perfiles se vuelven más acentuados debido a la mayor concentración en el centro de la pila del calor generado por la reacción, ya que es mayor la resistencia en el medio y menor la transferencia.

A continuación, en la Figura 6.10 se realiza lo mismo con la capacidad

calorífica específica del sustrato ($c_{p,s}$), variando su valor desde el de referencia ($0,45 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) hasta un valor cien veces mayor.

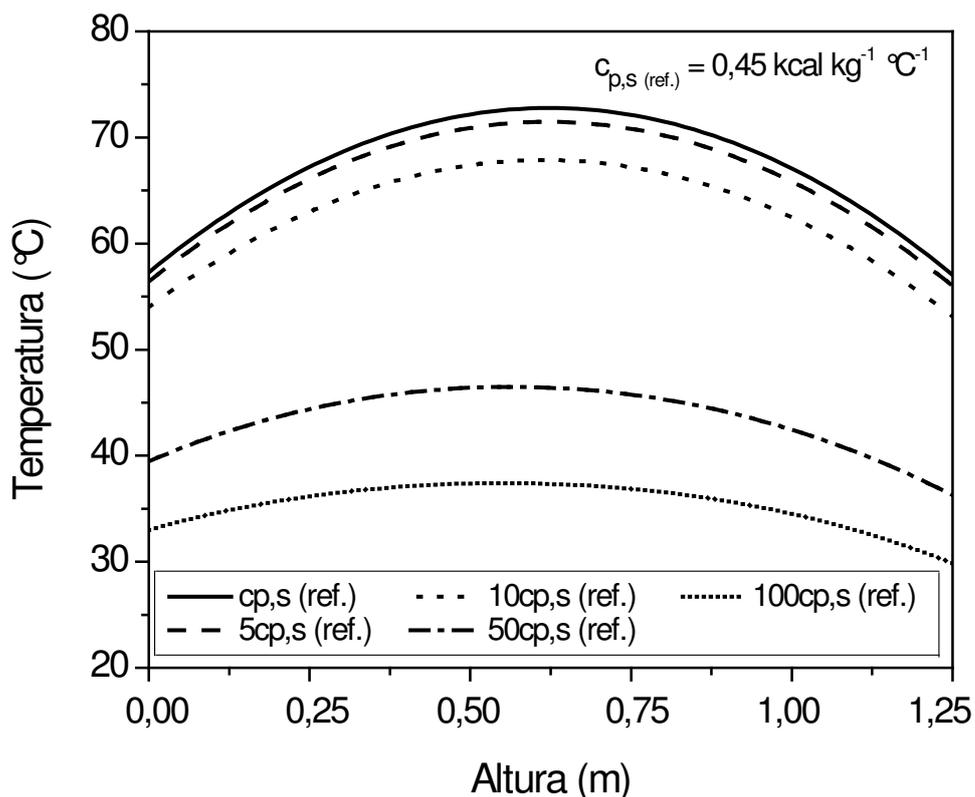


Figura 6.10. Simulación de perfiles de temperatura con distintos valores de $c_{p,s}$, para $t = 48$ h de proceso.

En la figura anterior se pone en evidencia que al aumentar $c_{p,s}$, si bien la forma del perfil no cambia, la temperatura en cada punto de la pila disminuye. Esto es esperable ya que dicho coeficiente representa la “inercia térmica” del reactivo, i.e., la cantidad de calor que el sistema absorbe o puede almacenar. Por otro lado debe señalarse que los resultados obtenidos utilizando valores

inferiores al de referencia, no se incluyen aquí por no manifestar cambios apreciables en los perfiles respecto del original.

En la siguiente Figura 6.11 se presentan los perfiles de temperatura para distintos valores del calor de combustión del sustrato (ΔH_{rxn}) a un dado tiempo de proceso, manteniendo constantes los valores de los restantes parámetros del modelo.

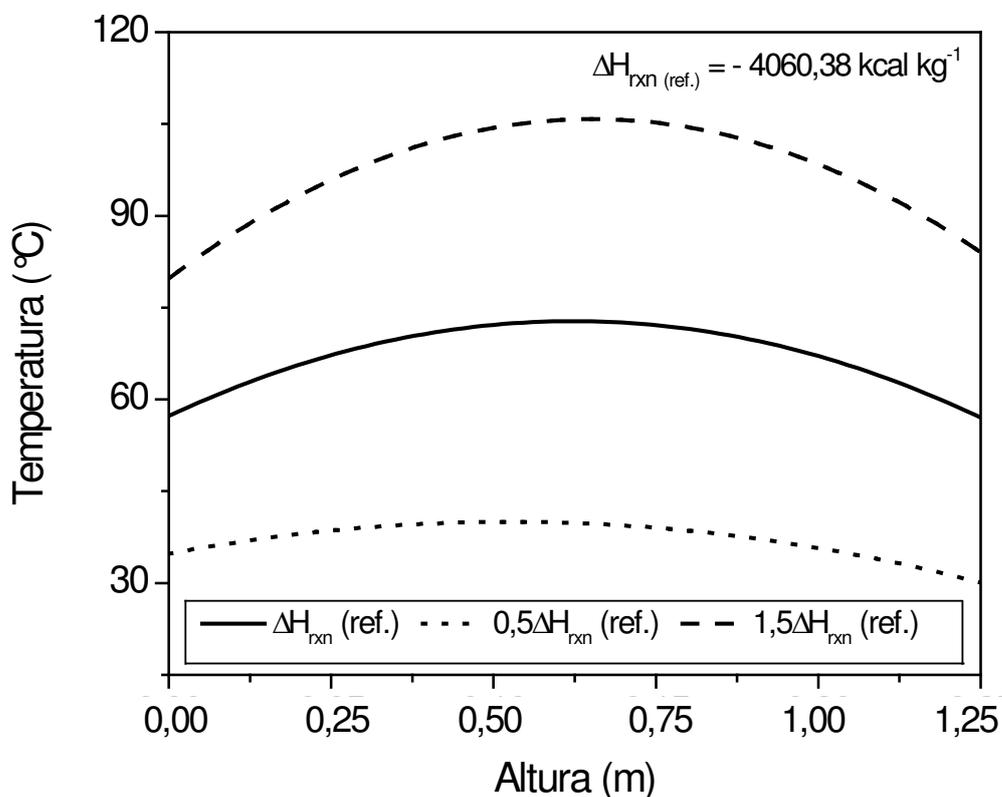


Figura 6.11. Simulación de perfiles de temperatura con distintos valores de ΔH_{rxn} , para $t = 48$ h de proceso.

Como era de esperar, un incremento o disminución en el valor de ΔH_{rxn} , manteniendo el resto de las condiciones constantes, impacta en igual sentido y magnitud sobre el perfil de temperatura desarrollado en la pila de residuos.

Hasta aquí se evaluó la respuesta del modelo en términos de la distribución espacio-temporal de la temperatura de una pila de RSO en proceso de compostaje. En la totalidad de las figuras expuestas, se pudo constatar que dicha respuesta es coherente con el sentido físico esperable ante los cambios propuestos en los parámetros y coeficientes del modelo. En las Figuras Q.1 a Q.3 del Apéndice Q pueden consultarse resultados complementarios de simulaciones que incluyen variaciones en las condiciones iniciales de sólidos totales, contenido de agua y temperatura ambiente.

A continuación se repite la misma secuencia pero con el modelo que contiene al BET integrado, que posee como variable de salida la temperatura promediada en el volumen del sistema, centrando el análisis en aquellos parámetros que intervienen en fenómenos globales de interés.

6.2.2.2 Evolución temporal de la temperatura promedio en el volumen

$$\langle T(\underline{x}, t) \rangle_{V_R} = T(t)$$

Resolviendo la ecuación [5.39] del modelo con su condición inicial [5.40], se puede estudiar el efecto de distintas condiciones sobre la evolución temporal de la temperatura promedio en el volumen, como se procede a continuación.

a) Efecto de los parámetros cinéticos

En la Figura 6.12 se presentan simulaciones de $T(t)$ para distintos valores de k_G , considerando desde el caso más extremo asumiendo su valor igual a cero (sin reacción), hasta llevarla al doble del planteado como de referencia, resultando:

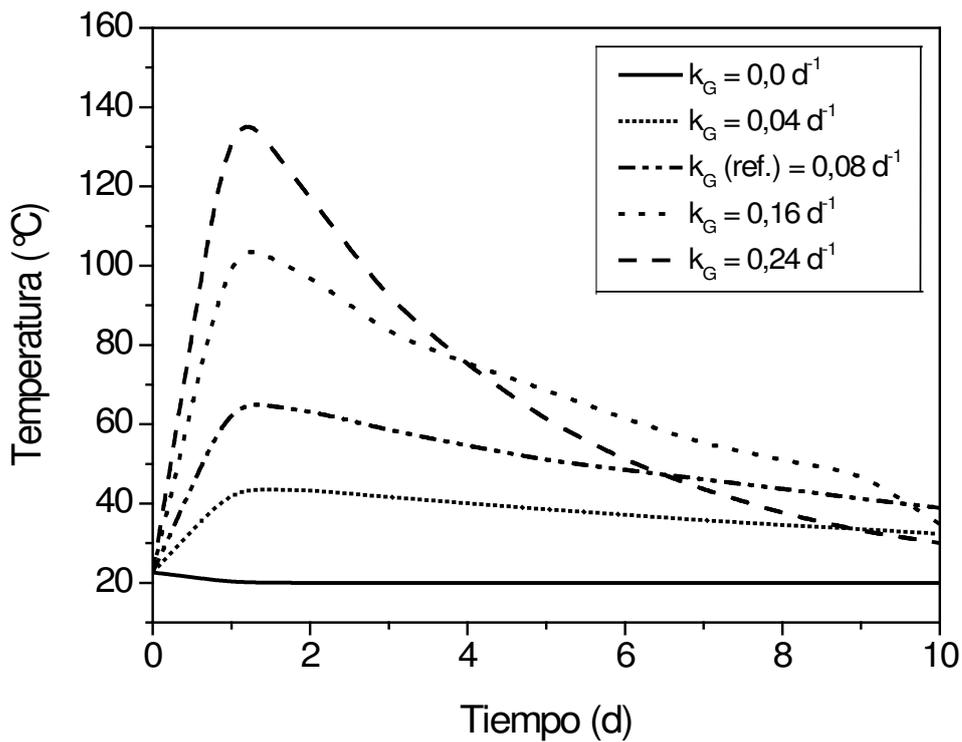


Figura 6.12. Simulación de la evolución de la $T(t)$ para distintos valores de la constante cinética global o aparente k_G . Valor de referencia: $k_G = 0,08 \text{ d}^{-1}$.

En la gráfica se observa que, manteniendo constantes el resto de los parámetros y condiciones, al aumentar el valor de la constante cinética se incrementa la velocidad de descomposición del sustrato, y con ella – como es de esperar – se obtienen temperaturas máximas más elevadas, resultando menores en el sentido contrario.

Si se varía el valor de la concentración recalcitrante o de equilibrio ($C_{s,e}$) contenida en el sustrato, desde el caso límite de considerarla nula ($C_{s,e} = 0$) hasta por el contrario un 90 % de los sólidos totales, se obtienen como resultado curvas de $T(t)$ como las presentadas en la siguiente figura:

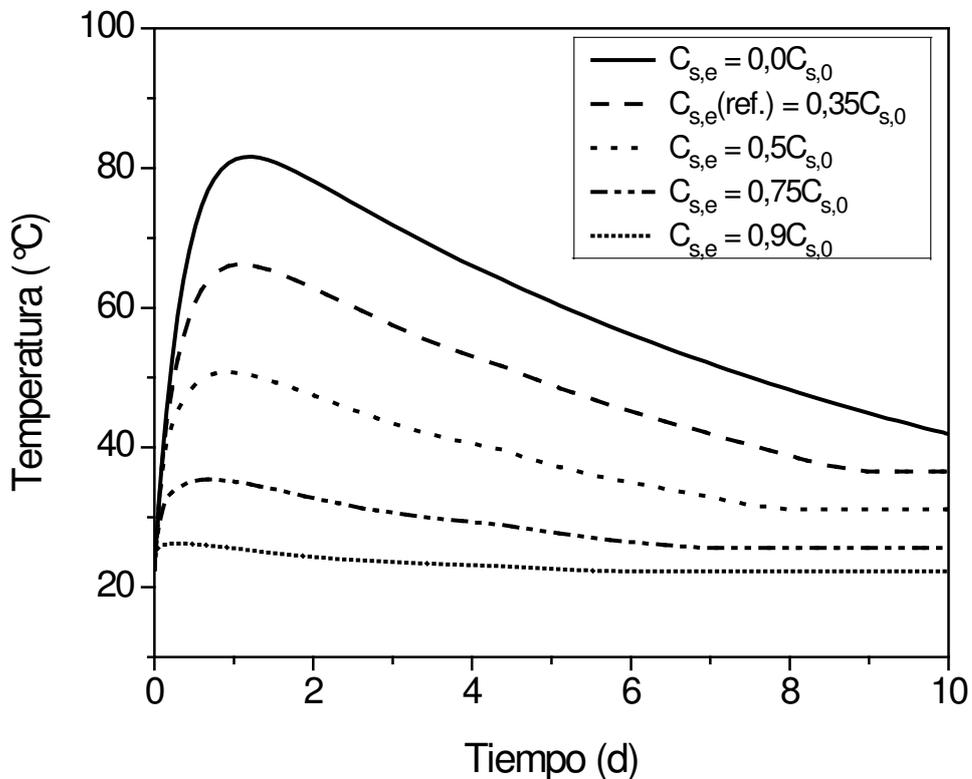


Figura 6.13. Simulación de la evolución de la $T(t)$ para distintos valores de la concentración recalcitrante o de equilibrio ($C_{s,e}$). Valor de referencia: $C_{s,e} = 0,35 C_{s,0}$.

En la figura anterior se verifica como era de esperar que a mayor $C_{s,e}$ se genere menor calor por unidad de volumen, dando lugar a temperaturas más bajas a lo largo del proceso.

b) Efecto de los parámetros de transferencia de calor

A continuación, en la Figura 6.14 se presenta la respuesta del modelo ante variaciones en el coeficiente U que, como se mencionó en párrafos anteriores, es característico del BET integrado y permite evaluar a nivel macroscópico, por ejemplo, el impacto de las pérdidas de calor por conducción/convección en el sistema y poder ponderar el peso de dicho término en relación a la energía generada, entre otras aplicaciones.

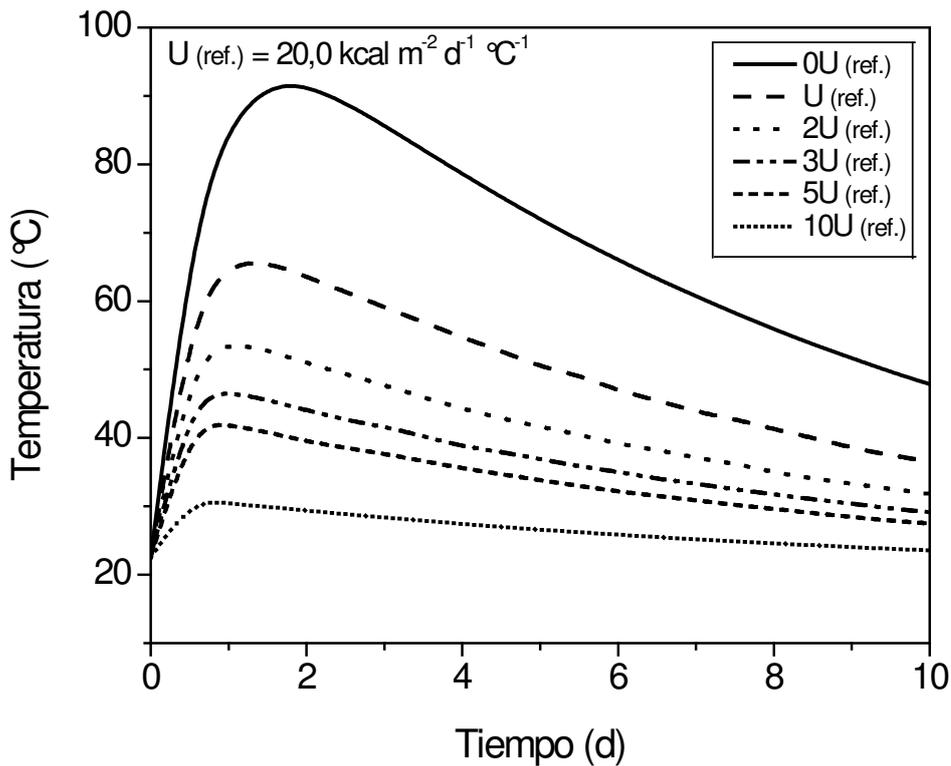


Figura 6.14. Simulación de la evolución de la $T(t)$ para distintos valores del coeficiente global de transmisión de calor (U). Valor de referencia: $U = 20 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

En la figura anterior se constata que la T promedio registra un incremento para cada tiempo de proceso al disminuir el valor de U , lo cual era esperable al representar menores pérdidas de calor por conducción/convección en el sistema, ocurriendo lo opuesto en el sentido contrario.

Otro de los parámetros que surge del BET integrado es la relación área superficial expuesta al ambiente por unidad de volumen o $\left(\frac{A_2}{V_R}\right)$, que al variar su valor de referencia se obtienen con el modelo resultados como los que se muestran en la siguiente figura:

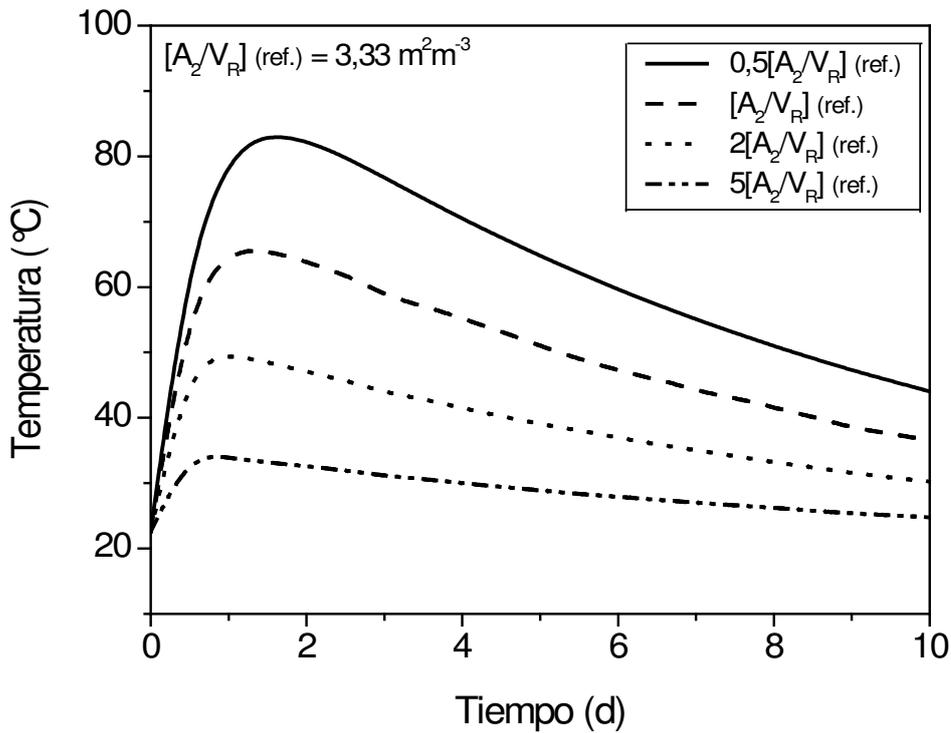


Figura 6.15. Simulación de la evolución de la $T(t)$ para distintos valores de la relación área/volumen (A_2/V_R) . Valor de referencia: $(A_2/V_R) = 3,33 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

En la gráfica anterior se observa que los resultados del modelo son coherentes con la física del problema, dado que, para un mismo volumen material y manteniendo el resto de las condiciones constantes, un incremento en el área de intercambio calórico genera una disminución de la T promedio a lo largo del tiempo debido a mayores pérdidas de calor superficial por parte del sistema, ocurriendo a la inversa en el sentido contrario; tal como lo predijo el modelo.

c) Efecto de los volteos periódicos

Mientras los resultados anteriores estaban acotados a un período entre un volteo y otro, en la Figura 6.16 se presentan simulaciones de la $T(t)$ a lo largo de cuatro volteos consecutivos (en línea de trazos), implementados con una frecuencia de uno cada dos días, manteniendo el resto de las condiciones y parámetros constantes. Para una mejor interpretación, se incluyen las curvas de $T(t)$ en condiciones de oxígeno limitante sin volteos ($f_{O_2} \rightarrow 0$, en línea de puntos) y de oxígeno no limitante ($f_{O_2} = 1$, en línea sólida continua).

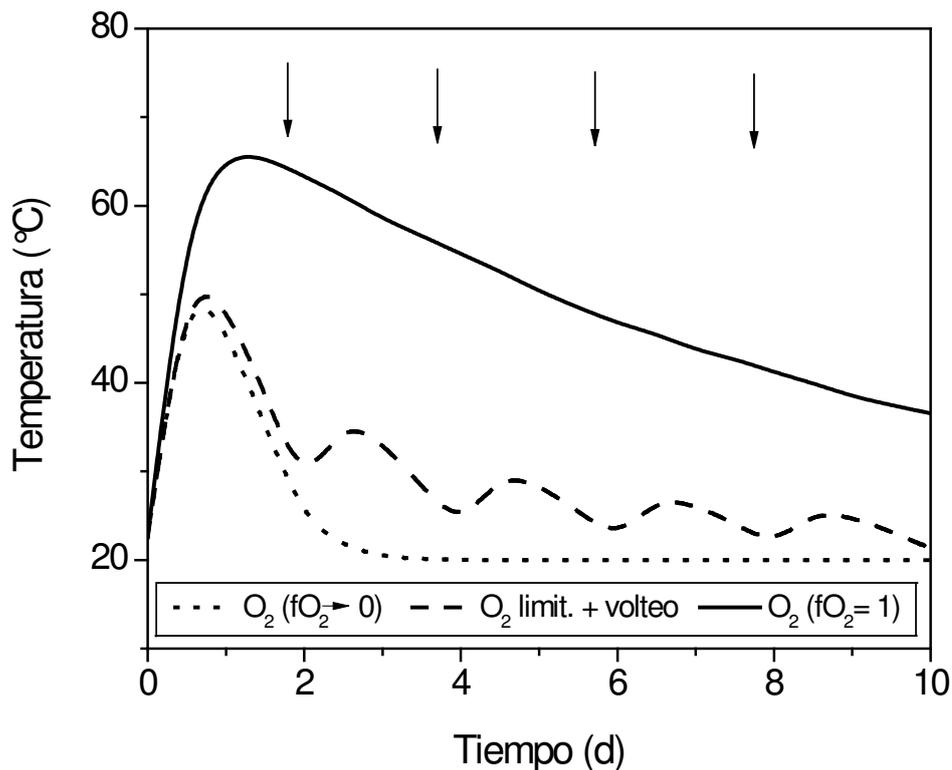


Figura 6.16. Simulación de la evolución de la $T(t)$ en condiciones de oxígeno no limitante y oxígeno limitante con o sin volteos periódicos. (↓) Volteo.

En la figura anterior puede observarse como con cada volteo la T promedio registra primero un descenso (desde un dado t anterior al volteo hasta

el t_{volteo}), para luego incrementarse (desde el t_{volteo} hasta un dado $t_{\text{post volteo}}$), y que dichos cambios son más marcados al comienzo del proceso.

El primer efecto (descenso de T , con $\frac{\Delta T}{\Delta t} < 0$) refleja lo que sucede al poner en contacto “puntos calientes” de la masa con otros “más fríos”. La temperatura luego se equilibra en un valor ($T_{\text{post volteo}}$) que resulta de menor magnitud respecto al promedio de los valores de T registrados previo al volteo, debido a las pérdidas de calor hacia el ambiente circundante, tal como ocurre en este tipo de sistemas abiertos. El segundo efecto (ascenso de T , siendo $\frac{\Delta T}{\Delta t} > 0$), puede vincularse a una reactivación de la biomasa en respuesta a la renovación del oxígeno dentro de la pila, como se comentó cuando se analizó la respuesta del modelo en términos de los perfiles de temperatura. Por último, como es esperable con el paso del tiempo, progresivamente al ser menor la cantidad de sólido que se encuentra disponible para reaccionar y generar calor, los cambios en la temperatura son menores, representando el inicio de la etapa de estabilización biológica del material.

Con cada volteo (definidos a determinados t_{volteo}), el programa se reinicia tomando el valor de la $T_{\text{post volteo}}$ obtenida experimentalmente, y vuelve a 1 el valor de la función $f_{\text{O}_2}(t)$ del modelo, pudiendo predecir en forma satisfactoria dichos efectos sobre la temperatura de la pila.

6.3 Consideraciones finales

Como pudo deducirse del desarrollo anterior, en la totalidad de los casos

y condiciones evaluadas, la respuesta del modelo ante los cambios propuestos ha sido satisfactoria desde el punto de vista físico-matemático, y representa al sistema objeto de estudio de esta Tesis en los distintos niveles en los que ha sido abordado su modelado.

Así mismo, se verificó la robustez de los métodos numéricos utilizados y los programas computacionales desarrollados (en lenguaje de Diferencias Finitas para resolver el BET puntual y en Runge-Kutta-Fehlberg de 4,5to. orden de precisión para el BET integrado).

Por último mencionar que tal como se refirió en párrafos anteriores, el foco en este capítulo estuvo centrado en realizar un análisis de sensibilidad que permitiera validar cualitativamente la respuesta del modelo ante los cambios propuestos, y no en la factibilidad física-biológica de los valores obtenidos de las variables simuladas. En este contexto, se incluyeron algunos resultados de simulación con valores, por ejemplo de temperatura y/o humedades, que en el proceso de compostaje no serían biológicamente viables, ya que detendrían o inhibirían el normal desarrollo del proceso (e.g., humedades menores o iguales al 20 %, temperaturas superiores a los 70-80 °C).

En el próximo capítulo 7, se procederá en primer lugar estimar parámetros libres del modelo, en segundo a la validación cuantitativa del mismo, utilizando para ello dos paquetes de ensayos llevados a cabo en distintas condiciones en el marco de esta Tesis. Por último, se incluye un tercer bloque donde se presentan simulaciones con aplicaciones de interés considerando la implementación del compostaje como práctica de valorización de RSO.

Capítulo 7

Resultados y

Discusión

Capítulo 7: Resultados y Discusión

7.1 Introducción

Previo a la presentación y análisis de resultados es importante realizar un pequeño resumen de lo realizado y de las etapas que siguen, recordando que el objetivo principal de este trabajo es desarrollar herramientas de modelado que, aunque surgidas de bases rigurosas de la ingeniería química (balances, cinética), permitan mediante su simplificación transformarse en ecuaciones de simple utilización para la simulación y el diseño de procesos de compostaje. Se buscó también extraer los fenómenos de mayor relevancia que actúan como “controlantes” de un proceso de alta complejidad por sus características intrínsecas (trifásico, multi componentes, con reacciones con cambio de fase, etc.), y que además se lleve a cabo en condiciones de operación más realistas y representativas de las escalas de aplicación (e. g., volteo manual, abierto al ambiente, con sustratos variables).

Debe mencionarse primero el diseño de un *set up experimental* manejable (de escala laboratorio) y que reproduzca esas condiciones de proceso, tal como se ha descrito en el Capítulo 4. Por otra parte, en el Capítulo 5 se han formulado las ecuaciones de balances de materia y de energía térmica, las cuales resultan acopladas mediante la cinética de la degradación del sustrato y los términos de acumulación y de generación y pérdidas de calor, cuya simplificación resultó en un set de ecuaciones operativas o de trabajo (ver punto 5.3) donde, como variables de salida, se tienen aquellas temporales globales (i.e., promediados en el volumen) como la concentración de sólidos totales, el contenido de agua y la temperatura usualmente medidas en estos procesos, y además las distribuciones espacio-temporales (i.e., los

perfiles) de temperatura, que brindan información importante respecto a la existencia de “puntos calientes y fríos” dentro de la masa así como el efecto de las condiciones de borde. En el capítulo 6, se describieron los programas computacionales desarrollados *ad-hoc* y los métodos numéricos empleados para la resolución del modelo, así como también se presentaron los primeros resultados del análisis cualitativo del mismo, donde se verificó la robustez de los métodos numéricos utilizados, y se chequeó la congruencia física y química de los resultados, junto a la adecuada respuesta o sensibilidad a la variación impuesta de distintos parámetros o condiciones de proceso.

Los resultados y discusiones del presente capítulo se desarrollarán organizados en tres bloques:

i) Estimación de los parámetros libres del modelo (calibración del modelo). En este punto, a partir de un primer paquete de datos experimentales, se calculan los valores de los parámetros “libres” del modelo que brindan mejor correspondencia, ya sea mediante un loop de optimización basado en el método de Levenberg-Marquardt, o estimados mediante cálculos directos;

ii) Validación cuantitativa del modelo, en la cual se contrastan datos medidos principalmente de un segundo paquete de experiencias realizadas en diferentes condiciones de diseño y operativas, con los simulados por el modelo ya calibrado; y

iii) Por último, se incluyen algunas aplicaciones de interés realizadas con el modelo calibrado y validado experimentalmente, que permiten dar cuenta de la capacidad que tiene la herramienta de modelado desarrollada en esta Tesis, para predecir el comportamiento y a la vez analizar el proceso de compostaje, bajo

diferentes condiciones operativas y escalas de trabajo.

7.2 PRIMER BLOQUE: Calibración del modelo

Una vez validado cualitativamente el modelo y probada la robustez de los métodos numéricos desarrollados para su resolución - como quedó demostrado en el capítulo 6 de este trabajo –, se procedió a la estimación de los parámetros y coeficientes que quedaron en condición de “libres” del mismo, detallados en la Tabla 5.2 del capítulo 5.

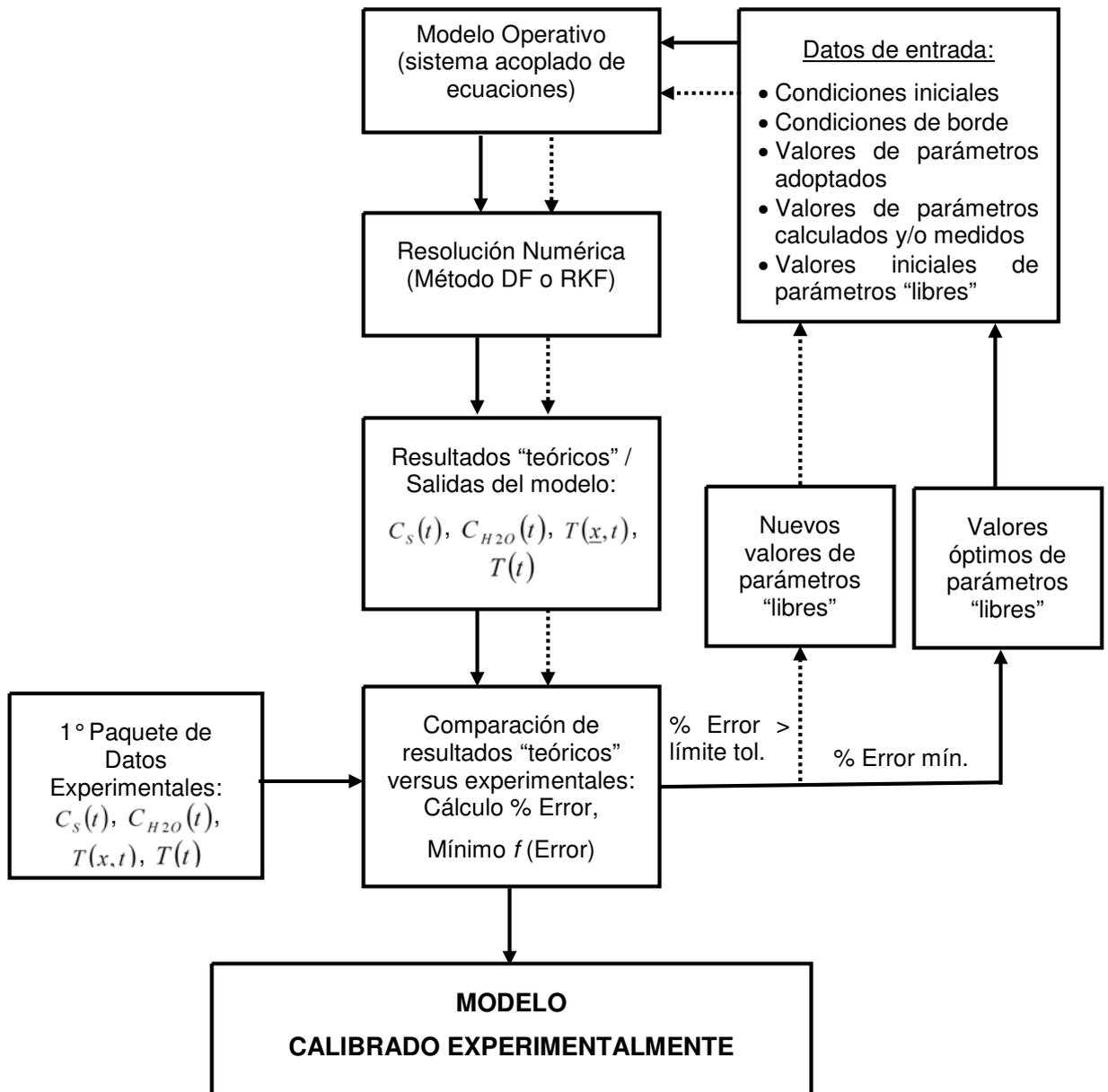
En tal sentido, para un primer conjunto de estos (compuesto por h_1 , h_2 , k_G , k_S , U , x_{evap} y ΔH_{rxn}), con la programación computacional desarrollada *ad-hoc*, los datos experimentales considerados en esta etapa de calibración ingresaban junto con los valores simulados con el modelo, a un algoritmo de optimización iterativo que utiliza la función “nlinfit” del Statistics Toolbox de Matlab (basada en el método de Levenberg-Marquardt), que los compara entre sí y minimiza la diferencia entre ambos, obteniendo así sus valores optimizados, i.e., que mejor representan a los datos de las condiciones experimentales estudiadas. Debe mencionarse que para cada parámetro libre ajustado de este modo, se verificó que los valores finales obtenidos estuviesen dentro del rango publicado para cada uno de ellos en la bibliografía de referencia (sintetizados en Tabla P.1, Apéndice P).

En las secciones que siguen, se presentan los valores de los parámetros y coeficientes optimizados del modelo. Cabe señalar que si bien se presentan los resultados en forma secuencial (comenzando por el BM para los componentes sólidos

totales y agua, pasando luego al BET puntual y finalmente el BET integrado), el conjunto de ecuaciones del modelo se resuelve acoplado utilizando la metodología descrita en la sección 6.1 del capítulo 6, basada en un proceso iterativo y de optimización en el cual existen un conjunto de condiciones (e.g., iniciales, de contorno) y valores de parámetros y coeficientes (e.g., fisicoquímicos, térmicos), algunos de los cuales son introducidos como datos de entrada en el programa, mientras que otros se inicializan y quedan “libres” para el proceso de estimación, ingresando al algoritmo de optimización descrito más arriba. Los resultados de cada etapa “alimentan” a la siguiente hasta el ajuste de todos los balances, utilizando como se mencionó antes un primer conjunto de datos experimentales.

Un esquema que resume el método iterativo de resolución del modelo y obtención de parámetros se ilustra en la Figura 7.1 presentada al final de esta sección.

Debe mencionarse que para un segundo grupo de parámetros (como b_{H_2O} y $C_{s,e}$), sus valores finales se obtuvieron mediante cálculos directos (ya sea en base a relaciones estequiométricas, o asumiendo un porcentaje de la concentración de ST inicial en función de la composición del sustrato, respectivamente). Y por último, existe un tercer grupo de parámetros que también forman parte del modelo, que simplemente se tomó su valor de la bibliografía ya que corresponden a propiedades termodinámicas (como en el caso de c_{P,H_2O} , $c_{P,S}$, L_v y L_c), valores de concentración de oxígeno en aire ($C_{O_2,0}$), o se fijaron a partir de mediciones experimentales derivadas de los ensayos (como en el caso de A_2 , A_4 , t_v , T_{ref} y V_R), cuyos valores serán informados oportunamente.



Referencias:

.....> Ciclo iterativo (se repite "n" veces hasta alcanzar los valores óptimos de parámetros)

——> Ciclo definitivo de cálculo (realizado con los valores de parámetros libres ajustados)

DF: Diferencias Finitas

RKF: Runge-Kutta-Fehlberg de 4to y 5to orden de precisión

Error: Error medio cuadrático relativo porcentual total.

Figura 7.1 Esquema iterativo de resolución del modelo y estimación de parámetros.

7.2.1 BM de los sólidos totales

a) Estimación de la k_G a tiempos largos (proceso completo)

En concordancia con diversos autores (ver capítulo 3, sección 3.4 *Cinética de degradación del sustrato*), utilizando las mismas ecuaciones de balance de materia (en esta oportunidad, la ecuación [5.26] y su condición inicial [5.27] referidas al BM para Sólidos totales), es posible calcular constantes “cinéticas” globales que surjan del análisis de intervalos temporales grandes del proceso, que incluyan además de las fases mesofílica y termofílica iniciales, las de las etapas de enfriamiento y de curado.

En las Figuras 7.2 a 7.4 se presentan resultados obtenidos para tres corridas experimentales que incluyen hasta 180 días de iniciado el proceso, informando en cada una el valor de k_G a “tiempos largos” y el de la relación $\frac{C_{s,e}}{C_{s,0}}$ determinadas.

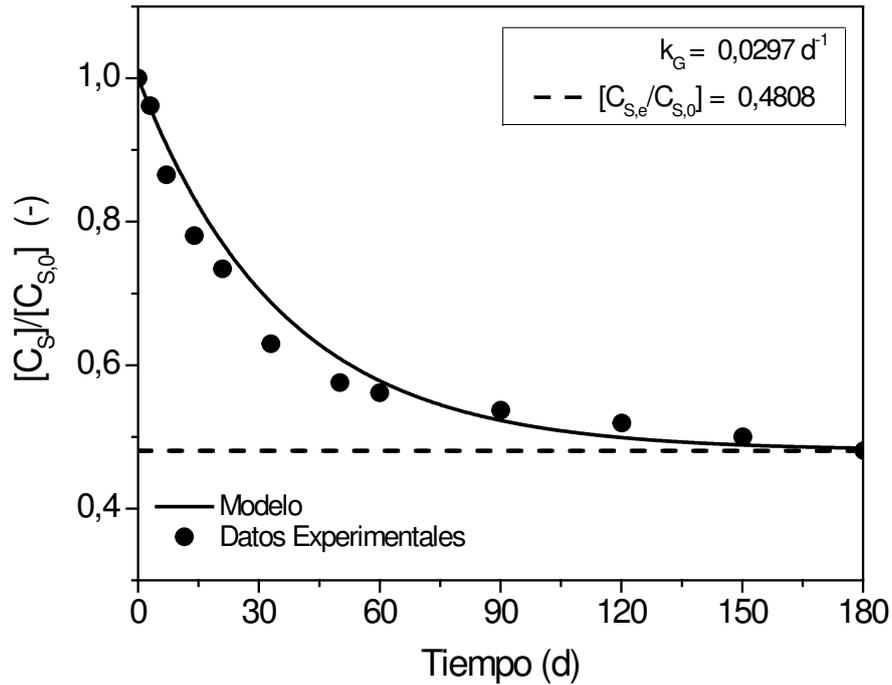


Figura 7.2 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales (período completo). Datos Corrida Exp. N° 10 (Relación $C/N = 27,1$; Humedad = 63,7 % , Volteos tipo "A"). % Error: 4,10.

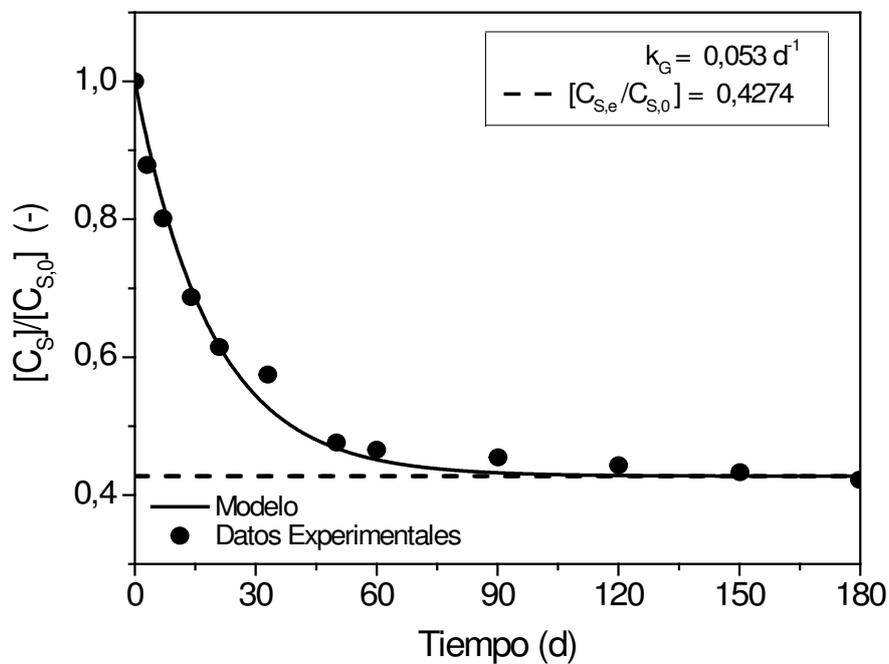


Figura 7.3 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales (período completo). Datos Corrida Exp. N° 11 (Relación $C/N = 27,1$; Humedad = 65,6 % ; Volteos tipo "A"). % Error: 3,48.

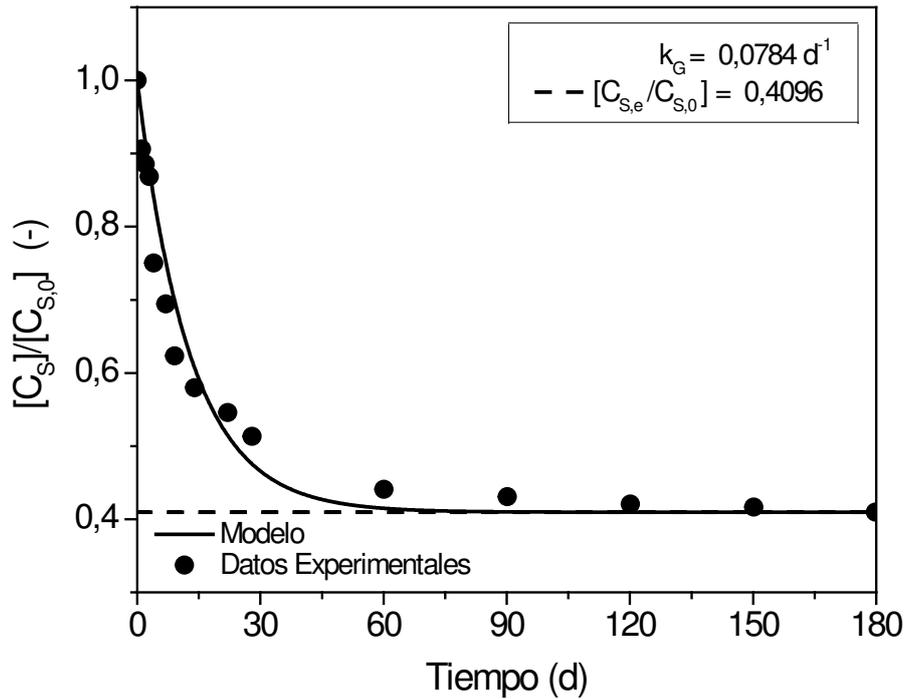


Figura 7.4 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales (período completo). Datos Corrida Exp. N° 12 (Relación $C/N = 34,2$; Humedad = 61,5 % , Volteos tipo "B"). % Error: 5,68.

Además de los valores informados de los parámetros, en las figuras anteriores se confirma, en base a una buena correlación obtenida entre datos del modelo y experimentales (los valores del error calculado resultan en todos los casos menores al 6 %), que la descomposición de la materia orgánica durante el compostaje toma la forma de una exponencial negativa en períodos largos. Por otra parte, se observa también que los valores de k_G a tiempos largos permiten calcular las asíntotas de las curvas, i.e., los valores de la concentración de equilibrio ($\frac{C_{s,e}}{C_{s,0}}$) que caracteriza a cada sustrato.

Complementariamente, se destaca que si bien las condiciones experimentales

y características del sustrato son similares, los valores de RSO remanente así como del parámetro k_G difieren, en contraposición a lo que uno esperaría obtener. Así por ejemplo, mientras en la corrida experimental N° 10 (Figura 7.2) se alcanza un valor casi constante de la biomasa remanente a los 150 días de iniciado el proceso, lo mismo sucede ya a partir de los 90 días en la corrida experimental N° 11 (Figura 7.3), y entre los 60 y 70 días aproximadamente para la corrida N° 12 (Figura 7.4); partiendo todas de similares valores de relación C/N , humedad y temperatura inicial del material.

De los resultados presentados es posible deducir también una relación entre la k_G (que indica la velocidad con que ocurre la degradación) y la materia orgánica remanente. En tal sentido, pareciera que una menor concentración de equilibrio se corresponde con el mayor valor de la pseudo constante, a la vez que elevados valores de la k_G permiten alcanzar temporalmente antes la biomasa resistente presente en el sustrato.

Debido a que estas últimas relaciones en principio no resultan tan simples de interpretar, en la siguiente tabla se presenta un mayor detalle de las condiciones experimentales y resultados de los ensayos considerados, buscando aportar datos para ampliar la discusión y encontrar una mejor explicación de estos resultados.

Tabla 7.1 Condiciones experimentales de los ensayos N° 10, 11 y 12.

| Parámetros y condiciones experimentales | Exp. N° 10 (Fig. 7.2) | Exp. N° 11 (Fig. 7.3) | Exp. N° 12 (Fig. 7.4) |
|--|--|--|--|
| Relación C/N | 27,1 | <u>27,1</u> | <u>34,2</u> |
| Humedad (% , b.h.) | 63,7 | 65,6 | 61,5 |
| Masa inicial (kg, b.h.) | 10 | 10 | 10 |
| Tipo de volteo | A | A | <u>B</u> |
| Condic. de contorno | abierto | abierto | abierto |
| Composición inicial del sustrato (% en peso de cada tipo de RSO, b.h.) | Res. comida (0 %), estiércol (65 % , paja trigo (2,5 %), chips de poda (2,5 %), <u>césped fresco</u> (30 %) | <u>Res. comida</u> (25 %), estiércol (70 % , paja trigo (2,5 %), chips poda (2,5 %), césped fresco (0 %) | Res. comida (10 %), estiércol (70 % , paja trigo (2 %), chips poda (6 %), césped fresco (12 %) |
| Lignina Total del sustrato (% , b.s.) | 5,31 | 5,78 | 6,16 |
| Porcentaje de degradación alcanzado (% , b.s.) | 52,0 | 57,3 | 59,0 |

Comparando la información brindada de las experiencias N° 10 y 11, se destaca que la diferencia más relevante entre ambas radica en la composición inicial del sustrato, en cuanto al contenido (% en peso) de los residuos de comida y de recortes de césped fresco, siendo muy similares el resto de los parámetros y condiciones iniciales en un caso y en el otro (en especial los valores de las relaciones C/N iniciales).

Contando además con los resultados del laboratorio que permiten caracterizar dichos RSO, y estimar en parte el aporte nutricional y en otros componentes y propiedades que realizan estos materiales a la mezcla inicial del sustrato, se sabe,

por ejemplo, que el residuo de comida posee un 0,4 % en peso de Lignina total, mientras que en el césped este componente no fue detectado a través de las técnicas analíticas aplicadas. Al mismo tiempo, en correspondencia con lo que opinan varios autores, los desechos de comida le aportan una variedad de nutrientes y estructura a la masa, mientras que el recorte de césped fresco fundamentalmente contribuye con nitrógeno orgánico como principal nutriente y le aporta escasa o nula estructura a la masa a compostar.

Si se tienen en cuenta ahora los registros de observaciones tomadas durante el desarrollo de los ensayos, en coherencia con lo recién expresado, estos ponían de manifiesto que las experiencias llevadas a cabo con sustratos con alto contenido de recortes de césped, si bien alcanzaban picos de temperatura importantes en el orden de los 59 – 63 °C dentro de las primeras 24 horas de proceso (denotando la presencia de componentes rápidamente biodisponibles), a continuación la temperatura descendía presentando una leve recuperación posterior sin llegar a alcanzar nuevamente valores termofílicos, al tiempo que se comenzaban a percibir condiciones de apelmazamiento y generación de olores como producto de la escasa estructura general presente en el sustrato.

Lo expuesto hasta el momento podría justificar el hecho de que pese a que el sustrato de la experiencia N° 11 en su conjunto posee un leve mayor contenido de lignina respecto a la experiencia N° 10, las mejores condiciones generales del sistema (principalmente en términos de biodisponibilidad de nutrientes y estructura de la masa, con la consecuente adecuada aireación interior), benefició el proceso de compostaje obteniendo así un valor más alto de la pseudo constante de degradación, con la mejor performance global del ensayo en relación al porcentaje de reducción másica alcanzado.

Si se compara ahora las condiciones y resultados obtenidos de la experiencia N° 12 con las anteriores, nuevamente pese a contar con un ligeramente mayor contenido de lignina y manteniendo las demás condiciones similares, pareciera en este caso que una mayor frecuencia en los volteos junto con temperaturas del ambiente más elevadas, permitieron obtener mejores condiciones para que ocurra la degradación del sustrato biodegradable, dando como resultado una tasa de descomposición más elevada en la primera etapa del proceso.

De la discusión anterior es posible inferir que, la relación C/N , uno de los parámetros más utilizados en la bibliografía para caracterizar el sustrato, no es suficiente por sí mismo para predecir su potencial degradación. En cambio, los efectos combinados de la frecuencia de aireación (volteos), la estructura y el balance y biodisponibilidad de nutrientes presentes en la mezcla a compostar (estos últimos caracterizados en parte por el contenido de Lignina total presente en el material), determinarían finalmente “cuanto” de lo posible a degradar, “efectivamente” se degrada.

b) Estimación de k_G a tiempos cortos (período inicial térmicamente más activo)

Resolviendo la misma ecuación de la sección anterior referida al BM de los Sólidos totales junto a su condición inicial, en las Figuras 7.5 y 7.6 se presenta la

evolución de $\left[\frac{C_{s,t}}{C_{s,0}} \right]$ contrastando datos simulados con datos experimentales

obtenidos en distintas condiciones y con diferentes tipos de sustratos, considerando ahora un tiempo de proceso de 10 días, coincidiendo con la extensión promedio de la

fase térmicamente más activa estudiada en esta Tesis considerando la escala de trabajo aplicada (la de laboratorio). En cada figura se presenta el valor óptimo hallado de la constante cinética global de pseudo primer orden (k_G) para “tiempos cortos”, y en su leyenda el resto de los datos correspondientes a cada experiencia así como los valores de la raíz del error medio cuadrático relativo porcentual total calculado.

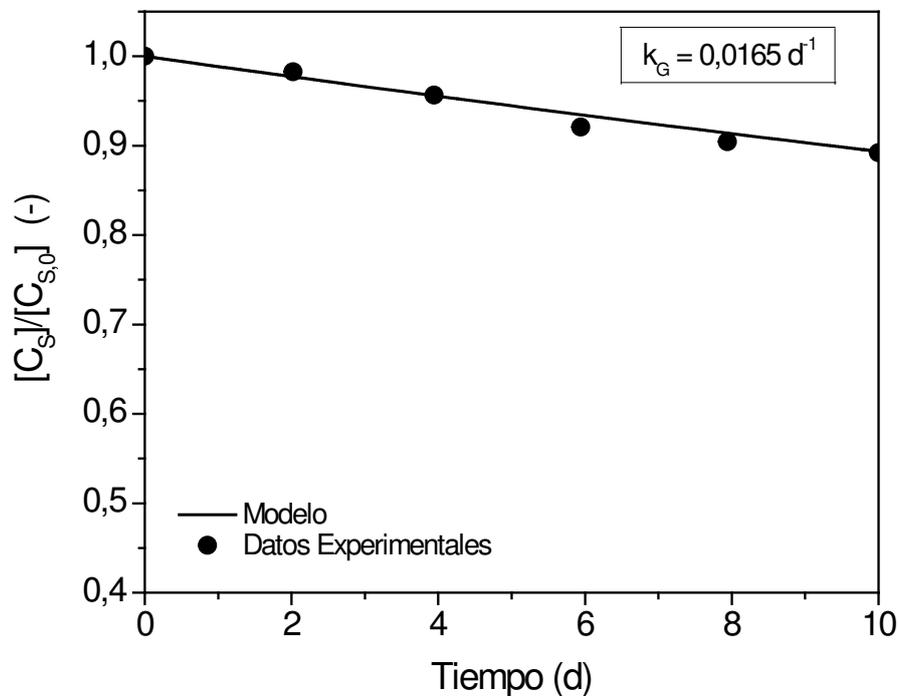


Figura 7.5 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales. Datos Corrida Exp. N° 24 (Relación $C/N = 62,4$; Humedad = 62,6 %). % Error: 0,79.

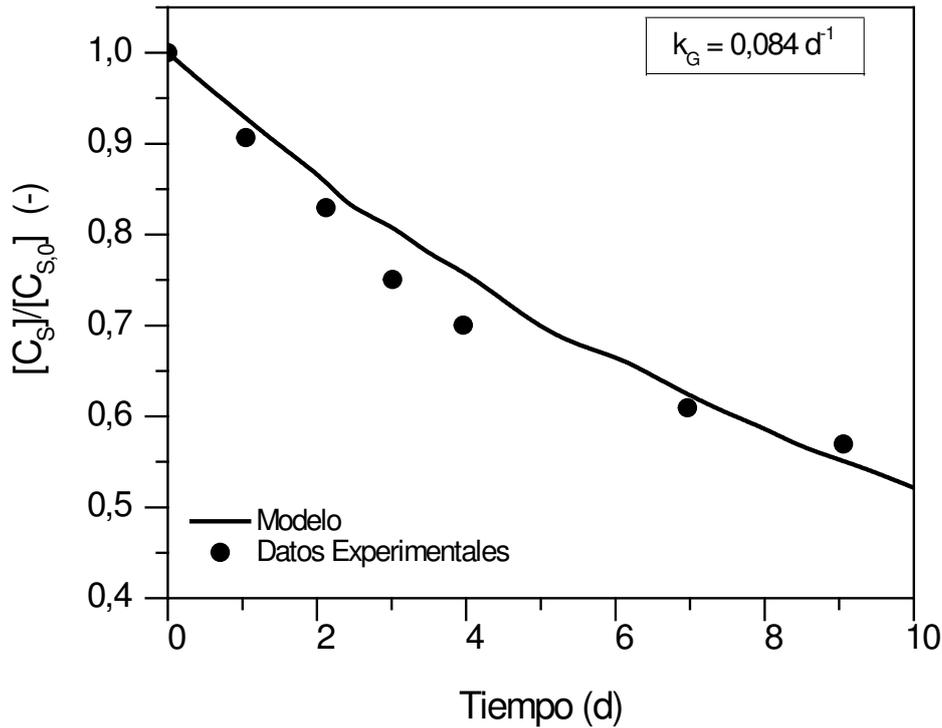


Figura 7.6 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de la concentración de sólidos totales. Datos Corrida Exp. N° 14 (Relación $C/N = 24,1$; Humedad = 69,9 %). % Error: 6,32.

De las gráficas precedentes puede observarse la buena correlación entre datos del modelo y experimentales. Los valores de las constantes cinéticas “globales” obtenidas permitieron predecir con bastante exactitud la concentración de sólidos totales en el tiempo considerado, al resultar los valores de la raíz cuadrada del error medio cuadrático relativo porcentual total menores al 7 % , pudiéndose integrar luego a los balances de materia del agua y de energía térmica para continuar con el análisis.

Por otra parte, si bien se confirma lo publicado por otros autores en cuanto a que la degradación del sustrato durante el compostaje en períodos cortos de tiempo (fase más activa del proceso) se aproxima a una línea recta con pendiente negativa, se observa que las pendientes de las mismas resultan diferentes entre sí, con la consecuente diferencia en la masa remanente de RSO obtenida al final de dicho

período y en el valor de la pseudo constante de degradación estimada. Una vez más los resultados permiten deducir que, para un mismo tiempo de proceso, mayores porcentajes de reducción en peso del sustrato se corresponden con elevados valores de k_G . Así por ejemplo para los casos expuestos, en diez días mientras que la reducción másica alcanzada en el primero fue del 15,33 %, resultó ser del 43,10 % en el segundo caso presentado, correspondiéndose con el mayor valor de k_G .

Una posible causa que justifique estas diferencias puede encontrarse si se analizan en detalle las condiciones en las que se realizaron los ensayos, las cuales se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 7.2 Condiciones experimentales de los ensayos N° 14 y 24.

| Parámetros y condiciones experimentales | Exp. N° 14 (Fig. 7.6) | Exp. N° 24 (Fig. 7.5) |
|---|--|--|
| Relación C/N | <u>24,1</u> | <u>62,4</u> |
| Humedad (% , b.h.) | <u>69,9</u> | <u>62,4</u> |
| Masa inicial (kg, b.h.) | 10 | 10 |
| Tipo de volteo | <u>B</u> | <u>A</u> |
| Condic. de contorno | abierto | abierto |
| Composición inicial del sustrato (% en peso de cada tipo de RSO b.h.) | Res. comida (20,2 %), estiércol (35,4 % , paja trigo (1 %), chips poda (3 %), <u>césped fresco</u> (40,4 %) | Res. comida (15 %), estiércol (20 % , paja trigo (5 %), <u>chips de poda</u> (60 %), césped fresco (0 %) |

En esta oportunidad pareciera que la diferencia existente en los valores de la relación C/N inicial de los sustratos podría explicar los resultados obtenidos. En relación a esto, a su vez en la experiencia N° 24 el escaso nitrógeno presente estaría actuando como un factor limitante para el desarrollo de la actividad microbiana.

Complementariamente, en cuanto a la biodisponibilidad del carbono, puede observarse que en dicha corrida se utilizó un alto porcentaje de chips de poda (del orden del 60 % en peso), mientras que en la experiencia N° 14 (Figura 7.6) este material solo representa un 3 % en peso del sustrato total. De la Tabla 4.2 del capítulo 4 puede conocerse que dicho residuo está compuesto de un 13,8 % de lignina total, un 52,2 % de carbono orgánico y posee una elevada relación C/N (a razón de 580/1) debido a su escaso contenido en nitrógeno orgánico (que es del orden de 0,09 %). Estos últimos datos aportados permiten inferir la baja degradabilidad de los residuos de chips de poda, y por ende, cuando es el principal componente de un sustrato, es esperable que le transfiera dicha característica al conjunto de la mezcla, lo cual podría justificar en parte la pendiente más suave obtenida en la corrida N° 24 y al mismo tiempo, por el contrario, la pendiente más pronunciada en el segundo caso presentado. Así mismo, debe mencionarse que en esta Tesis no se están determinando todos los parámetros que definen la calidad del sustrato en términos de la biodisponibilidad del carbono, por lo que también se podrían estar descartando factores que posean cierto grado de incidencia sobre los resultados. Lo que sí queda claro es que tanto la relación C/N como el contenido de Lignina Total, no logran explicar en su totalidad dicha condición.

Otro factor que podría contribuir a justificar la diferencia existente en los resultados a favor de una mejor performance global en el caso de la corrida N° 14 (y

que coincide con los resultados analizados del período completo), es que en dicho ensayo se aplicó un régimen de mayor frecuencia de volteo (el tipo B), respecto del implementado en la corrida N° 24 (del tipo A, con menor frecuencia), reduciendo así las limitaciones de oxígeno que podrían presentarse dentro del proceso.

Recapitulando ahora las conclusiones parciales derivadas de los resultados presentados en las últimas dos secciones del capítulo (las referidas al cálculo y análisis de las k_G considerando el proceso completo versus la etapa inicial térmicamente más activa), debe señalarse que si bien las constantes cinéticas a tiempos largos permiten calcular la porción “resistente”, no representan en forma adecuada los períodos térmicamente más activos del proceso, que en definitiva son los que resultan ser de mayor interés para el diseño y dimensionamiento de los sistemas de compostaje, sucediendo lo mismo a la inversa. Al respecto, autores como Das & Keener (1997), Ekinci (2001) y Ekinci et al. (2004a, 2005, 2006) citados en el estado del arte de esta Tesis (ver capítulo 3, sección 3.4 *Cinética de degradación del sustrato*), lo atribuyen a la combinación de distintas cinéticas asociadas a diferentes etapas del proceso, considerando la presencia de “multicomponentes” dentro del sustrato.

En esta Tesis quedó demostrado en ambos períodos de tiempo analizados (el corto y el largo), en cuanto a la composición del material, que no solo debe proveerse un sustrato inicial balanceado nutricionalmente, sino que éstos deben ser además biodisponibles (calidad del sustrato). En tal sentido, se comprobó que el parámetro relación C/N no es lo suficientemente bueno para describir dicha condición, y que el contenido de Lignina total presente en los sustratos, pareciera representar ligeramente

mejor la degradabilidad del material. Pero esto explica solo una parte del problema. Para comprender en forma integral los resultados es necesario también tener en cuenta factores tales como la frecuencia de volteos y la estructura de la masa (que afecta su aireación interna), quienes definirían las condiciones generales de los sistemas que impactan fuertemente en la cinética del proceso, y con ello, en la performance global del mismo.

Por último, es preciso realizar un par de aclaraciones. Por un lado, mencionar que si bien en la presente sección se presentaron los resultados de la constante cinética correspondientes a solo cinco experiencias, en el Apéndice S pueden consultarse los valores de dicho parámetro estimados de las restantes corridas experimentales consideradas. Por el otro, decir que los resultados que se presentarán de aquí hasta finalizar el capítulo, se referirán solo al periodo inicial térmicamente más activo, por su importancia en el desarrollo del proceso como se dijo antes, así como por su mayor representatividad de la fase experimental que fuera estudiada en esta Tesis.

7.2.2 BM del contenido de agua

Para simular la evolución de la concentración de agua en el sustrato, se resuelve la ecuación [5.28] con su condición inicial conjuntamente al BM del sólido mencionado antes. Se utilizan como datos de entrada (además de las condiciones iniciales de ST y agua) los valores de k_G (“a tiempos cortos”) y de la concentración de equilibrio ya estimados para cada corrida, siendo ahora los parámetros a determinar

la porción de agua evaporada (x_{evap}) y el coeficiente $b_{\text{H}_2\text{O}}$.

La Figura 7.7 (partes a, b y c) muestra la correlación entre datos experimentales y valores simulados con el modelo, donde el único parámetro que se dejó libre en la optimización es el x_{evap} , obteniéndose un muy buen ajuste para el conjunto de datos considerados en esta etapa de calibración del modelo con un valor único igual a 5, resultando el error calculado en todos los casos inferior al 5 %. Por su parte, el coeficiente $b_{\text{H}_2\text{O}}$ se determinó para cada corrida mediante cálculos directos en base a relaciones estequiométricas. En tal sentido, contando con la composición inicial del sustrato utilizado en cada ensayo (para lo cual se siguió la metodología de cálculo expuesta en el Apéndice K), se planteó la estequiometría de la reacción de degradación (ver capítulo 2, ecuaciones 2.1 y 2.2), considerando la masa de sólidos degradada en cada experiencia, y se balanceó cada elemento en la reacción obteniéndose los valores de $b_{\text{H}_2\text{O}}$ que se presentan en la Tabla 7.3. Por último para realizar las distintas simulaciones se fijó para dicho parámetro un valor igual a 0,519 ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg Sólido degr.}^{-1}$), que corresponde al promedio de los valores calculados individualmente (desvío estándar de los valores < 0,05 %).

Tabla 7.3 Valores calculados del coeficiente $b_{\text{H}_2\text{O}}$.

| Corrida Exp. N° | Fórmula química sustrato ($\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$) | $b_{\text{H}_2\text{O}}$ ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg Sólido degr.}^{-1}$) |
|--------------------|---|--|
| 10 | $\text{C}_{27,1}\text{H}_{215,6}\text{O}_{99,7}\text{N}$ | 0,513 |
| 11 | $\text{C}_{27,1}\text{H}_{221,2}\text{O}_{104,9}\text{N}$ | 0,482 |

| | | |
|-----------------------|-------------------------------|---------|
| 12 | $C_{34,2}H_{252,2}O_{120,0}N$ | 0,492 |
| 13 | $C_{31,2}H_{218,3}O_{103,3}N$ | 0,505 |
| 14 | $C_{24,1}H_{232,5}O_{110,5}N$ | 0,538 |
| 15 | $C_{30,5}H_{252,9}O_{120,0}N$ | 0,548 |
| 16 | $C_{34,2}H_{232,5}O_{110,5}N$ | 0,531 |
| 21 | $C_{30,5}H_{232,5}O_{110,5}N$ | 0,547 |
| 22 | $C_{30,2}H_{218,3}O_{103,3}N$ | 0,522 |
| 23 | $C_{24,4}H_{408,0}O_{188,1}N$ | 0,495 |
| 24 | $C_{62,4}H_{221,2}O_{104,9}N$ | 0,532 |
| 25 | $C_{20,9}H_{215,3}O_{101,7}N$ | 0,520 |
| 26 | $C_{22,0}H_{218,3}O_{103,3}N$ | 0,509 |
| 27 | $C_{20,0}H_{176,2}O_{95,3}N$ | 0,519 |
| 28 | $C_{24,4}H_{199,5}O_{154,2}N$ | 0,512 |
| Valor Promedio = | | 0,519 |
| Desvío estándar (%) = | | 0,02160 |
| Varianza = | | 0,00047 |

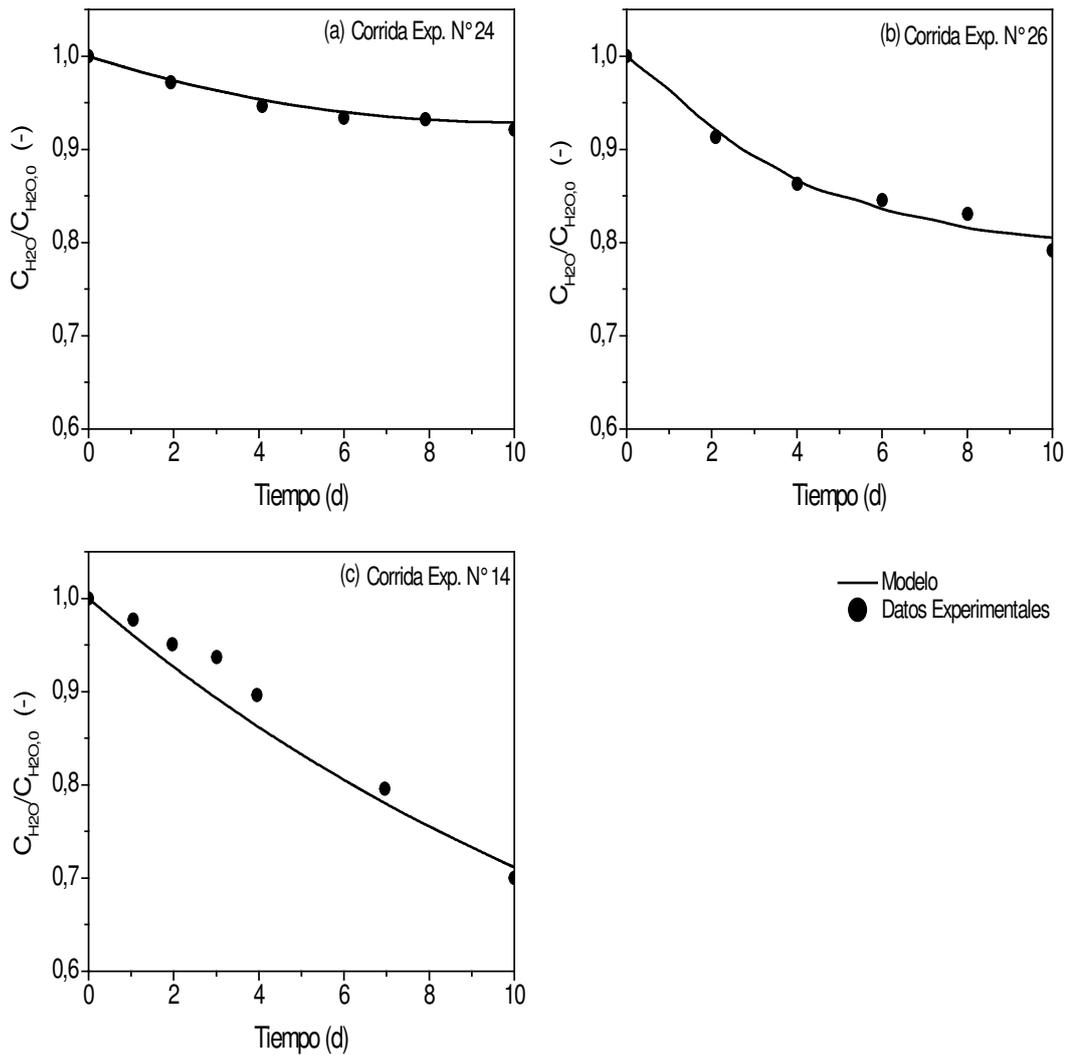


Figura 7.7 Datos simulados vs. experimentales del contenido de agua en el sustrato a distintas k_G :
 (a) $0,0165 \text{ d}^{-1}$; (b) $0,04 \text{ d}^{-1}$; (c) $0,084 \text{ d}^{-1}$. % Error: (a) 0,55; (b) 1,73 y (c) 4,70.

Los gráficos precedentes indican que la evolución del contenido de agua en el sustrato es inversamente proporcional al valor de k_G . Este comportamiento es factible al considerar sistemas abiertos y sin adición externa de agua, tal como los sistemas simulados y estudiados experimentalmente en este caso. Así mismo debe recordarse

que en el modelo el agua que se evapora es cinco veces mayor a la generada (debido al valor ajustado del coeficiente x_{evap}) y, por lo tanto, a mayor tasa de degradación mayores serán las pérdidas de agua por parte del sistema.

7.2.3 BET Puntual: Distribución espacial y temporal de la temperatura ($T \equiv T(x, t)$)

Siguiendo la misma metodología de resolución, el primer paso es fijar algunos valores de parámetros y realizar la estimación de aquellos que aún quedan libres para optimizar. En relación a lo primero, se tomó de Haug (1993) el valor del $c_{P,s}$ para los sólidos totales igual a 0,25 ($\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$), y los valores del c_{P,H_2O} ($1 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$), L_c ($5277,78 \text{ kcal} \cdot \text{kg} \text{ degr.}^{-1}$) y L_v ($556,25 \text{ kcal} \cdot \text{kg} \text{ vapor}^{-1}$). Una vez fijados estos y aplicando los valores de los parámetros cinéticos (k_G y $C_{s,e}$) y de los coeficientes b_{H_2O} y x_{evap} hallados previamente, los parámetros del modelo que restan libres estimar son $h_1, h_2, \Delta H_{rxn}$ y k_S .

En este caso se resuelven conjuntamente las ecuaciones del BM de los sólidos totales y del agua, con las correspondientes al BET puntual, ya sea en coordenadas cartesianas rectangulares (ecuación [5.31], condiciones de contorno [5.32] y [5.33] y condición inicial [5.34]), o en coordenadas cilíndricas (ecuación [5.35], con sus correspondientes condiciones de contorno e inicial), dependiendo la adopción de éstas últimas de la forma geométrica que tenga la pila de sustrato utilizada en el ensayo. Complementariamente, el algoritmo de optimización basado en el método de

Levengberg-Marquardt, se inicialó ($t = 0$) con los valores de 65 y 76,6 $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ para h_1 y h_2 , y de -4060,4 $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ y 4,8 $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ para ΔH_{rxn} y k_S , respectivamente, todos ellos elegidos dentro del rango reportado en la bibliografía (ver Tabla P.1, Apéndice P). La aplicación en forma iterativa de dicho esquema numérico de optimización, permitió obtener un set de valores de los parámetros “libres” que ajustó adecuadamente el conjunto de datos experimentales como se puede observar en la Tabla presentada a continuación.

Tabla 7.4 Valores óptimos de los parámetros libres estimados del BET puntual.

| Corrida Exp. N° | h_1 ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) | h_2 ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) | ΔH_{rxn} ($\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$) | k_S ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) |
|--------------------|--|--|--|--|
| 24 | 61,40 | 81,36 | -5219,96 | 4,74 |
| 25 | 64,99 | 80,70 | -5158,41 | 5,98 |
| 26 | 59,35 | 79,45 | -5427,23 | 8,95 |
| Promedio | 61,91 | 80,50 | -5268,53 | 6,56 |
| Desvío Estándar | 2,85 | 0,97 | 140,83 | 2,16 |

De los resultados presentados en la tabla anterior, puede constatarse como se dijo más arriba, que tomando el valor promedio de los parámetros, por su bajo desvío estándar permite representar todas las condiciones experimentales consideradas. Lo cual resulta válido en tres de los cuatro parámetros considerados. Así, mientras que

el desvío estándar para h_1 , h_2 y ΔH_{rxn} representa menos del 5 % del valor promedio, para k_s , representa casi el 33 % , lo cual resulta bastante elevado.

Respecto de este último parámetro, cabe señalar que su valor depende de varios factores, entre ellos la humedad del sustrato, que varía claramente de un experimento a otro. Chequeando por otro lado sus valores publicados en la bibliografía tomada como referencia (ver Tabla P.1 del Apéndice P), se observa que también resulta muy variable, por lo que intentar utilizar su valor promedio trae aparejado incluir cierto error por su dispersión en los resultados del modelo. Seki et al (1987), por ejemplo, publicaron en su trabajo un valor de 14,4, mientras que Barrena et al. (2006) publicó para sus experiencias un valor de 8,24, y años más tarde Anh et al. (2009 a, b) indicó que valía entre 0,62 y 16,72; siempre considerando unidades de $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, equivalentes a las utilizadas en esta Tesis.

Para este trabajo, al constatar que el valor promedio obtenido de k_s se encuentra dentro del rango publicado, y que fue estimado en base a datos experimentales que representan variadas condiciones de diseño y operación (como se detallan en la siguiente Tabla 7.5), se consideró que pese a que su desvío es algo elevado (pero siempre menor al 35 %), aceptar el hecho de introducir cierto margen de error en los resultados y utilizar su valor promedio para las restantes simulaciones, simplificando así la aplicación de esta herramienta de modelado desarrollada, cuando por ejemplo se proceda a validar experimentalmente el modelo en la siguiente sección del capítulo.

Por último cabe señalar respecto del parámetro h_2 , que al igual de los restantes estimados en forma óptima, se utiliza siempre su valor óptimo promedio en las

simulaciones que de aquí en más se presente, salvo que se especifique lo contrario, como es el caso cuando se impone su valor igual a cero, al considerar un sistema cerrado y sin intercambio de calor con el exterior (por ejemplo, al colocar una cobertura aislante sobre la pila en los ensayos).

Tabla 7.5 Condiciones experimentales de los ensayos utilizados para estimar k_s .

| Condición del ensayo | Corrida Exp. N°24 | Corrida Exp. N°25 | Corrida Exp. N°26 |
|---|--|--|--|
| Relación C/N | <u>62,4</u> | <u>20,9</u> | 22 |
| Humedad (% , b.h.) | <u>62,4</u> | 66,0 | <u>67,2</u> |
| Masa inicial (kg, b.h.) | 10 | 10 | 10 |
| Tipo de volteo | <u>A</u> | A | <u>B</u> |
| Condic. de contorno | <u>Abierto</u> | <u>Cerrado</u> | Abierto |
| Composición inicial del sustrato (% en peso de cada tipo de RSO b.h.) | Res. comida (15 %), estiércol (20 % , paja trigo (5 %), <u>chips de poda</u> (60 %), césped fresco (0 %) | Res. comida (25 %), estiércol (15 % , paja trigo (5 %), chips de poda (5 %), <u>césped fresco</u> (50 %) | Res. comida (20 %), <u>estiércol</u> (60 % , paja trigo (5 %), chips de poda (5 %), césped fresco (10 %) |

7.2.4 BET Integrado: Evolución temporal de la temperatura promedio en el volumen $\langle T(\underline{x}, t) \rangle_{V_R} = T(t)$

En esta oportunidad se resuelven las mismas ecuaciones detalladas en la

sección anterior, reemplazando las referidas al BET puntual por las correspondientes al BET Integrado (ecuación [5.39] y condición inicial [5.40]). En cuanto a los parámetros del modelo, se utilizan los mismos valores que ya fueron estimados y/o fijados previamente, quedando libre para su optimización únicamente el coeficiente U , cuyo valor para inicializar el loop de cálculo ($t = 0$) utilizado fue de $20 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

Otro de los parámetros importantes que surge del modelado a nivel macroscópico es la relación A_2/V_R (o su equivalente expresado en términos de A_2/m , recordando que A_2 tiene en cuenta el área superficial de intercambio calórico), que es calculada a partir de datos experimentales de dimensiones de la pila, volumen másico inicial y densidad del material utilizado en las corridas.

En la siguiente Tabla 7.6 se presentan los valores de U obtenidos para cada una de las experiencias consideradas, así como el valor promedio (junto a su desvío estándar), que finalmente será el utilizado para las siguientes simulaciones correspondientes a la verificación experimental del modelo. Complementariamente, en las Tablas 7.1 y 7.4 presentadas antes, podrán revisarse las condiciones experimentales de los ensayos utilizados para su estimación.

Tabla 7.6 Valores estimados del parámetro U .

| Corrida Exp. N° | U (kcal · m ⁻² · °C ⁻¹ · d ⁻¹) |
|--------------------|---|
| 10 | 13,23 |
| 11 | 15,35 |
| 12 | 16,45 |
| 24 | 14,93 |
| Promedio | 14,99 |
| Desvío estándar | 1,33 |

7.3. SEGUNDO BLOQUE: Validación cuantitativa del modelo

Seguidamente a la calibración del modelo realizada en el apartado anterior, con la totalidad de los parámetros libres ya ajustados y optimizados, y por lo tanto, sin tener que modificarlos de aquí en más, con los programas computacionales ya verificados, y a partir de un segundo grupo de datos experimentales obtenidos en diferentes condiciones operativas y de diseño iniciales, se procedió a validar experimentalmente el modelo aplicando la metodología representada en la Figura 7.8.

En cuanto a los datos experimentales utilizados en esta etapa, vale aclarar que la mayoría de ellos son totalmente independientes respecto del primer paquete utilizado para la estimación de parámetros del modelo. Estos son los provenientes de las corridas N° 13, 15, 16, 21, 22, 23, 26, 27 y 28. Complementariamente, pese a no ser independientes (por haber sido utilizados en la calibración del modelo), se decidió

incluir en esta sección datos de temperatura medidos de los ensayos N° 24 y 26, que si bien no son útiles para validar el proceso en ciertas condiciones experimentales, ayudaron a completar el estudio y análisis del proceso de compostaje que fuera objeto del modelado desarrollado en este trabajo. La razón principal por la cual se decidió dicha medida, radica en que al momento de la redacción de esta nueva versión revisada y mejorada de la Tesis a partir del dictamen de los jurados (año 2016), no se contaba con nuevos datos experimentales y de calidad para ser incorporados, debido a que la fase experimental original concluyó en 2011. En la leyenda de aquellas figuras que contengan dichos datos será debidamente explicitado.

En esta sección, la presentación de los resultados y discusiones asociadas para la validación experimental del modelo se centra directamente en el Balance de Energía Térmica tanto puntual como integrado, por ser la temperatura y los procesos termodinámicos que tienen lugar en la masa compostando, los de mayor interés y relevancia a ser estudiados en esta Tesis, y sobre todo, lo ocurrido en la fase inicial térmicamente más activa del proceso.

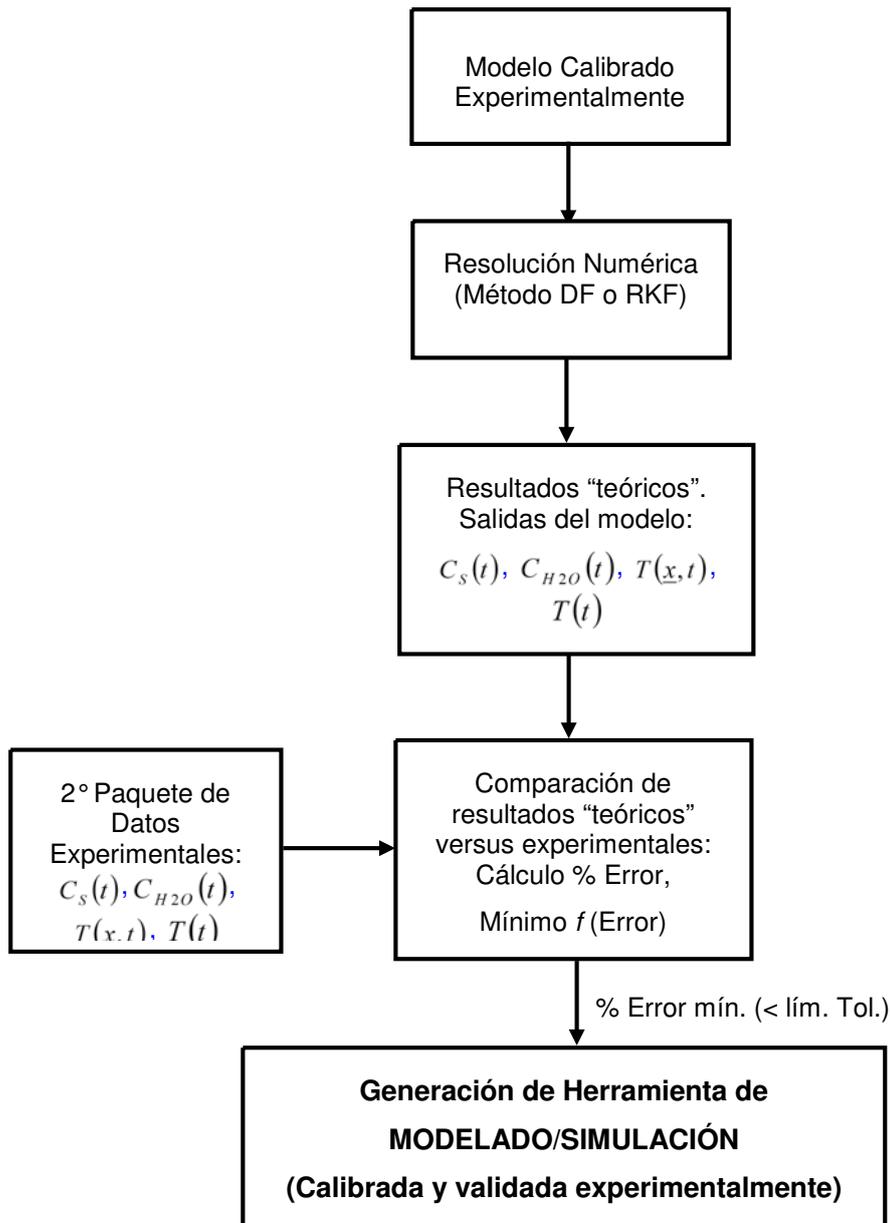
Por lo tanto, dicho análisis estará enfocado en observar la correspondencia o no entre salidas del modelo y datos experimentales de la evolución de la temperatura (en un caso, su distribución espacio-temporal, y en el otro, promediada en el volumen), correspondientes al período inicial estudiado, así como en explicar e interpretar los efectos encontrados bajo las condiciones estudiadas, sobre el desarrollo del proceso de biodegradación en sí mismo. Debe recordarse una vez que la temperatura del sustrato es una de las variables de estado del compostaje reconocida como una de la más relevante para el establecimiento tanto de condiciones de estabilidad como de sanitación del material procesado.

Para evaluar el poder predictivo del modelo, en cada contraste de datos simulados con el modelo ya calibrado versus experimentales se calculó la raíz cuadrada del error medio cuadrático relativo porcentual total, cuyo valor se expone en la leyenda de cada figura que es presentada, y se define como:

$$Error(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{(\psi)_{Experimental}^i - (\psi)_{Simulados}^i}{(\psi)_{Experimental}^i} \times 100 \right)^2}{N}} \quad [7.1]$$

Con ψ la variable simulada $\left(\frac{C_S}{C_{S,0}}, \frac{C_{H2O}}{C_{H2O,0}}, T_{(x,t)} \text{ y } T_{(t)} \right)$, y siendo N el número total de datos experimentales considerados.

Para completar el análisis de validación del modelo, se graficó el conjunto de datos simulados versus el conjunto de datos experimentales analizados y discutidos previamente, por un lado los provenientes de la resolución del BET puntual, y por el otro del BET integrado (temperaturas promedios). En cada caso, la regresión lineal de estos datos debería dar una recta con una pendiente lo más cercana posible a 1, y ordenada al origen cercana a 0, para demostrar que el ajuste y la predicción del modelo han sido buenos; dándose con ambas herramientas (cálculo del porcentaje de error y la regresión lineal de los datos) por validado cuantitativamente el modelo para las condiciones experimentales evaluadas.



Referencias:

DF: Diferencias Finitas

RKF: Runge-Kutta-Fehlberg de 4to y 5to orden de precisión

Error: Error medio cuadrático relativo porcentual total.

Figura 7.8 Metodología implementada para la validación experimental del modelo.

7.3.1 BET Puntual: Evolución de la distribución espacial y temporal de la temperatura ($T \equiv T(\underline{x}, t)$)

Aplicando la metodología previamente explicada, se resuelve el sistema de ecuaciones que compone el modelo (BM de los sólidos totales y del agua, y BET puntual, ya sea en coordenadas cartesianas rectangulares, o en cilíndricas), con sus respectivas ecuaciones constitutivas, condiciones iniciales y de contorno, incorporando y fijando ahora el conjunto de parámetros del modelo previamente definidos (ya sea por optimización al ser libres, o medidos y/o estimados experimentalmente, o adoptados de la bibliografía).

A continuación, se presentan los resultados del modelo (teóricos) contrastados con los datos experimentales obtenidos bajo las diferentes condiciones de diseño y de operación estudiadas.

a) Perfiles de temperatura a distintos tiempos y distintas k_G

En las Figuras 7.9 y 7.10 se comparan datos simulados y experimentales de perfiles de temperatura a distintos tiempos ($t = 0, 24, 45$ y 52 horas) hasta antes de efectuar el primer volteo, considerando diferentes valores de k_G . Debe señalarse que los datos experimentales fueron obtenidos en condiciones similares de operación (frecuencia de volteos tipo "A") y de diseño (humedad inicial $63,3 \pm 0,7 \%$, $T_{s,0}$ $19,6$ °C, T_{ref} $20,0$ °C y condición de contorno abierto), variando únicamente la composición del sustrato en relación a la proporción de los tipos de RSO utilizados.

De este modo, el carbono biodisponible en el primer caso resultó 25,5 % en peso del C orgánico total y la relación C/N 62,4, mientras que en el segundo fue 48,2 % y 24,4, respectivamente.

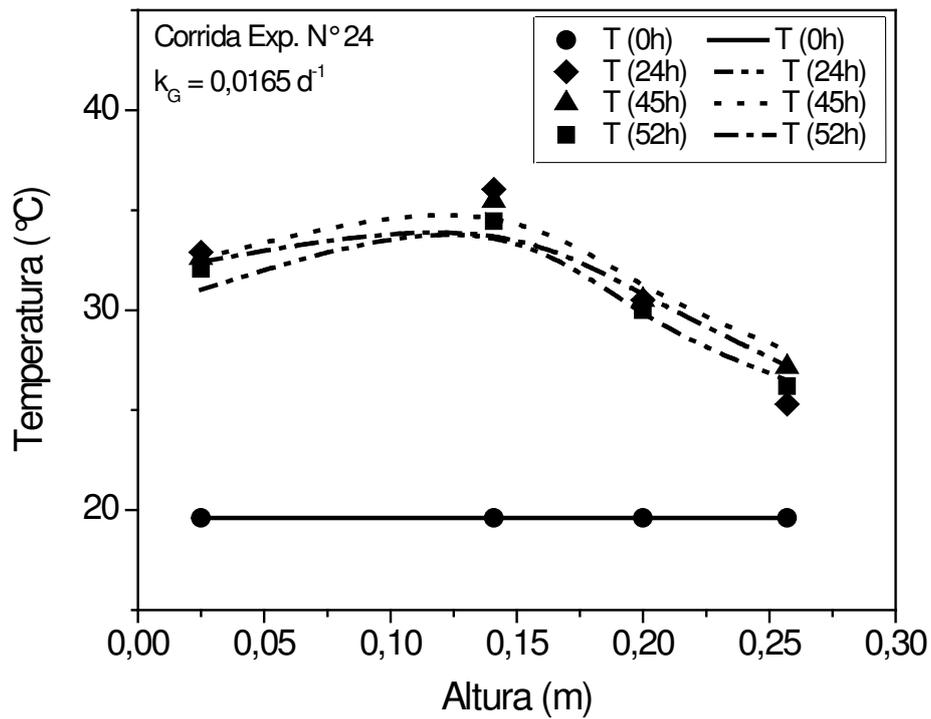


Figura 7.9 Datos simulados (líneas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Corrida Exp. N° 24 (datos no independientes). % Error: 2,16 (promedio).

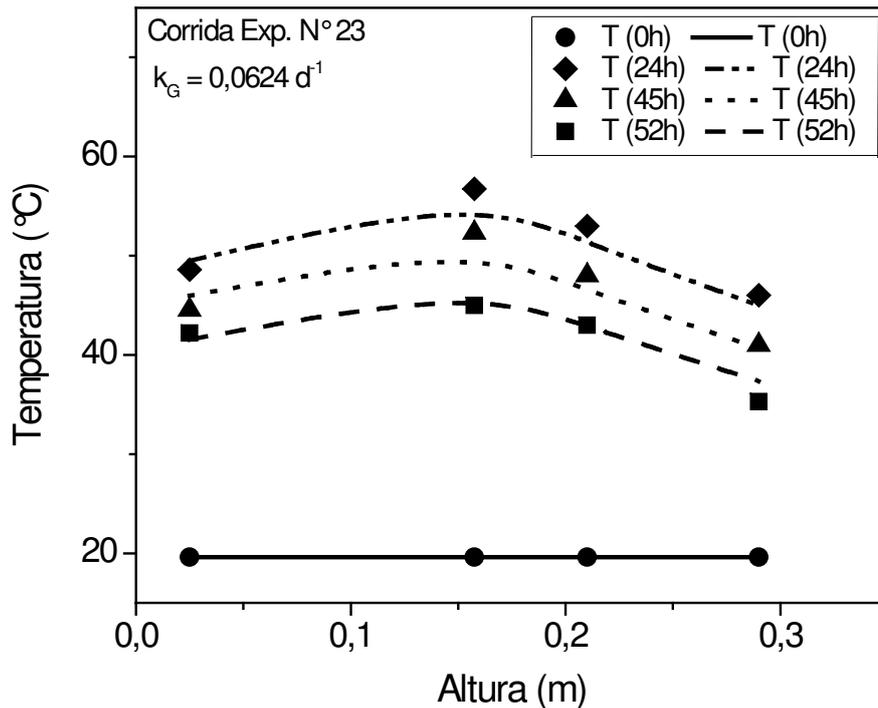


Figura 7.10 Datos simulados (líneas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura a distintos tiempos. Corrida Exp. N° 23. % Error: 1,97 (promedio).

En las figuras anteriores puede observarse en términos generales, además de la buena correlación entre los datos simulados y experimentales (con errores calculados siempre menor al 3 %), cómo los perfiles se van formando en el tiempo y alcanzan los valores más altos de temperatura registrados/simulados entorno a las 24 horas de proceso, para luego comenzar a descender, localizándose en todo momento la temperatura máxima del material próxima al centro de la pila. Se observa también cómo las diferentes k_G impactan sobre la magnitud y distribución de la temperatura dentro de la pila. En tal sentido, bajos valores de este parámetro que se pueden asociar a una menor proporción de C biodisponible y elevadas relaciones C/N, redundan en una menor generación de calor para el período representado (caso de perfiles de temperatura superpuestos, Figura 7.9), sucediendo lo contrario al

incrementar su valor (perfiles de temperatura espaciados e incrementándose en el tiempo, Figura 7.10).

b) Perfiles de temperatura a distintos tiempos y distintas condiciones de contorno

En las siguientes dos figuras se contrastan datos simulados versus experimentales obtenidos al implementar diferentes condiciones de contorno. La primera de ellas representa un típico sistema abierto que intercambia flujo calórico con el ambiente que lo rodea (con los valores óptimos reportados previamente de h_1 , h_2 y k_s), mientras que la segunda representa como caso límite la condición de sistema térmicamente cerrado, obtenida en el ensayo usando una cobertura aislante, asumiendo en el modelo $h_2 = 0$ y manteniendo el resto de los parámetros constantes. En ambas corridas experimentales la T_{ref} fue 20,0 °C y los valores de k_G 0,0462 d^{-1} y 0,0387 d^{-1} , respectivamente.

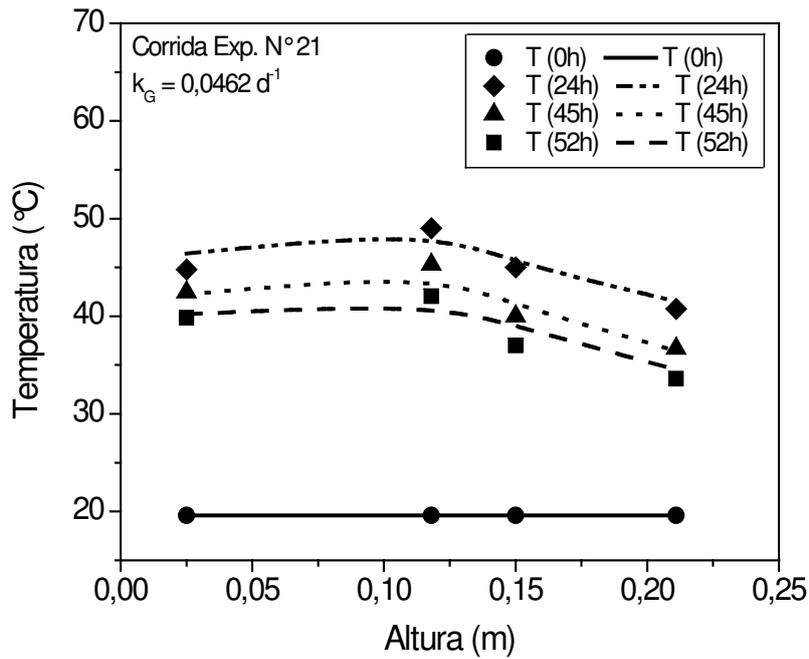


Figura 7.11 Datos simulados (líneas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura en un sistema térmicamente abierto. Corrida Exp. N° 21. % Error = 5,08 (promedio).

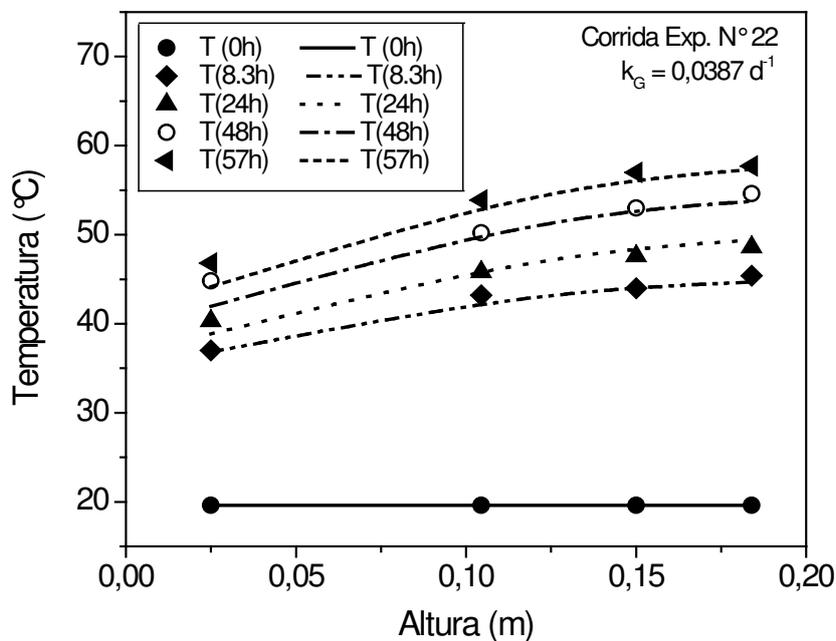


Figura 7.12 Datos simulados (líneas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura en un sistema térmicamente cerrado. Corrida Exp. N° 22. Parámetro fijado: $h_2 = 0$ ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$). % Error = 6,21 (promedio).

Los valores de errores obtenidos (cuyo promedio resultó en ambos menor al 7

%) indican una vez más que el modelo calibrado permite predecir con buena precisión los datos experimentales, en este caso generados bajo diferentes condiciones de borde.

Comparando ambas figuras se destaca la diferencia en la forma de los perfiles en el extremo superior de la pila (interfase sólido-aire). En el primer caso, cuando existe intercambio calórico con el ambiente circundante (valores de $h_2 \neq 0$) y se forman gradientes de temperatura que originan un flujo de calor hacia el exterior (la sala se encuentra a menor temperatura que la masa compostando), la temperatura es menor en dicho extremo en todos los tiempos estudiados. Por su parte, en el segundo caso (con valores de $h_2 = 0$) los perfiles tienden a ser planos en el extremo de la pila, y registran el máximo valor de temperatura en esa posición. Otro aspecto a destacar es que el uso de cobertura aislante registró en promedio para los distintos tiempos y puntos de la masa, una diferencia de $7,3\text{ }^\circ\text{C}$ por encima de los valores registrados en la condición abierta; este valor es similar a la diferencia de $5\text{ }^\circ\text{C}$ reportada por Randle (1983) en la única publicación hallada al respecto (ver capítulo 3).

Hasta aquí el conjunto de datos experimentales y los resultados del modelo presentados tuvieron en cuenta la evolución del proceso hasta momentos antes de realizar el primer volteo del material. A continuación se presenta la validación del modelo incorporando volteos.

c) Perfiles de temperatura a distintos tiempos con aplicación de volteos

En la Figura 7.13 (partes a y b) se muestran dos volteos consecutivos realizados en una misma corrida experimental ($k_G\ 0,0544\ \text{d}^{-1}$, T_{ref} y $T_{s,0}$ $18,3$ y $18,8$

°C, respectivamente), implementados en el marco de un régimen de volteos tipo “B” (frecuentes, a ΔT prefijados).

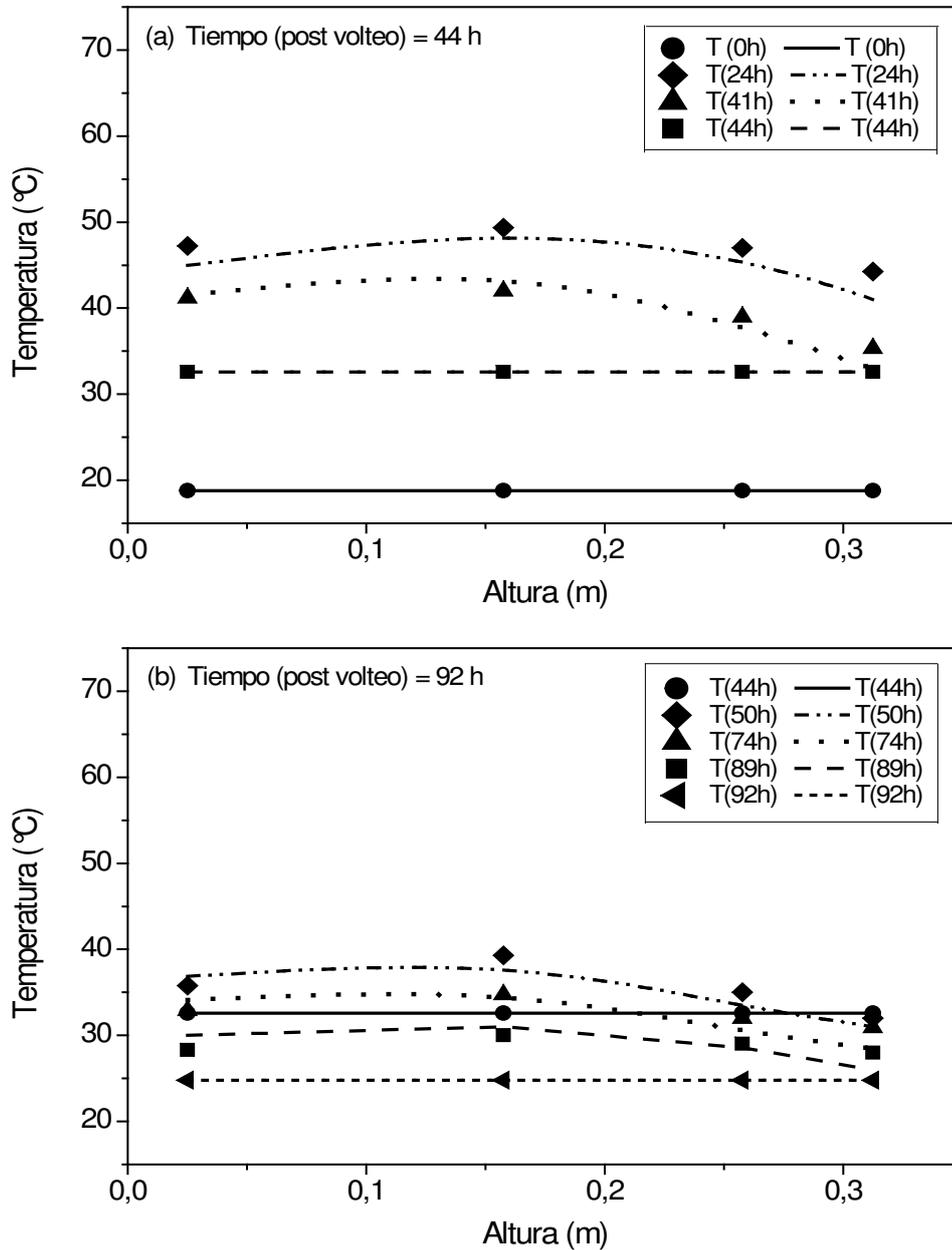


Figura 7.13 Datos simulados (lineas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura con aplicación de volteos a distintos tiempos: (a) hasta 1° post volteo; (b) hasta 2° post volteo. Corrida Exp. N° 27. % Error (promedio): (a) 2,39; (b) 3,17.

Teniendo en cuenta los valores del error reportados (promedio menor al 4 %), puede afirmarse que el modelo logra predecir los datos experimentales que

contemplan la implementación de volteos periódicos.

En la gráfica anterior se constataron los tres efectos del volteo sobre la formación de los perfiles de temperatura, i.e., descenso y homogeneización de la temperatura a un valor de T de post volteo, “reactivación” o incremento de la temperatura post volteo y, finalmente, disminución del impacto causado por los volteos conforme avanza la reacción. En el Apéndice T, Tabla T.1 se presentan más resultados contrastando datos simulados versus experimentales de la evolución de la temperatura ante sucesivos volteos.

d) Validación del BET puntual considerando el conjunto de datos experimentales

Como cierre de esta sección del capítulo, en la Figura 7.14 se graficó el conjunto de datos experimentales con los cuales se validó el modelo y se estimaron los parámetros para los perfiles de temperatura versus los datos simulados correspondientes. Puede observarse la buena concordancia entre los datos experimentales y los valores obtenidos por simulación. Los datos de la regresión lineal se presentan en la Tabla 7.7.

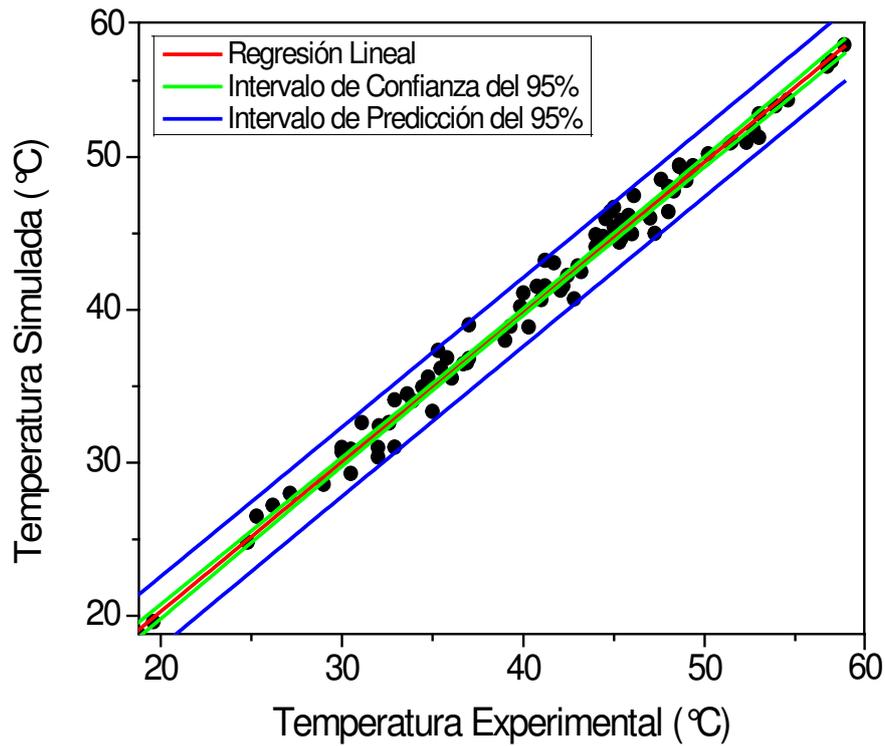


Figura 7.14 Regresión lineal de datos de temperatura puntual simulados versus experimentales.

Tabla 7.7 Resultados de la Regresión Lineal de los valores de temperatura predichos por el modelo versus los datos experimentales (temperatura puntual)

| Parámetro | Valor | Error Estándar | Intervalo de confianza (Límite Inferior) | Intervalo de confianza. (Límite Superior) |
|--------------------|---------|----------------|--|---|
| Pendiente | 0,98056 | 0,01125 | 56,74934 | 57,70678 |
| Ordenada al Origen | 0,64986 | 0,44894 | 18,58948 | 19,57922 |
| R ² | 0,99335 | | | |
| N(*) | 104 | | | |

(*) Número de datos optimizados

7.3.2 BET Integrado: Evolución temporal de la temperatura promedio en el

volumen $\left(\langle T(\underline{x}, t) \rangle_{V_R} = T(t)\right)$

En esta oportunidad se resuelve nuevamente el sistema de ecuaciones del modelo que fuera detallado al comienzo de la sección anterior, pero reemplazando las referidas al BET puntual por las del BET Integrado con su correspondiente condición inicial. En cuanto a los parámetros del modelo, se utilizan los mismos valores que ya fueron estimados y/o fijados previamente, recordando que el único que había quedado libre para su optimización fue el coeficiente U , cuyo valor finalmente optimizado a través del loop de cálculo fue de $14,99 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

La buena correlación entre datos experimentales y resultados de simulación con el modelo calibrado, puede constatarse una vez más con los valores de la raíz del error cuadrático medio relativo porcentual total reportados en la leyenda de cada gráfica, así como también con la regresión lineal de los datos experimentales versus simulados compilados al final de la presente sección.

a) Evolución de la $T(t)$ a distintos valores de k_G

En la Figura 7.15 (partes a y b) se grafican datos experimentales y simulados de la evolución temporal de la temperatura promedio hasta antes de realizar el primer volteo, para distintos valores de k_G .

La buena correlación entre datos queda demostrada en los valores reportados del error (menores al 7 % en ambos casos), resultando como era previsto congruente con lo observado en las Figuras 7.9 y 7.10 cuando se resolvió el BET puntual.

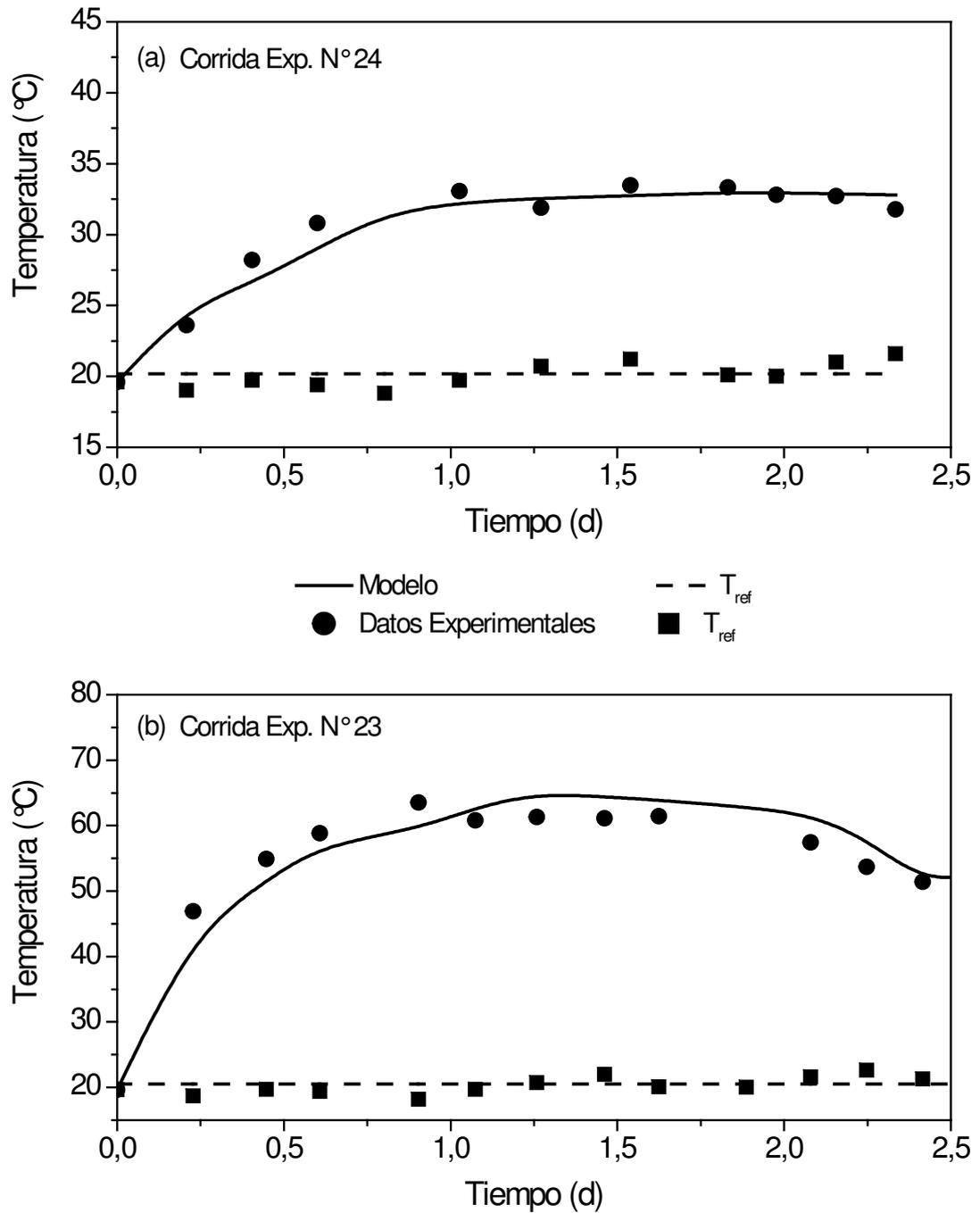


Figura 7.15 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de $T(t)$ a distintas k_G : (a) $0,0165 \text{ d}^{-1}$ (Corrida Exp. N° 24, datos no independientes); (b) $0,0624 \text{ d}^{-1}$ (Corrida Exp. N° 23). % Error: (a) 3,84; (b) 6,78.

b) Evolución de la $T(t)$ incluyendo volteos

En la Figura 7.16 se presentan datos experimentales y simulados de la T promedio obtenidos bajo los dos regímenes de volteos estudiados en esta Tesis: el “tipo A” (realizado a Δt variables y espaciados), y el “tipo B” (a Δt prefijados y más frecuentes); implementados durante los primeros 10 días de proceso y manteniendo el resto de las condiciones de diseño similares (composición sustrato, T_{ref} , humedad).

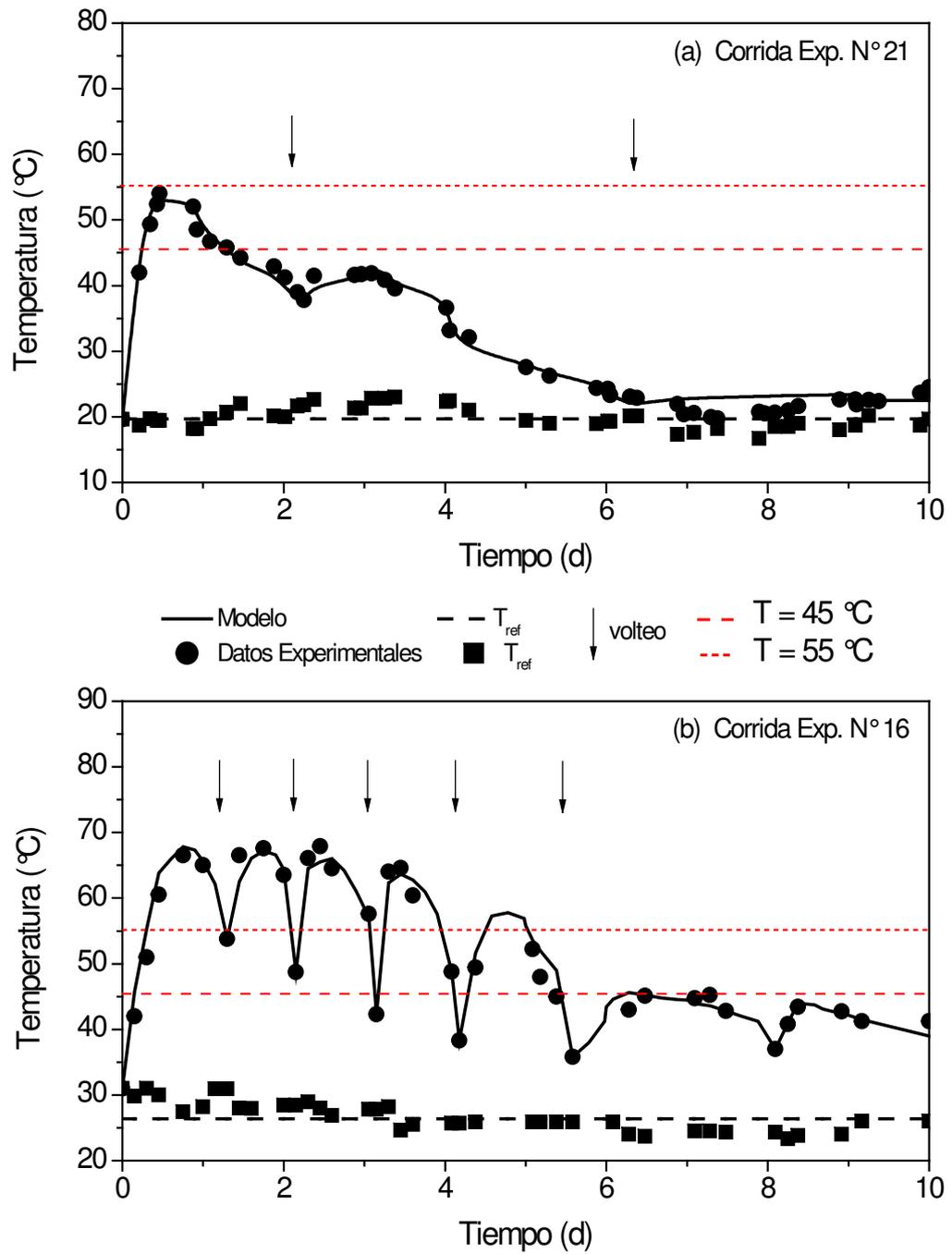


Figura 7.16 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de $T(t)$ considerando distintos regímenes de volteos: (a) Tipo “A”. Corrida Exp. N° 21; (b) Tipo “B”. Corrida Exp. N° 16. % Error: (a) 6,09 ; (b) 5,3.

Puede observarse la buena correlación de los datos expresada en términos del

% de error obtenido (menor al 7 %). De la comparación de ambas gráficas es de destacar:

- En el régimen de volteos tipo A: luego del primer volteo ($t_{\text{volteo}} = 2,3 \text{ d}$) la temperatura se recupera poco (alcanza a subir aproximadamente 4 °C luego del volteo), manteniéndose durante 1,2 d con valores por encima de los 45 °C; después del segundo volteo (realizado recién al sexto día) el sustrato no vuelve a levantar temperatura comenzando un período mesofílico en torno a la temperatura ambiente hasta finalizar la experiencia. El modelo calibrado predijo con buena precisión la temperatura máxima alcanzada (53,2 °C simulada versus 54 °C medida experimental), con una diferencia de 9,8 horas entre el tiempo de ocurrencia simulado versus el experimental, siendo las diferencias entre las T simuladas versus las medidas menores a 3,2 °C con un promedio de 0,47 °C de diferencia.
- Los volteos tipo B denotan una rápida recuperación de la temperatura hasta después del quinto volteo (con aumentos de T entre 13 y 22 °C posterior al volteo), registrando 5,08 d con valores superiores a 45 °C de los cuales 3,4 d registraron valores mayores a 55 °C. El modelo predijo con exactitud el valor de la temperatura máxima alcanzada (67,85 °C simulada versus 67,90 °C experimental), mientras que hubo un desfase de 40,8 horas en el tiempo de ocurrencia. Las diferencias entre las T simuladas versus las medidas resultaron siempre menores a 4,3 °C con un promedio de 2,7 °C de diferencia.

Estos resultados son comparables y se encuentran en el mismo orden de magnitud que los publicados en el trabajo de De Guardia et al. (2012). Estos autores operando con un reactor de 300 L (escala piloto) y aireación forzada (otro sistema de suministro de oxígeno), obtuvieron diferencias para la temperatura media inferiores a 2,5 °C y picos de temperatura máxima con una ocurrencia desfasada en 8 horas, siendo la diferencia entre la temperatura simulada y la medida para la mitad de sus experiencias inferior a 5 °C.

Definiendo como A_{45} al área comprendida entre la curva de $T = T(t)$ y la línea de base a $T = 45\text{ °C}$ (que marca el inicio de la etapa termofílica), y como A_{55} al área comprendida entre la misma curva y la línea de base a $T = 55\text{ °C}$ (de referencia para el control de patógenos), puede inferirse al menos cualitativamente que volteos más espaciados dan lugar a un escaso desarrollo termofílico ($T > 45\text{ °C}$), y no llegan a superarse ni mantenerse temperaturas por encima de los 55 °C que permitan un control adecuado de patógenos (dado que $A_{55} = 0$ para volteos tipo A, parte “a” de la figura). Por su parte, con la aplicación de volteos más frecuentes resulta $A_{45, \text{volteo B}} \approx 9 \cdot A_{45, \text{volteo A}}$, obteniéndose en este caso un período termofílico más extenso y con posibilidades de control adecuado de patógenos ($A_{55} > 0$ y $A_{55, \text{volteo B}} \approx 4,2 \cdot A_{55, \text{volteo A}}$).

Estos resultados junto a los presentados previamente para la validación experimental del modelo en términos del BET puntual (ver sección 7.3.1, apartado c), permiten validar el modelo desarrollado con fundamentos físicos-matemáticos para la modalidad de volteos periódicos como método de aireación, realizando de este modo un aporte substancial dentro de un área del modelado del proceso hasta la fecha poco

explorada.

c) Evolución de la $T(t)$ a distintas humedades iniciales

Considerando datos experimentales y salidas del modelo en términos de la T promedio en el volumen, obtenidos bajo condiciones que se diferencian únicamente en el contenido de humedad inicial en el sustrato, se obtuvieron como resultados los que se presentan en la Figura 7.17:

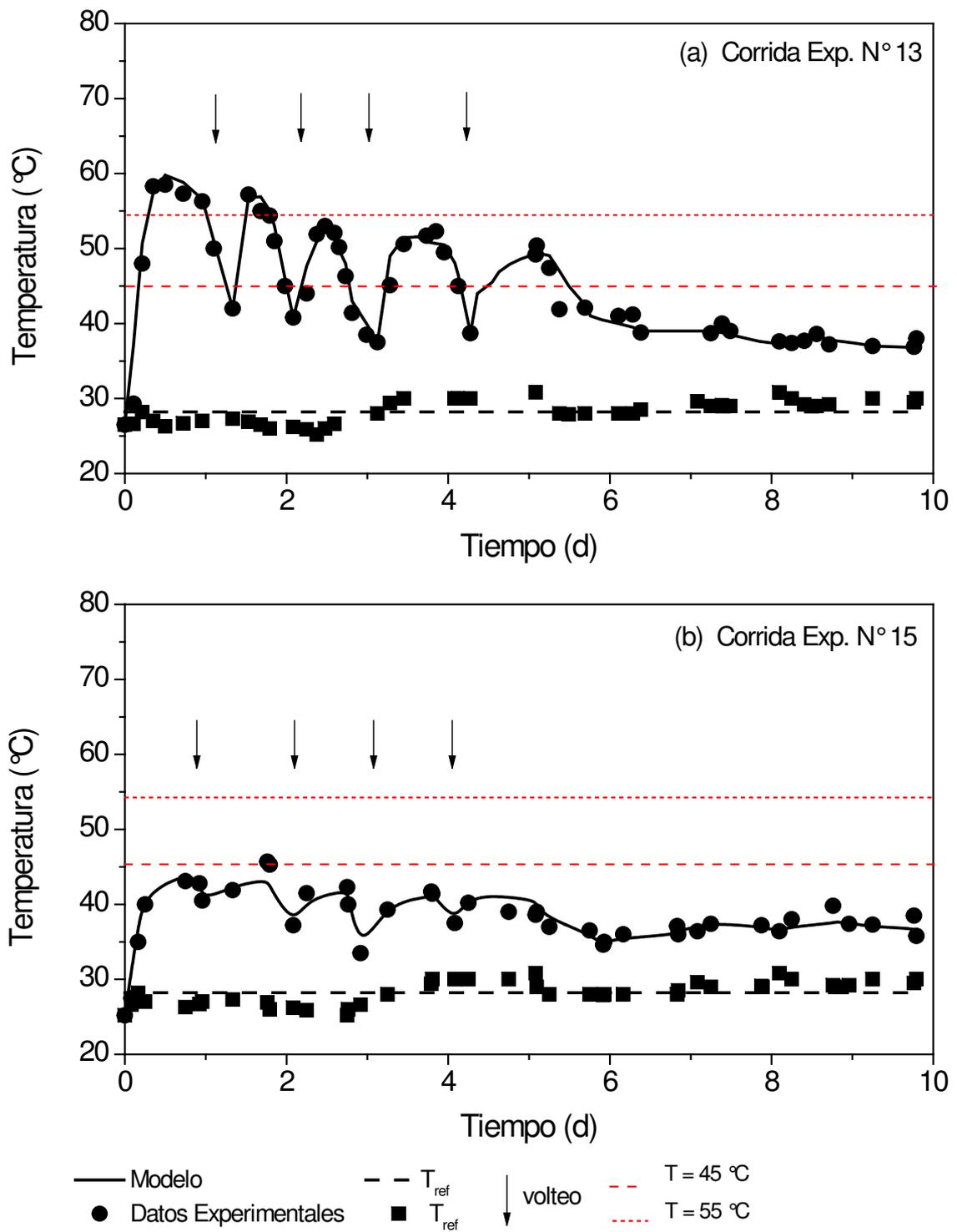


Figura 7.17 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de $T(t)$ considerando distintas humedades iniciales: (a) 69,9 %. Corrida Exp. N° 13; (b) 82 %. Corrida Exp. N° 15. % Error: (a) 6,04 ; (b) 3,47.

En la figura anterior puede apreciarse junto a la buena correlación de los datos simulados versus experimentales ($\%$ de error estimado menor al 7 $\%$), el efecto de la humedad del sustrato sobre el desarrollo térmico del proceso. A igual generación de calor y condiciones de contorno, un mayor contenido de humedad puede asociarse a mayores pérdidas de calor ya sea para calentar la masa de agua contenida y/o evaporar parte de ella. Por el contrario, menores $\%$ de humedad (siempre dentro de rangos adecuados para el proceso), permiten disponer de una mayor proporción de la energía generada para incrementar la T en el sustrato y sostenerla en rangos termofílicos. En tal sentido, por ejemplo para la experiencia con humedad del 66,9 $\%$, la T_{\max} medida fue 58,5 $^{\circ}\text{C}$ (y 59,8 $^{\circ}\text{C}$ la simulada), mientras que con 82 $\%$ de humedad la T_{\max} medida fue 45,7 $^{\circ}\text{C}$ (y 43,4 $^{\circ}\text{C}$ con el modelo). Estos efectos se ven reflejados comparando en cada gráfica los valores de A_{45} y A_{55} definidos previamente, que confirman que contenidos de humedad elevados reducen no solo las posibilidades de control de patógenos ($A_{55,82\%H_2O} = 0$), sino también el desarrollo de temperaturas dentro del rango termofílico ($A_{45,82\%H_2O} = 0$), por los motivos antes mencionados.

d) Evolución de la $T(t)$ a distintas geometrías de pilas

En la Figura 7.18 se comparan datos simulados y experimentales de la temperatura promedio en el volumen, obtenidos variando únicamente la forma de la pila ubicada dentro del reactor, considerando tres geometrías: rectangular, semicilíndrica y triangular; manteniendo el resto de las condiciones de diseño y operación (k_G , $C_{S,0}$, $C_{S,e}$, $C_{H_2O,0}$, $T_{S,0}$, T_{ref} , condiciones de contorno y régimen de volteos) similares.

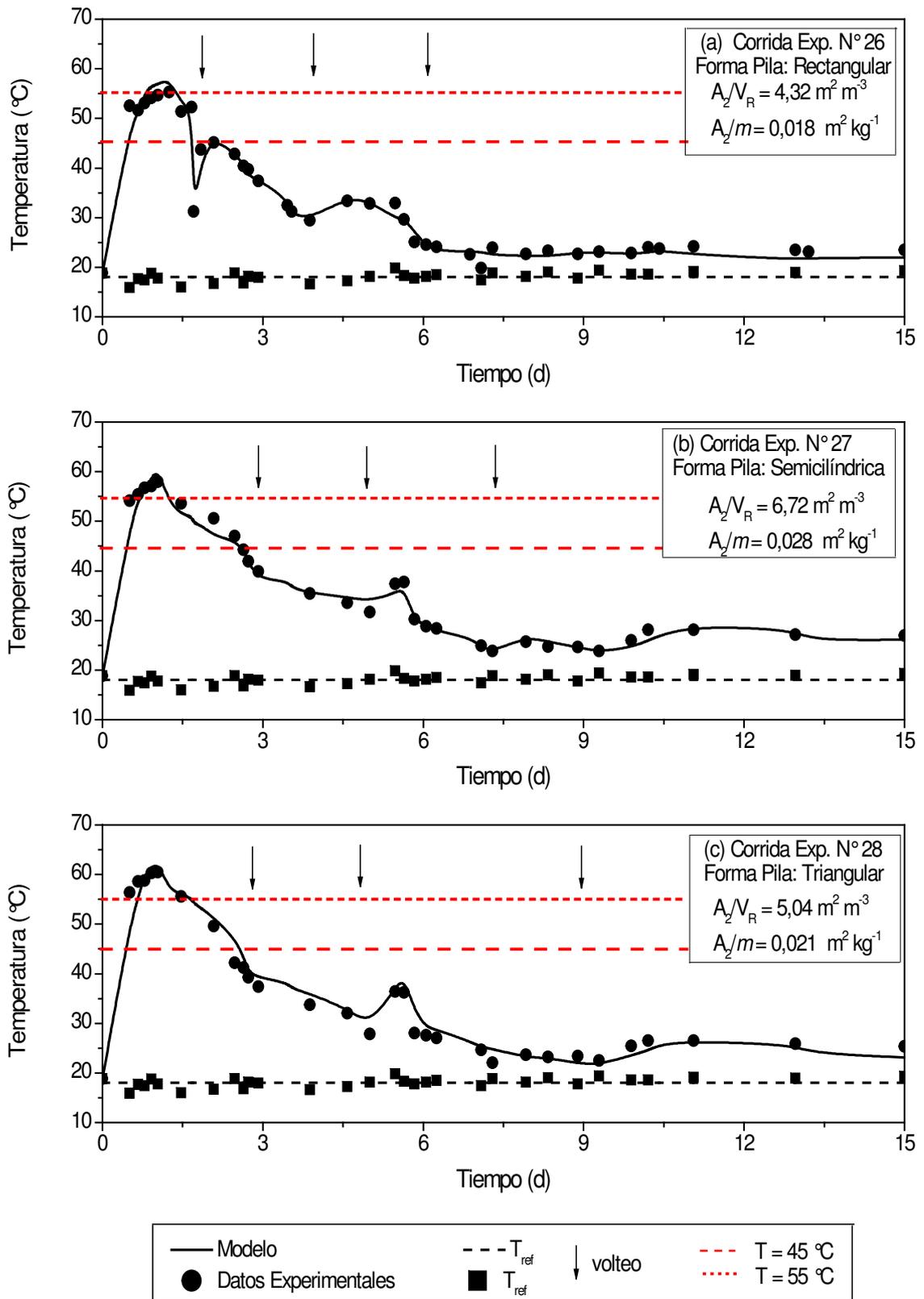


Figura 7.18 Datos simulados vs. experimentales de la evolución de $T(t)$ considerando distintas geometrías de pilas: (a) rectangular. Corrida Exp. N° 26 (datos no independientes); (b) semicilíndrica. Corrida Exp. N° 27; (c) triangular. Corrida Exp. N° 28. % Error: (a) 4,88 ; (b) 3,96 y (c) 6,63.

Para las tres formas geométricas de pila estudiadas, puede constatarse que el modelo predice con buena precisión los datos experimentales de temperatura promedio, teniendo en consideración una vez más los valores del error informados (situados en el rango de 3,96 a 6,63 %).

Como puede observarse, no existe una diferencia apreciable en cuanto a la evolución de la variable simulada/medida entre una forma y otra de la pila. Considerando el área superficial expuesta al ambiente, ya sea en términos de la relación A_2/V_R o su equivalente A_2/m (valores en las gráficas), que condiciona las pérdidas de calor superficial, para un mismo volumen de material nuevamente no se observan diferencias significativas (por ejemplo, el desvío estándar entre dichos valores resultó 1,231 % y la varianza $2,633 \cdot 10^{-5}$). Lo mismo ocurre si se toman en cuenta las áreas A_{45} y A_{55} , que cualitativamente resultan aproximadamente similares para el período representado. Estas observaciones permiten inferir que la “forma geométrica” de una pila por sí sola no determina una mayor o menor eficiencia térmica del sistema, ya que si se mantienen similares las condiciones de generación y pérdida de calor, el comportamiento térmico resulta equivalente, tal como lo predijo el modelo.

e) Validación del BET integrado considerando el conjunto de datos experimentales

En la Figura 7.19 se representa el conjunto de datos experimentales con los que se validó y estimaron los parámetros del modelo conteniendo al BET integrado, versus los datos simulados correspondientes. En ella se puede observar la buena concordancia entre los datos experimentales y los valores obtenidos por simulación.

Los datos de la regresión lineal se exponen en la Tabla 7.8.

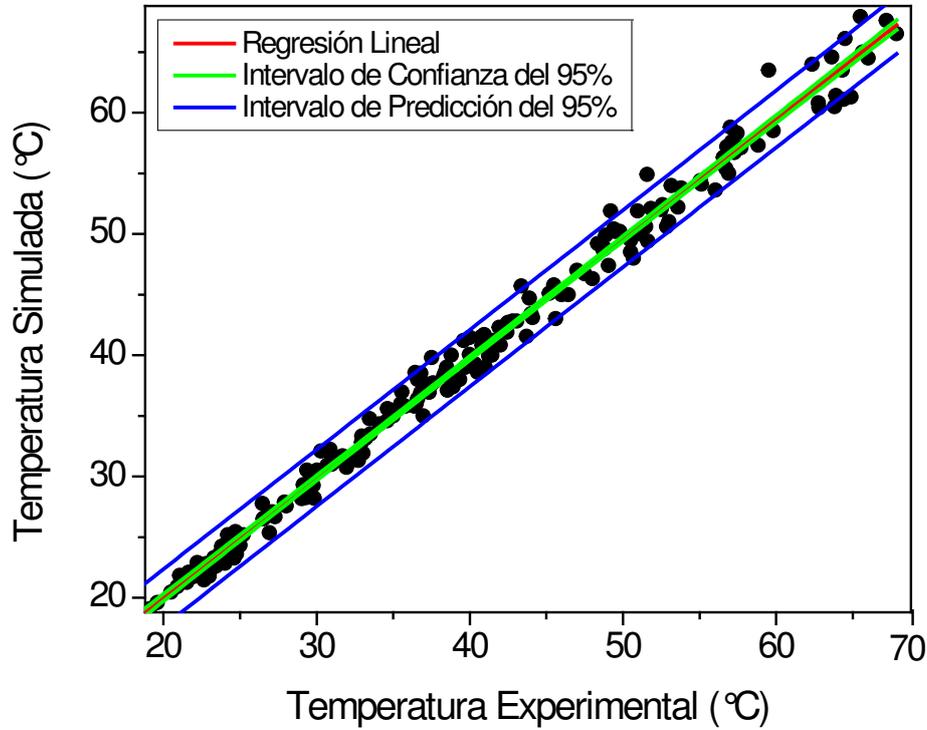


Figura 7.19 Regresión lineal de datos de temperatura promedio simulados versus experimentales.

Tabla 7.8 Resultados de la Regresión Lineal de los valores de temperatura predichos por el modelo versus los datos experimentales (temperatura promedio)

| Parámetro | Valor | Error Estándar | Intervalo de confianza. Límite Inferior | Intervalo de confianza. Límite Superior |
|--------------------|---------|----------------|---|---|
| Pendiente | 0,98671 | 0,00654 | 66,82607 | 67,63336 |
| Ordenada al Origen | 0,27928 | 0,27172 | 18,51438 | 19,14458 |
| R ² | 0,99585 | | | |
| N(*) | 192 | | | |

(*) Número de datos optimizados

7. 4 TERCER BLOQUE: Aplicaciones varias de interés con el modelo calibrado y validado experimentalmente

En este tercer y último bloque del capítulo, para completar la presentación y discusión de los resultados de esta Tesis, se exponen un compendio de simulaciones realizadas con el modelo ya calibrado y verificado experimentalmente, considerando situaciones de interés en relación a la práctica del compostaje, a fin de evaluar la potencialidad de aplicación de la herramienta de modelado desarrollada.

Por ejemplo, se presentan simulaciones con condiciones de cambio de escala, buscando inferir el comportamiento de una pila compostando bajo diferentes situaciones, tales como con distintas velocidades de viento, diferentes contenidos de humedad como puede suceder en el caso de un evento de lluvia, y utilizando o no cobertura aislante. También se presentan los resultados del modelo que predicen para un dado formato de pila, cuál es la altura óptima que minimiza el área expuesta de intercambio y reduce las pérdidas de calor por convección superficial, así como la frecuencia de volteos que optimiza el desarrollo termodinámico de una pila.

Como puede observarse, todos estos casos de aplicación han sido especialmente seleccionados con el interés final de poder evaluar la capacidad y *expertise* de la herramienta desarrollada en esta Tesis para el estudio del compostaje, esperando así alcanzar los objetivos iniciales fijados para este trabajo.

Por ultimo mencionar que en algunas figuras se incluyen datos experimentales ya previamente utilizados, a los fines de poder ilustrar un ejemplo de éstos en el marco de las aplicaciones del modelo realizadas.

7.4.1 Distribución espacial y temporal de la temperatura ($T \equiv T(\underline{x}, t)$)

a) Perfiles de temperatura a distintos tiempos y distintas k_G

La interacción compleja de distintos fenómenos que tienen lugar durante el proceso de compostaje queda expuesta en la Figura 7.20, donde se comparan datos del modelo simulados con distintas k_G variando a su vez valores de los parámetros h_1 , h_2 y k_s , que definen los flujos térmicos en el interior así como en la frontera de la pila expuesta al ambiente circundante.

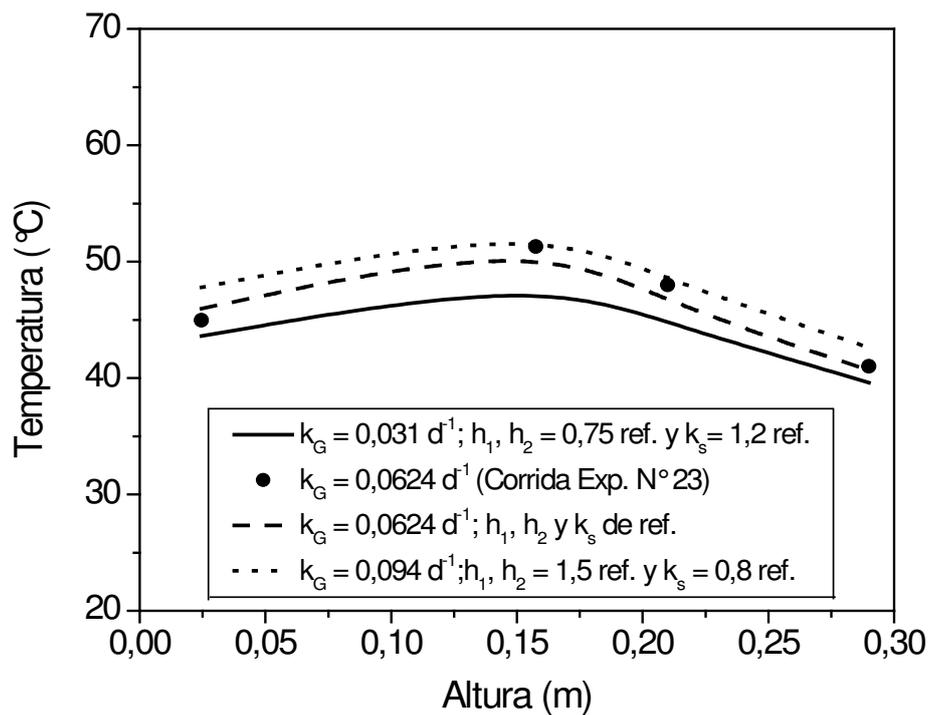


Figura 7.20 Datos simulados (líneas) vs. experimentales (símbolos) de perfiles de temperatura para tiempo de proceso de 45 h y distintos valores de k_G , h_1 , h_2 y k_s . Datos Corrida Exp. N° 23.

En la figura anterior puede observarse que los resultados simulados no expresan un aumento lineal de la temperatura directamente asociado al aumento en la energía térmica generada (tal como se constató en las Figuras 7.9 y 7.10 del bloque anterior), ya que también se ven alterados en forma no lineal los flujos térmicos que se transforman en calor perdido al llegar a la interfase, cuando se producen cambios en las condiciones de contorno, denotando la relevancia que poseen estos parámetros de transporte térmico que caracterizan a un dado sistema.

Sin entrar en detalles en este aspecto puede observarse que, por ejemplo, cuando se aumentan los valores de h_i y k_s , pese a tener una k_G alta (y consecuentemente elevada generación de calor), las pérdidas de calor superficial aumentan y la temperatura no experimenta el incremento esperado (línea de puntos de la figura). Al mismo tiempo, cuando estos parámetros se modifican en sentido contrario, el calor generado asociado a una menor k_G se conserva (menores pérdidas de calor superficial), de manera que los perfiles de temperatura resultantes pueden equipararse a los obtenidos con k_G mayores (línea continua).

b) Perfiles de temperatura a distintos tiempos y distintas condiciones de contorno

Considerando ahora el “Hot Point” del reactor, puede observarse como, para un mismo tiempo de proceso ($t = 45$ h), este punto se desplaza en función de distintos valores de h_i (Figura 7.21) o de k_s (Figura 7.22).

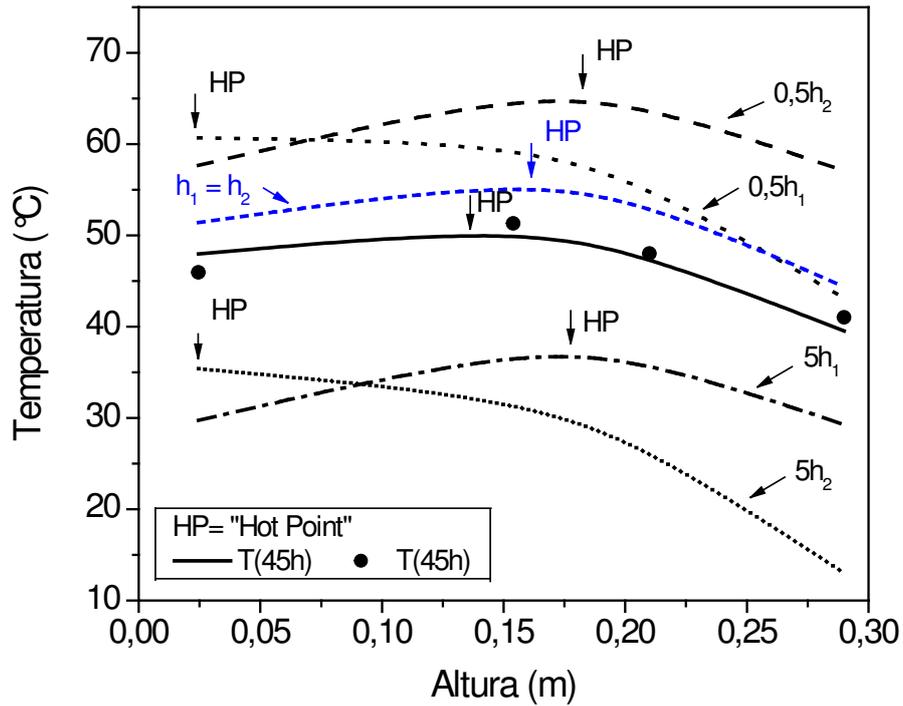


Figura 7.21 Desplazamiento del “Hot Point” dentro de la masa en función de distintos valores de h_1 y h_2 . Datos Corrida Exp. N° 23 (perfil de temperatura a $t = 45$ h de proceso).

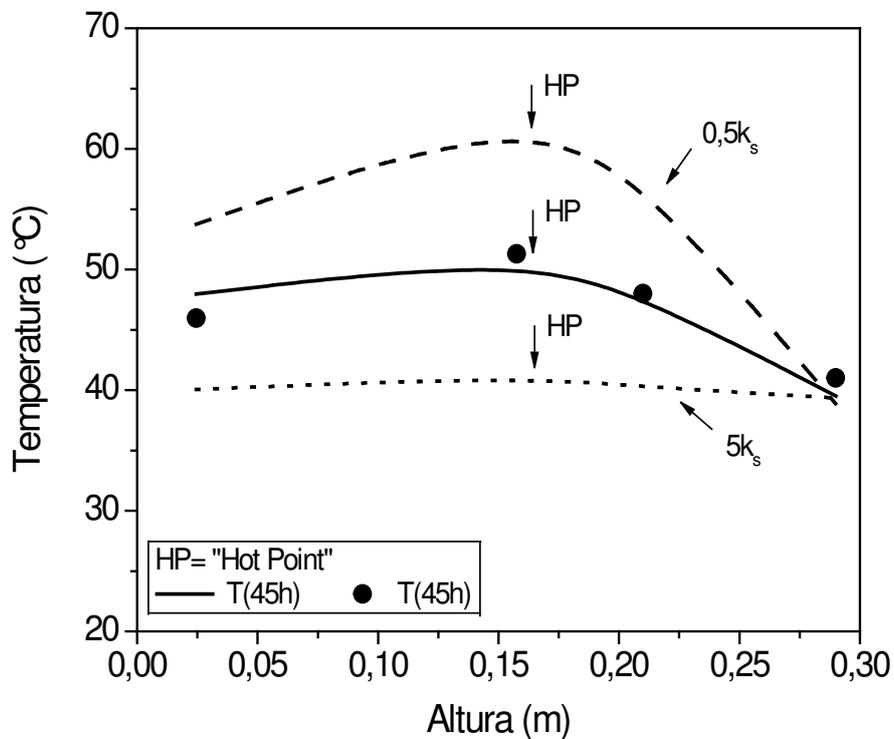


Figura 7.22 Desplazamiento del “Hot Point” en función de distintos valores de k_s . Datos Corrida Exp. N° 23 (perfil de temperatura a $t = 45$ h de proceso).

En la primera figura se observa como el punto de mayor temperatura se desplaza desde la simetría central (en azul, caso $h_1 = h_2$) tanto lateral como verticalmente en función de los valores que tomen los coeficientes de transmisión pelicular de calor h_1 (en la base de la pila) y h_2 (en el extremo superior de ésta). Debe recordarse que una disminución en el valor de alguno de éstos resulta en un incremento en la magnitud de la temperatura en todo el perfil, y si se mantiene constante la T_{ref} , se profundizan los gradientes de temperatura y flujo de calor hacia el exterior en el extremo opuesto; se cumple lo contrario a la inversa.

Por su parte, en la Figura 7.22 se observa un desplazamiento del “hot point” en el sentido vertical respecto de una posición de referencia (datos experimentales simulados). Al reducir el valor de k_s , el calor generado por la reacción se concentra en el centro de la pila y se transfiere menos hacia otros puntos de la masa ya que encuentra mayor resistencia en el medio (línea de trazos en la figura), mientras que ocurre lo opuesto si k_s aumenta (ver el “aplanamiento” del perfil de temperatura representado en líneas de puntos).

Por último debe señalarse que los parámetros del modelo que definen y representan las condiciones de contorno y propiedades del material, no son meramente teóricos, ya que en la práctica pueden estar representados por el viento, el uso o no de cobertura impermeable sobre la pila, la proporción de componentes inorgánicos y humedad presentes en el material, etc.. Por lo tanto, conociendo su efecto se podría intervenir en el sistema realizando las modificaciones necesarias para lograr el efecto térmico deseado sobre la pila, a fin de cumplimentar, por ejemplo, determinadas condiciones de reducción de patógenos y calidad del producto final (compost).

7.4.2 Evolución temporal de la temperatura promedio en el volumen

$$\langle T(\underline{x}, t) \rangle_{V_R} = T(t)$$

Para ilustrar con un ejemplo el efecto del viento, se aplicó en el modelo la siguiente expresión de cálculo de h_i publicada en el trabajo de Moraga et al. (2009):

$$h_i = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad [7.2]$$

donde v es la velocidad del viento en $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ y h_i está dado en $(\text{W m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$. Considerando que el viento impacta en el extremo superior de la pila con velocidades entre 0 y 7 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, y que los terrenos pueden ser desde planos (asociados al menor valor de v), hasta valles estrechos y montañosos (máximo valor considerado), se obtiene el siguiente efecto sobre la temperatura máxima registrada en la pila:

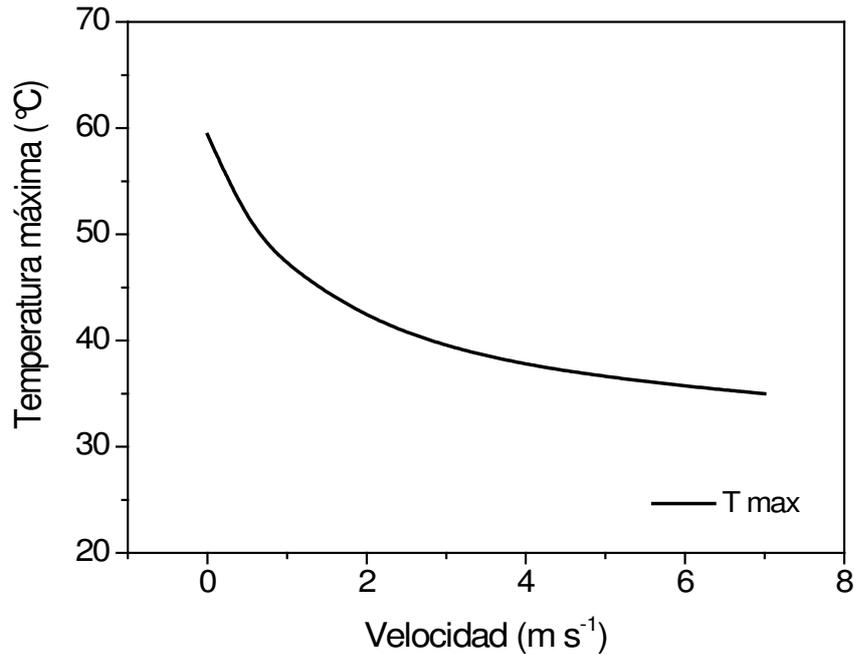


Figura 7.23 Efecto de la velocidad del viento sobre la temperatura máxima alcanzada en una pila, utilizando valores de h_i de Moraga et al. (2009).

Esta aplicación del modelo permite predecir la incidencia del viento y muestra que a mayor velocidad, menor es la temperatura máxima que se alcanza en la pila, resultando en valores entre 59,4 °C ($v = 0$) y 35 °C (máxima velocidad). En Tabla R.1 del Apéndice R puede consultarse para el rango de velocidades analizado, los valores de h_i calculados, y los resultados de simulaciones de otros indicadores tales como el tiempo durante el cual $T > 45$ °C (duración etapa termofílica) y $T > 55$ °C (control de patógenos).

Si bien el ejemplo anterior es solo ilustrativo, pone de manifiesto el poder predictivo del modelo en términos del efecto de la ocurrencia e intensidad del viento sobre el desarrollo de la temperatura en una pila. Dicha aplicación podría resultar muy

útil como herramienta de diseño y de gestión en plantas de compostaje localizadas en sitios donde el viento tiene un papel importante, a fin de evaluar la implementación de medidas que minimicen su incidencia negativa sobre el proceso.

c) Perfiles de temperatura a distintos tiempos con aplicación de volteos

Una pregunta muy frecuente en relación a la práctica de volteos periódicos, ampliamente utilizada como metodología de aireación dentro del compostaje y que ha sido estudiada en esta Tesis es, cada cuanto se debe voltear una pila si se pretende, por ejemplo, alcanzar un desarrollo térmico que genere la mayor degradación en el menor tiempo posible, y se obtenga un compost libre de patógenos.

Para responder a este interrogante, con la totalidad de los parámetros estimados y una vez validado el modelo, se procedió a realizar simulaciones variando la frecuencia en la implementación de los volteos, reiniciando el programa luego de la ocurrencia de cada uno, y extrayendo de cada simulación la T máxima alcanzada como indicador. Con los resultados obtenidos se construyó la siguiente gráfica:

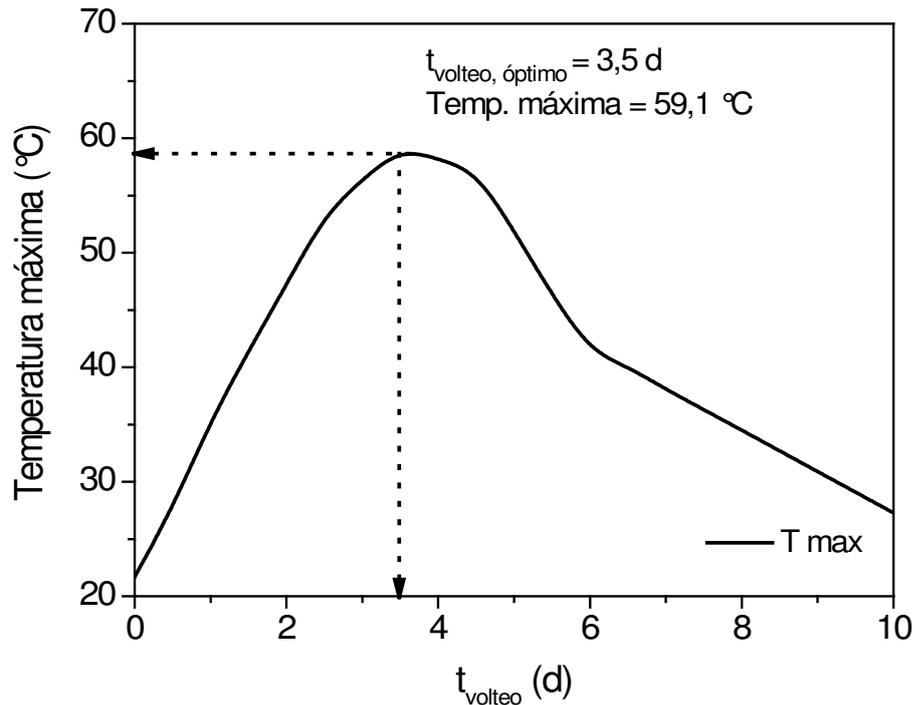


Figura 7.24 Datos simulados de T_{\max} en función del tiempo de volteo: determinación del t_{volteo} óptimo asociado a la mejor performance del proceso.

De acuerdo a las salidas del modelo, el tiempo óptimo de volteo es de 3,5 días, por lo tanto mezclando el material según este tiempo de volteo se obtiene el mejor desarrollo térmico (T_{\max} igual a 59,1 °C). Al respecto, es necesario realizar algunas consideraciones. Por un lado, si bien con esta aplicación se pudo observar que el modelo permite predecir el tiempo óptimo de volteo, no brinda información respecto de la duración de los mismos ni durante cuánto tiempo se debe mantener dicha frecuencia. Por otro lado, en este análisis solo se tuvo en cuenta la T_{\max} como único indicador de la eficiencia del proceso, por lo que para mejorar las conclusiones deberían incluirse en el análisis un set de indicadores definidos *ad-hoc* (como los mencionados en el capítulo 2), que consideren otros aspectos relevantes como la

conservación de nutrientes, la reducción másica alcanzada, la duración de la etapa termofílica, etc.

d) Evolución de la $T(t)$ a distintas geometrías de pilas

En la Figura 7.25 se presenta una aplicación del modelo donde se observa, para una dada forma geométrica de la pila (triangular en este caso) y volumen de material, la relación existente entre A_2/m y la temperatura máxima (parte “a” de la figura), y su equivalente en términos de altura de la pila (parte “b” de la figura), y también se determina la altura óptima de la pila en dichas condiciones, que son detalladas en la leyenda de la gráfica.

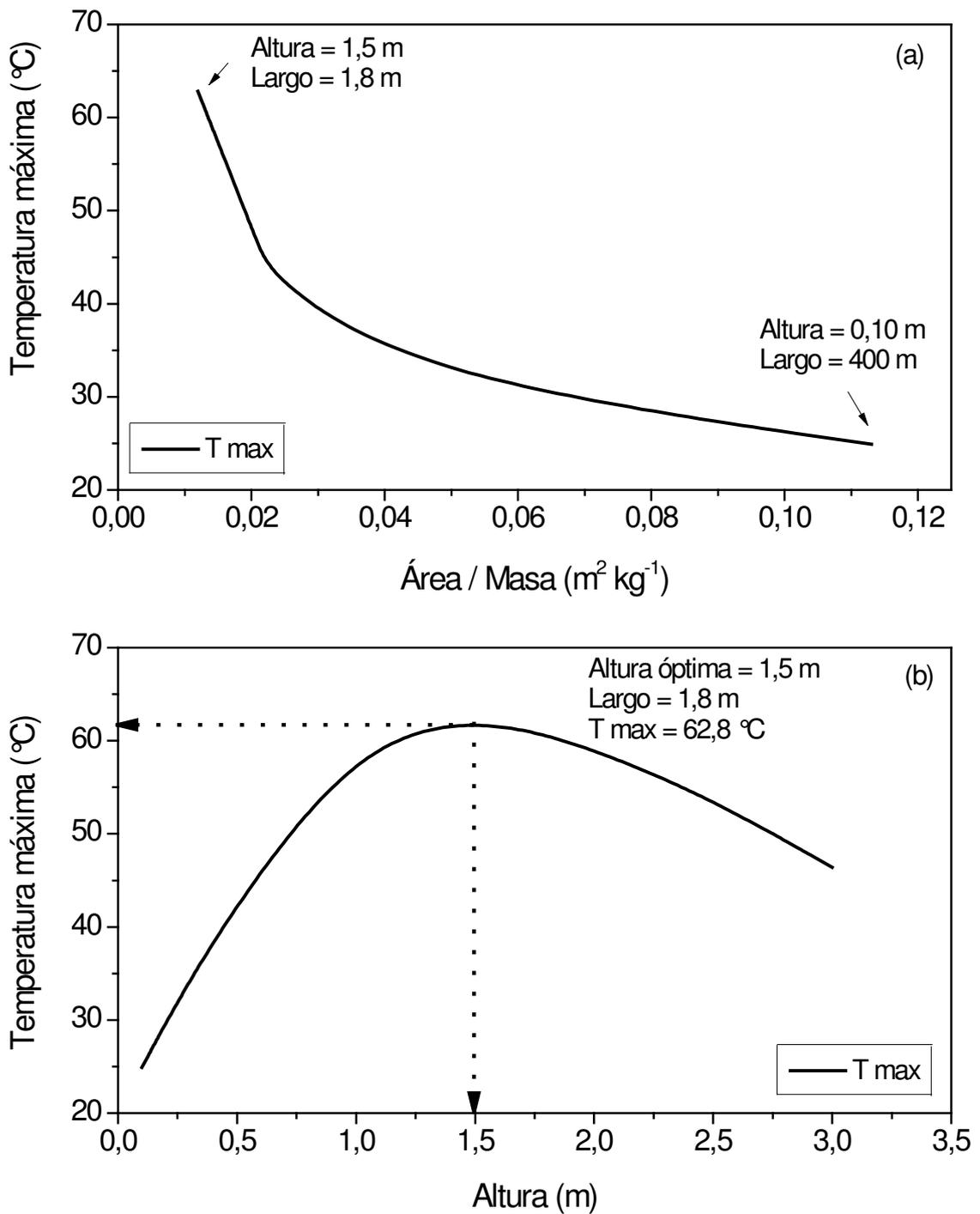


Figura 7.25 Datos simulados de T máxima en función de: (a) coeficiente A_2 / m ; (b) altura de la pila. Condiciones de simulación: Geometría de la pila = triangular; Masa RSO = 1000 kg (b.h.); Densidad = 250 kg m^{-3} ; Relación Base/Altura pila = 2/1.

Con este sencillo ejemplo puede constatarse como, para una forma dada de la pila y volumen de sustrato a compostar, a mayor área por unidad de masa expuesta al ambiente la temperatura máxima promedio disminuye, al tiempo que es posible determinar una altura óptima que minimice el área superficial y reduzca las pérdidas de calor asociadas a ésta. Estos resultados se corresponden con una de las conclusiones del trabajo de Moraga et al. (2009), que afirmaba que la altura de la pila es un parámetro importante que afecta los procesos de calentamiento del material.

Este desarrollo permite responder la pregunta de si impacta la *forma geométrica* sobre la eficiencia del compostaje, entendida en términos de la evolución térmica de la pila. Si se contempla únicamente este parámetro, la respuesta claramente es no y, como se demostró con los resultados de simulación precedentes, se deben considerar variaciones en la relación A_2/m o A_2/V_R . En otras palabras, si lo que se pretende es optimizar la eficiencia del proceso en términos de un mayor rendimiento térmico, la pregunta debería ser: ¿cuál es la forma geométrica que minimiza el área superficial por unidad de masa o de volumen?

7.5 Consideraciones finales

Del total de parámetros incluidos en el modelo (ver Tabla 5.2 al final del capítulo 5), en el presente capítulo se estimaron en forma óptima mediante el método numérico desarrollado y a partir de un primer paquete de datos experimentales, aquellos que quedaban “libres” (k_G , k_S , U , h_1 , h_2 , ΔH_{rxn} y x_{evap}), obteniéndose como resultado un único set de valores óptimos de parámetros, salvo para el caso de la pseudo constante de degradación (k_G), que como se mencionó antes debe aplicarse en las

simulaciones la estimada a cada corrida experimental. También en este primer bloque se definieron los restantes parámetros del modelo. Estos se tratan más bien de propiedades y/o coeficientes físicos, estequiométricos o termodinámicos, cuyos valores fácilmente se pueden obtener de los libros y manuales de ingeniería (tal es el caso de c_{P,H_2O} , $c_{P,s}$, $C_{O_2,0}$ y de los calores latentes L_v y L_c), o se pueden medir directamente (como la T_{ref} y las dimensiones b , l , H y R de una pila), o calcular en forma directa (como b_{H_2O} y $C_{s,e}$), y/o determinarse o medirse en ensayos experimentales sencillos (A_n , V_R y las condiciones iniciales T_0 , $C_{s,0}$ y $C_{H_2O,0}$).

En el segundo bloque del capítulo se validó experimentalmente el modelo previamente calibrado, y quedó demostrado que era capaz de predecir con buena precisión un segundo conjunto de datos experimentales, generados bajo un variado espectro de condiciones de diseño y operación iniciales. Esto pudo evidenciarse tanto en los valores reportados de la raíz del error promedio porcentual total (que resultó siempre menor al 10 %), así como con los resultados de la regresión lineal realizada en cada caso con el conjunto de datos medidos y simulados considerados.

En el tercer y último bloque de este capítulo, con el modelo ya calibrado y validado experimentalmente, se realizaron simulaciones con aplicaciones de interés considerando condiciones de cambio de escala, en las que se pudo inferir el comportamiento de una pila compostando bajo diferentes situaciones (por ejemplo, con distintas velocidades de viento, diferentes contenidos de humedad por efecto de una lluvia, y utilizando o no cobertura aislante superior). También se pudo predecir para un dado formato de pila, la altura óptima que minimiza el área expuesta de intercambio y reduce las pérdidas de calor por convección superficial, y la frecuencia de volteos que optimiza el desarrollo termodinámico de una pila.

Con todo lo desarrollado en este capítulo 7, junto a lo presentado en los dos predecesores (tanto el capítulo 5 de modelado del proceso, y el 6 de resolución y análisis de sensibilidad del modelo), se considera que se cumplieron todos los pasos necesarios que permiten fundamentar la utilidad y versatilidad de la herramienta de modelado del compostaje desarrollada en esta Tesis, como uno de sus productos principales.

Así mismo, se expusieron en este trabajo en pos de obtener herramientas sencillas y de fácil aplicación, las limitaciones que ésta presenta, dejando en claro que si bien durante la fase experimental de esta Tesis se llevaron a cabo ensayos con distintas condiciones que permitieron validar el modelo, el sistema de ecuaciones que lo compone no incorpora en su cinética dependencias funcionales con variables o parámetros del proceso tales como la humedad inicial, relación C/N , entre otros; ya que excedían los objetivos de esta Tesis, dejándose como posibles objetos para futuros trabajos.

Capítulo 8

Conclusiones y

Perspectivas

Futuras

Capítulo 8: Conclusiones y Perspectivas Futuras

El compostaje o *digestión aerobia* se ha posicionado en los últimos años como una tecnología muy conveniente para el tratamiento de una amplia variedad de residuos sólidos orgánicos (RSO). Desde el punto de vista ingenieril, representa un proceso de extrema complejidad en cuanto al sistema físico, químico y microbiológico involucrado. En las últimas décadas distintos grupos de investigación han abordado su modelado con distintos grados de aproximación y precisión, utilizando en la mayoría de los casos para la validación y verificación experimental de los modelos, dispositivos diseñados a escala laboratorio y/o piloto que operan en condiciones totalmente controladas (de difícil extrapolación a casos reales), y que aplican aireación forzada para la incorporación y renovación del oxígeno dentro del sistema.

En este trabajo de Tesis se planteó como objetivo desarrollar y verificar experimentalmente herramientas de modelado y de simulación del proceso de compostaje de RSO, asumiendo como técnica de aireación la de volteos periódicos manuales, escasamente estudiada hasta el momento, a pesar de que el sistema con volteos es uno de los más utilizados a nivel mundial.

Para alcanzar este objetivo, se propusieron y llevaron a cabo las siguientes actividades principales:

1) Para la fase experimental:

- Diseño de un reactor a escala laboratorio que permitiera estudiar el proceso en condiciones semicontroladas, bajo diferentes configuraciones de operación, y aplicando la metodología de aireación

propuesta. Específicamente, que permitiera trabajar en condiciones de intercambio calórico permanente con el sistema circundante (sistemas abiertos) o con bloqueo del mismo (cobertura superior aislante), con distintas masas y condiciones de sustrato iniciales (en cuanto a composición y humedad), y con diferentes regímenes de volteos y formas geométricas de la pila;

- Formulación del sustrato a degradar a partir de combinaciones de RSO previamente seleccionados (residuos de comida, estiércol equino, residuos de poda y paja de trigo chipeada), que permitieran ajustar las condiciones iniciales de relación C/N, humedad y características de estructura y porosidad;
- Planificación y ejecución de un set de corridas experimentales para la obtención de datos confiables para la verificación y ajuste del modelo.

2) Para el modelado y simulación del proceso:

- Propuesta de una cinética de pseudo-primer orden para la degradación del sustrato y una función semi-empírica para modelar el efecto del oxígeno sobre dicha cinética;
- Formulación sobre la base de fundamentos químicos y físicos, de balances de materia (BM) y balances de energía térmica (BET) para el sistema en estudio, incorporando la cinética de degradación propuesta;
- Resolución del set o “sistema de ecuaciones de trabajo” que conforma el modelo, mediante la aplicación de dos programas computacionales desarrollados *ad-hoc*, uno basado en el método numérico de Diferencias

Finitas, y otro en el de Runge-Kutta-Fehlberg de 4to. y 5to. orden de precisión;

- Comparación de los resultados del modelo (simulaciones) con los obtenidos experimentalmente, y estimación y ajuste de parámetros “libres” del modelo;

El modelo propuesto, calibrado y validado experimentalmente permitió estudiar los fenómenos claves de transporte de energía térmica que tienen lugar durante el proceso, especialmente aquellos ocurridos durante la fase inicial del mismo (térmicamente más activa).

Como variables de salida, además de la evolución temporal promediada en el volumen de la concentración de los sólidos totales y del contenido de agua, con el BET puntual se obtuvo la distribución espacio-temporal de la temperatura ($T(\underline{x}, t)$), mientras que con el BET integrado la temperatura promediada en el volumen ($T(t)$). El BET puntual permitió identificar, para distintas geometrías de pilas, el efecto de distintas condiciones iniciales y de contorno sobre la localización de los “puntos calientes y fríos” dentro de la masa, la formación de gradientes de temperatura y flujos de calor tanto en el interior de la pila como a través de su interfase (o superficie de intercambio calórico) hacia el medio que lo rodea. El BET integrado, por su parte, permitió inferir sobre la ocurrencia y los efectos de fenómenos termodinámicos que tienen lugar durante el proceso a nivel global.

De los resultados obtenidos, es posible concluir que:

1. El modelo propuesto permite predecir con buena precisión los datos experimentales obtenidos bajo un amplio rango de condiciones de diseño y operación del sistema estudiado;
2. El modelo reproduce la evolución esperada de la degradación de la materia orgánica tanto a tiempos de procesos cortos (fase térmicamente más activa, con una línea recta pendiente decreciente) como largos (proceso completo incluyendo etapas posteriores mesofílicas y de curado, con una exponencial negativa);
3. Mediante simples modelos y experimentos es posible obtener valores de la concentración de equilibrio ($C_{s,e}$) que caracteriza a cada sustrato;
4. El modelo confirmó que si bien las constantes cinéticas a “tiempos largos” permiten calcular la porción “resistente”, no representan en forma adecuada los períodos térmicamente más activos del proceso, que en definitiva son los que resultan ser de mayor interés para el diseño y dimensionamiento de los sistemas de compostaje, sucediendo lo mismo a la inversa.
5. El modelo reproduce los efectos esperados de la constante global de pseudo-primer orden (k_G) sobre la evolución temporal de variables simuladas como el contenido de sólidos totales (C_S), de agua en el sustrato (C_{H_2O}) y de la temperatura (T). Se observó, por ejemplo, que manteniendo en el modelo el resto de condiciones y parámetros fijos, para el caso de sistemas abiertos con evaporación y sin adición externa de agua, la evolución

temporal de C_{H_2O} es inversamente proporcional al valor de k_G

;

6. Se demostró que la relación C/N , uno de los parámetros más utilizados en la bibliografía para caracterizar el sustrato, no es suficiente por sí mismo para predecir su potencial degradación. En cambio, los efectos combinados de la frecuencia de aireación, estructura, el balance y biodisponibilidad de nutrientes (estos últimos caracterizados en parte por el contenido de Lignina total del material), determinarían finalmente “cuanto” de lo posible a degradar, “efectivamente” se degrada.
7. Parámetros térmicos como el coeficiente de transmisión pelicular de calor (h_1 para la base y h_2 para la superficie de la pila), la conductividad térmica del sustrato (k_s) y el coeficiente global de transmisión de calor (U), influyen fuertemente la forma de los perfiles de temperatura así como la localización de los “puntos calientes” o “hots points” dentro del reactor, dependiendo del tipo de condición de borde que tenga el sistema en la frontera del mismo;
8. A iguales condiciones de contorno y dentro de los rangos estudiados, se observa que sustratos con menores valores de $C_{s,e}$ (porción recalcitrante del sustrato) y de humedad, presentan mayores tasas de degradación (con lo que resultan valores más elevados de k_G), y se ve favorecida la evolución térmica de la pila;

9. El modelo permite predecir el tiempo de volteo óptimo (o la frecuencia óptima de éstos) que permite alcanzar la temperatura máxima en una pila en tratamiento;
10. Volteos de frecuencia semanal (régimen estudiado tipo “A”) originan un escaso desarrollo termofílico ($T > 45^{\circ}\text{C}$) dentro de la pila, mientras que volteos con una frecuencia de 2 a 3 veces por semana (régimen tipo “B”), permiten obtener períodos termofílicos más extensos y mayores posibilidades de control de patógenos en el compost producido ($T \geq 55^{\circ}\text{C}$);
11. Manteniendo igual masa y condiciones iniciales del sustrato, se demostró con el modelo que para obtener una mayor eficiencia térmica del proceso, es necesario adoptar formas geométricas de pilas que minimicen el área superficial de intercambio calórico por unidad de masa o de volumen (es decir, en términos de A_2/V_R o su equivalente A_2/m), de modo tal de reducir las pérdidas de calor a través de ésta y favorecer su conservación dentro de la masa.
12. Complementariamente el modelo permitió predecir, a igual forma geométrica y volumen de material inicial, la altura óptima que minimiza el área superficial de intercambio calórico y, por tanto, que reduce las pérdidas de calor asociadas a ésta generando un mejor desarrollo térmico en la pila.
13. El dispositivo experimental y la metodología de operación implementada en los ensayos, permitió obtener datos confiables que resultaron comparables a los obtenidos por otros autores

operando a escalas similares o mayores, pero en condiciones controladas; tal como quedó demostrado a través de las citas bibliográficas realizadas en el capítulo 7 de esta Tesis, y se publicó parcialmente en un capítulo de libro (Prono et al., 2011).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta Tesis, y los aspectos aún pendientes de abordar en la materia, los objetivos que se plantean a futuro son el modelado en 2D de la distribución de variables importantes como la temperatura, y el desarrollo de expresiones cinéticas más complejas y detalladas incorporando nuevos términos que representen, por ejemplo, la dependencia con otras variables o condiciones (tales como el pH, humedad inicial, balances de N, balances en cada fase, convección natural o forzada de aire, volteo mecánico, etc.). Así mismo, se podrían seguir expandiendo los campos de aplicación de las “ecuaciones de trabajo” al estudio de otras etapas del proceso vinculadas a la estabilización y maduración, la conservación de nutrientes y la calidad del compost producido.

Apéndices

Apéndice A: Técnicas de compostaje y escalas de trabajo

La etapa de degradación biológica del sustrato dentro del compostaje de RSO puede llevarse a cabo de tres formas o métodos básicos diferentes:

1) **Pilas o Hileras con volteos (dinámicas)**: Este es uno de los métodos más tradicionales. Los RSO se disponen sobre una base impermeable o de baja permeabilidad (plataforma de hormigón, suelo compactado, etc.) y la aireación del material se realiza periódicamente mediante volteos manuales o mecánicos, dependiendo del grado de mecanización aplicado y del volumen de RSO a tratar. Se utilizan para el monitoreo de la temperatura termómetros con una vaina adecuada según el tamaño de la pila (con frecuencia de 0,40-1,20 m longitud para los sistemas a escala completa o industrial).

2) **Pilas o hileras aireadas (estáticas)**: En ellas el material se dispone sobre una base de baja permeabilidad o en silo bolsas, y permanece estático durante el período activo de descomposición. La aireación se realiza mediante ventilación natural o forzada, en forma continua o a intervalos de tiempo programados. En el caso de aireación forzada, se requiere de un sistema de distribución de aire dentro de la pila (red de tuberías perforadas) y de un inyector o compresor de aire que puede operar en positivo o en negativo. Para determinar la tasa de aireación suelen utilizarse sensores de temperatura y oxígeno ubicados en distintos puntos de la masa a efectos de su

regulación. En la mayoría de los casos, el diseño completo y la operación de estos sistemas demandan elevados costos y un nivel de complejidad tecnológica moderada a alta.

3) **Biorreactores cerrados:** Se trata de una de las metodologías menos aplicadas a escala industrial en comparación a las dos anteriores. Los RSO se disponen dentro de contenedores cerrados de variada configuración y geometría (torres verticales, horizontales, rectangulares, circulares). De acuerdo a su forma de operación se clasifican en biorreactores tipo *flujo pistón* (principio de salida según orden de entrada) o *tanque agitado* (mezclado mecánico perfecto continuo). En este tipo de sistemas el proceso es más controlado permitiendo minimizar los olores, el tiempo de procesamiento y los requerimientos de terreno, y otro lado, optimizar el control de la temperatura, requerimientos de aireación y humedad. Como contrapartida se incrementan los costos iniciales de inversión, de mantenimiento y operación, requiere de mano de obra calificada. Estos aspectos limitan su aplicación a gran escala rezagando su utilidad a escala laboratorio y/o piloto en el área académica y de investigación. Dependiendo del aspecto del compostaje que se esté estudiando serán las variantes configuracionales que se implementen. Sistemas de inyección de aire, de extracción y captura de gases generados, redes de sensores de parámetros acoplados a un sistema de computacional para el almacenamiento y procesamiento de datos constituyen ejemplos de algunos componentes típicos.

En la Tabla A.1 se comparan cualitativamente cada uno de los sistemas descriptos en términos de costos, requerimientos de uso de terreno, tecnología

asociada y mano de obra necesaria, así como también algunos parámetros de dimensionamiento.

Tabla A.1. Características principales de las alternativas tecnológicas del compostaje.

| | 1. Hileras con volteo | 2. Pilas estáticas aireadas | 3. Biorreactores cerrados |
|--|---|---|--|
| Armado de pilas | Manual o mecánicamente, sobre plataforma impermeable o suelo acondicionado. | Sobre sistema de tuberías perforadas de aireación, base impermeable, o con maquinaria especial para llenado de los silos plásticos. | Carga manual o mecánica dentro del recipiente |
| Formación y gestión de lixiviados | Escasa formación. Canaletas laterales y cámara almacenamiento. Posible recirculación. | Escasa o nula generación. | Escasa formación. Posible recirculación. |
| Tipo de aireación | Volteo manual o mecánico | Forzada (en positivo o negativo, sensores multi-paramétricos) o Natural (caños perforados enterrados en la masa) | Sistema de ventilación forzada y/o agitación mecánica |
| Tratamiento de gases | Uso de biofiltros | Extracción y tratamiento | Extracción y tratamiento |
| Afectación por condiciones climáticas | Media (puede requerir cubierta de nylon o similar en caso de lluvias o nevadas abundantes) | Ídem opción 1 si es abierta. No en caso de silos plásticos | No |
| Fase activa ^(a) | 60 – 90 días | 25 – 50 días | 7 – 15 días |
| Fase estabilización / maduración ^(a) | 30 – 60 días | 30 – 50 días | 30 – 50 días |
| Parámetros de diseño | Humedad, C/N, pH, diámetro de partícula, estructura, relación Alto/Ancho de la pila | Ídem opción 1 y adicionalmente la demanda de O ₂ y el caudal de aire a bombear | Ídem opción 2 |
| Infraestructura básica ^(b) | Plataforma impermeable, herramientas para el volteo e instrumentos de medición de parámetros para el monitoreo. | Sist. aireación y tratam. de gases, cobertura (compost o silos plásticos), máquina para montaje de silos, sensores de medición de parámetros. | Contenedor, sistema aireación y/o agitación, sensores de medición de parámetros y sistema colección y almacenamiento de datos. |
| Requerimientos de terreno | Alto | Alto | Medio/Bajo |
| Tipo de mano de obra | No calificada | Calificada | Calificada |
| Monitoreo ambiental | Temperatura, humedad, pH y | Ídem opción 1 y adicionalmente | Ídem opción 2 |

| Costos ^(c) | frecuencia de volteos Bajos | demanda de O ₂ Medios/Altos | Altos |
|------------------------------|--------------------------------|---|-------|
|------------------------------|--------------------------------|---|-------|

^(a) Tchobanoglous et al. (1993). ^(b) Infraestructura básica característica de cada opción, diferente a las restantes, para facilitar la comparación. ^(c) De capital, operación y mantenimiento (no incluye los costos de terreno).

Por último, mencionar que a escala domiciliaria el compostaje es una tecnología en continua expansión. Hoy en día es posible encontrar en el mercado una variedad de tipos, formas y capacidades de contenedores diseñados específicamente para compostar los RSO generados en los hogares, así como también manuales y material explicativo al respecto proveniente de variadas fuentes. La aplicación de esta tecnología a este nivel depende de múltiples factores, entre los cuáles se destacan las políticas públicas fomentadas desde el Estado en materia de residuos, el nivel de conciencia ciudadana y el tipo de actividad económica y localización prevalecientes. En zonas rurales y poblaciones asiladas o que posean un sistema de recolección de RSU deficitario, por ejemplo, este tipo de práctica se ve favorecida.

Apéndice B: Indicadores de estabilidad, madurez y calidad utilizados en compostaje

Tabla B.1 Indicadores de estabilidad, madurez y calidad en compost. Ref. Bibliográficas: Bernal et al. (2009); Barrena et al. (2009) y Mazzarino et al. (2012).

| Tipos de indicadores | Parámetros utilizados |
|----------------------|--|
| De Estabilidad | Temperatura, color, olor, consumo de O ₂ , producción de CO ₂ , carbono soluble en agua (CSA), relación CSA/N total, biomasa microbiana (por conteo, concentración de ATP, retención de C y/o N en biomasa), NH ₄ ⁺ , relación NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ , actividad enzimática y grado de humificación. |
| De Madurez | pH, conductividad eléctrica, NH ₄ ⁺ , relación NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ , fenoles y ácidos grasos volátiles, índice de germinación, test de crecimiento vegetal. |
| De Calidad | pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, relación C/N, nutrientes totales y disponibles (N, P, Ca, Mg, K, S y micronutrientes), humedad, densidad, tamaño de partícula, porosidad, capacidad de retención de agua, % de impurezas (inertes artificiales), capacidad de degradabilidad y de liberación de nutrientes, elementos potencialmente tóxicos (EPT) o metales pesados, patógenos, actividad enzimática, ensayos con plantas. |

Respecto de los microorganismos patógenos asociados al compostaje, entre los más frecuentemente encontrados figuran priones, virus, bacterias (esporas), hongos (esporas), protozoos (quistes y ooquistes) y helmintos (huevos). Dentro de estos grupos, aquellos que producen estadios con distinto grado de resistencia (esporas, quistes, ooquistes y huevos) son los que generan mayor preocupación (Semenas 2012). En la siguiente Tabla B.2 se exponen los principales grupos de patógenos que con frecuencia con utilizados como *indicadores de calidad* del producto final.

Tabla B.2 Microorganismos patógenos.

| Tipos de microorganismos | Especies | Referencias Bibliográficas |
|---------------------------------|--|---|
| Bacterias | <i>Coliformes totales y fecales, Streptococci fecal, Salmonella, Vibrio cholera, Escherichia coli</i> , géneros de <i>Bacillus</i> | BioAbfV (1998); Hassen et al. (2001); Heinonen-Tanski et al. (2006); Neklyudov et al. (2008); Chroni et al. (2009); USEPA (1993, 2011). |
| Virus | Enterovirus (<i>polio, echo, coxsackie</i>), <i>Rotavirus</i> , Hepatitis A y E | Phil & Martin (2003); USEPA (2011). |
| Parásitos (Protozoa) | Huevos del helminto <i>Ascaris</i> sp. y <i>quistes de Giardia</i> | Phil & Martin (2003); Van Herk et al. (2004); USEPA (2011). |

Algunos criterios de temperatura para el control de patógenos y reducción de la atracción de vectores en compost de biosólidos utilizados por EEUU (USEPA 1993), y para compost de residuos orgánicos por Alemania (BioAbfV 1998), Austria (ÖNORM S2220, 1993) y Suiza (Federal Standards “Minimum Quality”), estos últimos dos países tomados de Brinton (2000), se sintetizan a continuación en Tabla B.3; mientras que la B.4 se presentan los requerimientos de temperatura para reducción de atracción de vectores en EE.UU. (USEPA 1993).

Tabla B.3 Regulaciones para reducción de patógenos según normas de distintos países.

Fuente: Adaptación de Brinton (2000) y Laos et al. (2012).

| Metodología de Compostaje | EEUU | | Alemania | Austria | Suiza |
|---------------------------|--------------------------------|-------------------|--|---------------------|----------------------|
| | PFRP | PSRP | | | |
| Pila estática | T ≥ 55 °C, 3 días | T ≥ 40 °C, 5 días | | | |
| Pila con volteos | T ≥ 55 °C, 15 días y 5 volteos | y 4 h ≥ 55 °C | | T ≥ 60 °C, 6 días o | T ≥ 55 °C, 21 días o |
| Sistemas abiertos | | | T ≥ 55 °C, 14 días o T ≥ 65 °C, 7 días | T ≥ 65 °C, 3 días | T ≥ 60 °C, 7 días |
| Sistemas cerrados | | | T ≥ 60 °C, 7 días | | |

PFRP: Procesos de marcada reducción de patógenos; PSRP: Procesos de significativa reducción de patógenos; T: Temperatura del sustrato.

Tabla B.4 Regulaciones para reducción de atracción de vectores según USEPA (1993).
Fuente: Adaptación de la Tabla 4-2 presentada en Laos et al. (2012).

| Tratamiento de Biosólidos | Requerimiento de procesos |
|---------------------------------|--|
| Compostaje | T \geq 40 °C durante 14 días y el promedio de T \geq 45 °C |
| Digestión aeróbica o anaeróbica | Reducción de SV \geq 38 % |
| Digestión aeróbica | Reducción de SV \leq 15 % y 30 días de T a 20 °C |
| Digestión anaeróbica | Reducción de SV \leq 17 % y 400 días a T \geq 30-37 °C |

SV: Sólidos volátiles; T: Temperatura del sustrato.

Apéndice C: Parámetros del proceso de compostaje

En los apartados 2.2 y 2.5 del capítulo 2 de la Tesis, se hizo referencia a la dinámica del proceso y la multiplicidad de factores y parámetros que se pueden determinar y/o medir a fin de monitorear y evaluar la evolución del mismo.

A continuación, en primer lugar se describe brevemente la importancia de los considerados por varios autores como los más relevantes, y posteriormente en la Tabla C.1 se resumen una lista más larga aún de parámetros con las respectivas referencias bibliográficas, que dan cuenta de la diversidad de criterios existentes para su valoración

Nutrientes: Carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) constituyen los principales nutrientes requeridos por la biomasa activa, y también las plantas, por lo que su presencia en el compost final es de gran valor agrícola (Rynk 1992). Los microorganismos utilizan el C como fuente de energía y de crecimiento, mientras que el N es esencial para la síntesis de proteínas y la reproducción. En general, todo el N orgánico presente en los RSO es biodisponible, pero no sucede lo mismo con el C (Tchobanoglous et al. 1993). Por lo tanto, si bien como guía es importante proveer al sistema proporciones adecuadas de estos elementos (relaciones C/N), debe considerarse también la *calidad del C* , que define su *degradabilidad* para ser mineralizado. Para una dada

relación C/N , a mayor biodisponibilidad del C , mayor es la conservación de N en el material porque pasa a formar parte de la biomasa de microorganismos (Sundberg 2005), aunque también está demostrado que el uso de materiales lignocelulósicos como agentes de mezcla contribuye a ese efecto porque el material descompone menos (Sánchez-Monedero et al. 2001).

Oxígeno: El compostaje como proceso aeróbico consume grandes cantidades de oxígeno, especialmente en el período activo donde la fracción lábil del sustrato es rápidamente metabolizada. Si el suministro de O_2 es limitado, se favorecen dentro de la masa condiciones de anaerobiosis, el proceso se hace más lento (los procesos anaeróbicos son menos eficientes que los aeróbicos, Rynk 1992), y comienzan a formarse compuestos tales como el metano, ácidos orgánicos y sulfuro de hidrógeno, que generan fuertes olores y problemas de seguridad (al ser tóxicos e inflamables). El mantenimiento de condiciones aeróbicas a través de distintos mecanismos de aireación (ver apartado 2.1, capítulo 2), no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también contribuye a remover los excesos de calor (control de la temperatura), vapor de agua y gases acumulados dentro de la masa (Das & Keener 1997; Sundberg 2005).

Humedad: Es un factor esencial para el mantenimiento de la actividad microbiana. Provee el medio para la ocurrencia de las reacciones bio-oxidativas, el transporte de nutrientes y el movimiento de la biomasa (Rynk 1992). Al igual que los otros parámetros, debe mantenerse en rangos adecuados ya que el material comienza progresivamente a secarse si no es adicionada agua artificialmente,

reduciéndose la actividad microbiana. Se sabe, por ejemplo, que los 20 kJ producidos por la descomposición de 1 g de materia orgánica son equivalentes al calor de vaporización de 10 g de agua (Haug 1993), y la descomposición solo genera 0,5 g de agua por cada gramo de materia (Sundberg 2005). También el exceso de humedad (saturación del sustrato, anaerobiosis) puede imponer severas limitaciones sobre el proceso.

Porosidad, estructura, textura (tamaño de partícula, FAS): La *porosidad* es el volumen de poros por unidad de volumen de la masa. Depende del tamaño y la forma de las partículas, del grado de descomposición de las mismas, e influye sobre los flujos de vapor de agua, gases formados y aire dentro del sustrato (Tchobanoglous et al. 1993). Partículas grandes y uniformes incrementan la porosidad. En relación a ésta, se define otro parámetro denominado FAS que representa la fracción de los poros llenos con aire en la matriz de compost, y depende de la porosidad y del contenido de agua en el sustrato. Condiciones adecuadas de FAS (free air space) son requeridas tanto para la aireación forzada como para la pasiva (Albuquerque et al. 2008). La *estructura* se refiere a la rigidez de las partículas y, por tanto, es una medida de la resistencia al apelmazamiento y compactación de la masa del sustrato, lo que resulta de interés en el compostaje para mantener condiciones internas de aerobiosis. La *textura* describe la superficie de las partículas disponible para el ataque microbiano.

pH : Debido al variado espectro de microorganismos involucrados en el compostaje, éste admite un rango relativamente amplio de pH en el cual puede desarrollarse (ver Tabla 2.2, capítulo 2), fuera del cual se inhibe el metabolismo microbiano. Conforme avanza la descomposición del sustrato en el tiempo, los perfiles de pH se modifican. La liberación de ácidos orgánicos al comienzo puede hacer descender temporariamente el pH (Bernal 1998a, b; Ramírez-Pérez 2007), mientras que la producción de amoníaco a partir de compuestos nitrogenados lo eleva. Numerosos investigadores han descrito la interdependencia entre la sucesión microbiana y el pH , así como la dinámica del N y del C en relación con la temperatura y este factor. Se sabe, por ejemplo, que combinaciones de sustratos ricos en N, pH alto (por encima de 8,5) y temperaturas termofílicas favorecen las pérdidas de N por volatilización del NH_3 (Rynk 1992; Haug 1993; Smars 2002; Sundberg et al. 2008; Cayuela et al. 2009).

Temperatura: Ver desarrollo en el apartado 2.6 del mencionado capítulo.

Tabla C.1 Parámetros usualmente estudiados durante el proceso de compostaje.

| Parámetro | Referencias Bibliográficas |
|------------------------|--|
| Temperatura (T) | Saucedo-Castañeda et al. (1990); Marugg et al. (1993); Keener et al. (1993, 2005); Das & Keener (1997); Tiquia et al. (1997); Smars (2002); Laos et al. (2002); García-Gómez et al. (2003); Ekinci et al. (2005, 2006); Xi et al. (2005); Mason et al. (2006); Yamada & Kawase (2006); Ramírez-Pérez et al. (2007); Bueno et al. (2008a, b); Lin et al. (2008); Petric (2008); Leconte et al. (2009); Mason (2009); Zhang et al. |

| | |
|---|---|
| | (2010); Zambra et al. (2011) |
| Humedad | Kaiser (1996); Ekinci et al. (2005, 2006); Xi et al. (2005); Yamada & Kawase (2006); Ramírez-Pérez et al. (2007); Bueno et al. (2008a, b); Leconte et al. (2009); Zhang et al. (2010); Zambra et al. (2011) |
| Sólidos Totales (ST) o masa seca (m_s) | Marugg et al. (1993); Kaiser (1996); Das & Keener (1997); Xi et al. (2005); Yamada & Kawase (2006); Eklind et al. (2007); Ramírez-Pérez et al. (2007); Bueno et al. (2008a, b); Mason (2008); Zhang et al. (2010) |
| pH , Conductividad Eléctrica (CE) | Tiquia et al. (1997); Bernal et al. (1998a, b); Smars (2002); García-Gómez et al. (2003); Yamada & Kawase (2006); Ramírez-Pérez et al. (2007); Bueno et al. (2008a, b); Petric (2008); Leconte et al. (2009) |
| Carbono Orgánico Total (COT), Carbono Soluble en Agua (CSA) | Bernal et al. (1998a, b); Laos et al. (2002); García-Gómez et al. (2003); Xi et al. (2005); Goyal et al. (2006); Diambro et al. (2007); Ramírez-Pérez et al. (2007); Lin et al. (2008); Larney et al. (2008); Leconte et al. (2009) |
| Amonio (NH_4^+), Nitritos (NO_2^-), Nitratos (NO_3^-), Nitrógeno Total (NT) | Tiquia et al. (1997); Bernal et al. (1998a, b); Laos et al. (2002); Smars (2002); García-Gómez et al. (2003); Parkinson et al. (2004); Xi et al. (2005); Bueno et al. (2008); Diambro et al. (2007); Ramírez-Pérez et al. (2007); Larney et al. (2008); Leconte et al. (2009) |
| Relación C/N | Bernal et al. (1998a, b); Laos et al. (2002); García-Gómez et al. (2003); Diambro et al. (2007); Larney et al. (2008); Leconte et al. (2009) |
| Fósforo Total (P), Potasio Total (K) | Parkinson et al. (2004); Bueno et al. (2008a, b); Larney et al. (2008) |
| Dióxido de Carbono (CO_2), Amoníaco (NH_3), Óxidos Nitrosos (N_2O), Oxígeno (O_2) | Marugg et al. (1993); Kaiser (1996); Das & Keener (1997); Bernal et al. (1998a, b); Smars (2002); García-Gómez et al. (2003); Zubillaga et al. (2004, 2005); Hobson et al. (2005); Komilis (2006); Ekinci et al. (2005, 2006); Yamada & Kawase (2006); Ramírez-Pérez et al. (2007); Petric (2008); Mason (2008, 2009); Zambra et al. (2011) |
| Cenizas (X), Sólidos Volátiles (SV), Materia Orgánica (MO) | Bernal et al. (1998a, b); García-Gómez et al. (2003); Ramírez-Pérez et al. (2007); Bueno et al. (2008a, b); Gomes et al. (2008); Mason (2009); Zhang et al. (2010) |
| Celulosa, Hemicelulosa, | Kaiser (1996); Bernal et al. (1998a, b); Tuomela et al. (2000); García-Gómez et al. (2003); Komilis et al. (2003); Eklind et al. |

| | |
|--|---|
| Lignina total (<i>LT</i>), Relación celulosa/lignina | (2007); Diambro et al. (2007) |
| Ácidos Húmicos (<i>AH</i>), Ácidos Fúlvicos (<i>AF</i>), Relación (<i>AH / AF</i>) | Bernal et al. (1998a, b); Tiquia et al. (1997); Veeken et al. (2000) |
| Tamaño de partícula, Porosidad, <i>FAS</i> ^(a) | Tchobanoglous et al. (1993); Das & Keener (1997); Annan (1998); Mohee et al. (2005) |
| Biomasa (grupos de bacterias, hongos, actinomicetes) | Hassen et al. (2001); Xi et al. (2005); Goyal et al. (2006); Eklind et al. (2007); Ramírez-Pérez et al. (2007); Petric (2008); Lin et al. (2008); Neklyudov et al. (2008); Raut et al. (2008); Chroni et al. (2009) |

^(a) *FAS* : Free air space.

Apéndice D: Contribución personal al proyecto de norma "REGLAMENTO PARA EL REGISTRO DE FERTILIZANTES, ENMIENDAS, SUSTRATOS, ACONDICIONADORES, PROTECTORES Y MATERIAS PRIMAS EN LA REPUBLICA ARGENTINA". Consulta pública realizada por el SENASA (2010).

A continuación se transcriben los comentarios y aportes realizados al mencionado proyecto de norma.

→ Del Proyecto de Norma:

En el 5to. Párrafo de los CONSIDERANDO indica que “el presente proyecto ha sido comunicado a las entidades que nuclean las empresas *del sector: Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos (CIAFA), la Cámara Argentina de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes (CASAFE), la Asociación Argentina de Protección Vegetal y Ambiental (ASAPROVE), las que no han manifestado oposición alguna al ordenamiento pretendido.*”

Al respecto, a mi entender considero que la consulta previa mencionada ha sido al menos parcial, ya que pareciera que el único sector afectado es el de los fertilizantes y agroquímicos. Tendiendo en cuenta lo expresado en la norma, parece no haber sido tenidas en cuenta entidades o asociaciones vinculadas al estudio, producción y aplicación de “Enmiendas, Sustratos y Acondicionadores” orgánicas, generadas por ejemplo a través de procesos como el compostaje. En este sentido cabe mencionar que la producción de compost a partir de residuos sólidos orgánicos en nuestro país, si bien no cuenta aún con “entidades que nuclean empresas” como sucede en el caso de los fertilizantes y agroquímicos, o con entidades específicas tales como la California Compost Quality Council (CCQC), si existen otras como la

Asociación Ciencia del Suelo y numerosos grupos de investigación pertenecientes a distintas universidades nacionales y dentro del CONICET, que desde hace décadas vienen estudiando y trabajando sobre el tema del compostaje. ¿Por qué no entonces capitalizar y aprovechar este conocimiento para obtener una norma más solvente, con más fundamentos y que sea factible de aplicar?

→ Del Anexo I:

Respecto de este documento, comparto en un todo los puntos descriptos con detalle en la contribución presentada por la Dra. Mazzarino y su grupo de investigación.

Quisiera además agregar algunos comentarios generales que desde mi punto de vista deberían contemplarse en la norma:

1. La no aceptación de la inscripción del compost realizado en base de residuos urbanos (página 19, capítulo 3 Registros, Enmiendas orgánicas, lombricompost) definitivamente va en contra de las políticas ambientales en materia de gestión integral de RSU que la Nación viene impulsando desde hace más de una década (son ejemplos de esto el Plan Nacional de Valorización de Residuos, año 1999, y la Estrategia Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos del año 2006), así como también afecta directamente la línea de acción seguida en las distintas jurisdicciones provinciales. La Provincia de Santa Fe, por ejemplo, en su recientemente promulgada ley N° 13055 (noviembre de 2009) reconoce al compostaje como uno de los tratamientos de valorización de los residuos. Por lo antes

expuesto, sugiero cambiar esta negación en la norma y aceptar dicha inscripción.

2. El compostaje es una tecnología valorada y reconocida nacional e internacionalmente por permitir el tratamiento y la valorización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU). Este tipo de residuos se caracteriza por su heterogeneidad, importante cantidad generada (al menos un 50% del total generado, según datos de la ENGIRS, Nación, 2005), son putrescibles y de alto impacto ambiental cuando no se los gestiona correctamente: provocando generación de olores desagradables y formación de lixiviados, atracción de vectores, degradación del paisaje, afectaciones directas e indirectas en la salud pública, etc.. Con la estabilización biológica alcanzada a través del compostaje se logra no sólo reducir en forma importante el peso y volumen del material original tratado (alrededor de un 50-60% en peso), sino también obtener un producto final útil, cuya calidad final depende fundamentalmente de dos cuestiones: 1) las características y propiedades físicas, químicas y biológicas de la mezcla de residuos iniciales empleados (relación C/N, pH, biodegradabilidad, grado de impurezas, ausencia de inhibidores biológicos, etc.), y 2) de la gestión del proceso que se haya realizado (controles adecuados de temperatura, humedad, aireación, etc.). La norma propuesta no especifica nada respecto de estos aspectos.

3. En nuestro país, el compostaje se presenta como una actividad cada vez más difundida en los distintos ámbitos locales (privados y estatales) para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos biodegradables que son

generados. En este sentido sin dudas es imprescindible contar cuanto antes con una regulación que establezca las condiciones en las que debe llevarse a cabo dicho proceso, los parámetros a controlar antes, durante y una vez terminado éste, así como también las vías y medidas para su inserción en el mercado. Esto es importante a fin de obtener un producto con “la calidad buscada”, minimizar los posibles impactos negativos sobre el ambiente asociados a un mal desarrollo del proceso que ya han sido comentados, y generar un mercado con reglas claras. Al respecto, debería especificarse en la norma “una calidad” para un “dado uso”, y contemplar *todos* los posibles usos que acepta el compost producido. Así como en el caso del agua, no es la misma calidad que se exige si ésta se va a utilizar como bebida, riego o para recreación. No debería ser la misma calidad que se exija a un compost que se utilice como enmienda para suelos productivos (de uso agrícola) como dice la norma, que como cobertura intermedia o diaria en un relleno sanitario, o para restauración de taludes, etc. A su vez, en relación a lo expresado en el punto 2, no es lo mismo un compost producido a partir de RS domiciliarios separados en origen que otro proveniente de residuos mezclados, uno producido a partir de residuos “verdes” (constituidos principalmente de restos de poda) que otro a partir de lodos cloacales, y la lista podría seguir extendiéndose. En síntesis, los requerimientos de calidad tanto de las materias primas empleadas como del producto final obtenido, deberían estar asociadas al uso posterior que se quiera dar. Hay varios ejemplos de normativas internacionales que realizan esta distinción.

Por todo lo expuesto anteriormente:

- Los productos obtenidos del compostaje y lombricompostado desde mi punto de vista poseen propiedades y características intrínsecas de las materias primas utilizadas y del proceso biológico involucrado que difieren claramente de la de los fertilizantes y agroquímicos. En este sentido de regularse en forma conjunta, se debería distinguir y tipificar unos y otros aún más (por ejemplo en el BOE 2005, Real Decreto N° 824 sobre productos fertilizantes se definen y distinguen las materias primas a utilizar, los procesos y productos a obtener en cada caso, las calidades de dichos productos diferenciadas por “clase” en función de su aplicación, las condiciones de inserción en el mercado de uno y otro, etc.).
- La norma propuesta y sus anexos, a mi entender no solo no deja claro las reglas de juego para los actuales y potenciales productores de compost y lombricompostado, sino que desalienta dicha actividad. Por otro lado exige análisis de parámetros sin especificar el método analítico para su determinación (con la importancia que esto tiene para la interpretación y valoración de los resultados), muchos de ellos son poco relevantes para definir las propiedades y calidad del producto obtenido (tal es el caso de los ácidos húmicos y fúlvicos), y no son prácticos ni factibles de llevar a cabo por la mayoría de los laboratorios de análisis de aguas y suelos con los que cuenta nuestro país.

Sin más, agradeciendo la posibilidad de haber podido expresar mi opinión y esperando haber contribuido con los comentarios, aprovecho la ocasión para

saludarlos atentamente,

Ing. Alejandra Prono

Breves antecedentes personales:

- ❖ Ingeniera Ambiental, graduada en 2005 en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL).
- ❖ 2006 - A la fecha. Cargo de Ayudante de la Cátedra de Residuos Sólidos de la Carrera de Ingeniería Ambiental (Res. 047/10 CD., Dpto. Medio Ambiente, FICH, UNL).
- ❖ 2007 - 2012. Becaria de postgrado del CONICET para la realización del Doctorado en Tecnologías Químicas (categoría A, Res. Nº 851/99, CONEAU) de la Facultad de Ing. Química (UNL). Tema de tesis: “Desarrollo Y Verificación Experimental De Herramientas De Modelado Y Simulación De Procesos De Conversión Biológica De Residuos Sólidos Urbanos”.

La consulta pública realizada por el SENASA en relación al mencionado Proyecto de Ley se desarrolló durante 60 días, desde el viernes 25 de junio hasta las 17:00 hs. del lunes 23 de agosto de 2010.

La presente contribución se encuentra disponible online en el sitio oficial del SENASA, buscando en el link:

<http://www.senasa.gov.ar/contenido.php?to=n&in=1412&io=13534>

Apéndice E: Ejemplos de publicaciones sobre modelado del compostaje y aspectos abordados.

Tabla E.1 Ejemplo de aspectos abordados en publicaciones sobre modelado del compostaje.

| N° | Ref. Bibliográf. | MODELADO Y SIMULACIÓN | | | | | | | | | | VALIDACIÓN (V) / SENSIBILIDAD (S) / OPTIMIZACIÓN (O) | | |
|----|------------------------------|-----------------------|---------|------|----------|-----------------------------------|-----------|---|------------|-----------|--|--|-----|----|
| | | BM | | | BET | Cinética degradación del Sustrato | | Factores corrección de k_{Global} | SUSTRATO | | Cinética de la Biomasa (microorganismos) | | SI | NO |
| | | Gases | Sólidos | Agua | T | n = 1 | n ≠ 1 | | Multicomp. | Monocomp. | Monod | Otro | | |
| 1 | Ahn et al. (2007) | | | | T(t) | | | | | | ✓ | | | |
| 2 | Bari & Koenig (2005a, b) | | | | T(t) | | | T, H ₂ O | | | | | | |
| 3 | Briški et al. (2007) | | | | T(t) | | 1,8 a 2,4 | T, H ₂ O | | | ✓ | | | |
| 4 | Das & Keener (1997) | ✓ | | ✓ | T(x,t) | ✓ | | | | | ✓ | | V | |
| 5 | Ekinci et al. (2005) | ✓ | | ✓ | T(t) | ✓ | | T, H ₂ O, O ₂ , FAS | ✓ | | | | | |
| 6 | Higgins & Walker (2001) | ✓ | | ✓ | T(t) | ✓ | | T, H ₂ O, O ₂ | | | ✓ | | | |
| 7 | Kaiser (1996) | ✓ | | ✓ | T(t) | ✓ | | T, O ₂ | ✓ | | ✓ | | | |
| 8 | Keener et al. (2005) | ✓ | | ✓ | T(t) | ✓ | | H ₂ O, T, C/N | ✓ | | | | V | |
| 9 | Lin et al. (2008) | ✓ | ✓ | ✓ | T = cte. | | | T, O ₂ | ✓ | | | Monod + Decaim. | V/S | |
| 10 | López-Zavala et al. (2004) | ✓ | ✓ | | T = cte. | | | O ₂ | ✓ | | ✓ | | V/S | |
| 11 | Mason (2008) | | | | T = cte. | ✓ | | T, H ₂ O, O ₂ | | | ✓ | | | |
| 12 | Mason (2009) | | | | T(t) | ✓ | | T | | | | | | |
| 13 | Monsalve et al. (2005) | | | | T(t) | ✓ | | T, H ₂ O, O ₂ | ✓ | | | | | X |
| 14 | Mudhoo & Mohee (2007) | | | | T(t) | ✓ | | | | | ✓ | | | |
| 15 | Nakasaki & Ohtaki (2002) | | | | T(x,t) | ✓ | | | ✓ | | | | | X |
| 16 | Nelson et al. (2007) | | | | T(x,t) | | | T | ✓ | | | | | X |
| 17 | Petric I. & Selimbaic (2008) | ✓ | | ✓ | T(t) | | 2,89 | T, H ₂ O, O ₂ , FAS | ✓ | | | | S | |
| 18 | Ramírez-Pérez et al. (2007) | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | | |
| 19 | Richard T.L. et al. (2006) | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | X |
| 20 | Robinson et al. (1999) | | ✓ | ✓ | T(t) | ✓ | | T | | | ✓ | | V | |
| 21 | Sole-Mauri et al. (2007) | ✓ | ✓ | ✓ | T(t) | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | S/V | |
| 22 | Trémier et al. (2005) | | | | | | | T | ✓ | | ✓ | | | X |
| 23 | Vander-Gheynst et al. (1997) | | | | T(x,t) | | | | | | ✓ | | | |
| 24 | Vlyssides et al. (2009) | ✓ | ✓ | ✓ | T(t) | ✓ | | T, H ₂ O, O ₂ | ✓ | | ✓ | | | |
| 25 | Xí & Liu (2006) | | ✓ | ✓ | T(t) | | | T, H ₂ O, O ₂ , FAS | | | ✓ | | S/V | |
| 26 | Yamada & Kawase (2006) | | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ | | O | |

H₂O: humedad del sustrato; O₂: oxígeno; BM: Balances de materia; BET: Balance de energía térmica; n: orden de reacción; FAS (free air space): Espacio libre de aire; C/N: relación C/N; T: Temperatura del sustrato; (t): dependencia temporal de la variable; (x,t): dependencia espacial y temporal de la variable.

Apéndice F: Funciones de corrección aplicadas a la constante cinética de pseudo-primer orden (k_G) para la degradación del sustrato

De las funciones de corrección

En la Tabla F.1 se exponen algunas de las funciones de corrección de la constante cinética de degradación k_G publicadas en la bibliografía de referencia, que expresan su dependencia con parámetros y variables del sistema. Puede observarse que los efectos en su mayoría son del tipo individual, es decir, una función o expresión matemática por tipo de factor considerado (temperatura, humedad, etc.).

Como se comentó en el capítulo 3 (sección 3.4) de la Tesis, la mayoría de los trabajos responden a un *modelo multiplicativo de efectos*, representado de la siguiente manera:

$$k(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_{\text{máx.}} * f_1(x_1) * f_2(x_2) * \dots * f_n(x_n) \quad [\text{F.1}]$$

Donde $k_{\text{máx.}}$ es la tasa de degradación en condiciones óptimas, f_i es cada una de las expresiones de corrección, y x_i son cada uno de los factores considerados. Una hipótesis simplificadora importante de este modelo es la independencia de los efectos de las diferentes condiciones ambientales consideradas entre sí (Hamelers 2004). A fin de mejorar esta aproximación, algunos autores como Higgins & Walter (2001), Ekinci et

al. (2005) y Yu et al. (2008) presentaron dichos efectos en forma combinada, considerando en este caso la interdependencia entre factores.

Las funciones de corrección para la temperatura en el compostaje han sido desarrolladas a partir de la ecuación de Arrhenius, empíricamente a partir de datos experimentales (de la degradación del sustrato o del crecimiento microbiano), o basados en las temperaturas cardinales (máxima, mínima y óptima) del crecimiento microbiano (Mason & Milke 2005b, Mason 2006). Expresiones que la vinculan con la constante de velocidad que rige la dinámica poblacional de los microorganismos, es un indicador de la velocidad con la cual se lleva a cabo la degradación microbiológica del sustrato (Marugg et al. 1993; Keener et al. 1996, 2005; Petric & Selimbaic 2008). Por su parte, las funciones de corrección para la humedad son todas empíricas (Mason 2006). El carácter empírico de las expresiones, limita su posibilidad de aplicación a otros casos, por lo que deberán limitarse a condiciones ambientales y de operación similares en las que fueron determinadas.

Por último, debe señalarse que bajo determinadas condiciones operativas del sistema (e. g., manteniendo la humedad constante y procurando O_2 en exceso a lo largo del proceso), algunas dependencias de la k_G con estos factores pueden desprejarse, asumiéndola como *aproximadamente constante* o depender de un número menor de factores, facilitando de esta manera los cálculos. Muchos autores obtienen estas relaciones de la literatura (cuando son extrapolables al caso en particular en estudio), algunos de la propia fase experimental, y unos pocos a partir del desarrollo teórico.

Tabla F.1. Funciones de corrección aplicadas a la constante cinética k_G .

| Efecto sobre k_G | Expresión | Referencia | Observaciones |
|--------------------------|---|-------------------------|---|
| Temperatura del sustrato | $F1(T) = 1,0618^{(T-20)} - 1,39^{(T-65)}$ | Monsalve et al. (2005) | |
| | $X_T = \exp^{-0,5[(T-58,3)/16,72]^2}$ | Keener et al. (2005) | [.] va al cuadrado |
| | $k_T = k_{25}[1,07^{(T-25)} - 1,3^{(T-55)}] * k_w$ | Bari & Koenig (2005) | $k_w = 1$ (%H >4 5%); $k_w = 45-30/15$ (%H 30-45%); $k_w = 0$ (%H < 30%) |
| | $k_T = k_{20}[1,066^{(T-20)} - 1,21^{(T-60)}] * k_w$ | Vlyssides et al. (2009) | con $k_{20} = \text{cte.}$ hidrólisis para degradación material fácil o difícil de degradar = 0,00252 - 0,0126 (d ⁻¹) |
| | $k_T = k_0[1,066^{(T-20)} - 1,21^{(T-60)}]$ | Briski et al. (2007) | |
| | $f_T = \frac{(T - T_{max})(T - T_{min})^2}{(T_{opt} - T_{min}) * \{(T_{opt} - T_{min})(T - T_{opt}) - (T_{opt} - T_{max})(T_{opt} + T_{min} - 2T)\}}$ | Higgins & Walker (2001) | |
| | $k_T = \exp^{-0,03(T_{actual} - T_{opt.})^2}$ | Meima et al. (2008) | |
| Contenido de Humedad | $k_{H_2O} = 1/\exp^{-17,684[1-ST]+7,0622} + 1$ | Petric et al. (2009) | ST = sólidos totales |
| | $k_{H_2O} = \exp^{-0,5[(wc-44,22)/19,87]^2}$ | Keener et al. (2005) | wc = contenido agua sustrato [.] va al cuadrado |
| | $k_{H_2O} = 2,76 * \%H - 0,44$ | Meima et al. (2008) | |
| | $f_{H_2O} = 1/\exp^{-17,684 \%H + 7,0622} + 1$ | Higgins & Walker (2001) | |

| | | | |
|---------------------------------|---|---------------------------|---|
| | $F_2 (ST) = 1/\exp[A_2 (1-\%ST/100)+B_2] + 1$ | Monsalve et al. (2005) | ST = sólidos totales |
| | $f_{H_2O} = 1 - 17,3 * (1 - \%H/100)^{6,94}$ | Vlyssides et al. (2009) | Para %H ≥ 40% |
| | $f_{H_2O} = 20,6614 * (\%H/100)^{4,06}$ | Vlyssides et al. (2009) | Para %H < 40% |
| Disponibilidad de O_2 | $F_3 (T) = 1/\exp [A_3 (1-\%ST/100)+B_3] + 1$ | Monsalve et al (2005) | |
| | $k_{O_2} = O_2/(K_{O_2} + O_2)$ | Petric & Selimbaic (2008) | $O_2 = \text{kgO}_2/\text{m}^3$ aire, $K_{O_2} = \text{cte. saturación del } O_2 [\text{kgO}_2/\text{m}^3]$ |
| | $k_{O_2} = 0,614 * \text{atan} (0,4[O_2])$ | Ekinci et al. (2005) | |
| | $f_{O_2} = O_2/(K_{O_2} + O_2)$ | Higgins & Walker (2001) | <i>Cte. saturación del O_2:</i> $K_{O_2} = 0,79 - 0,041(T) + 0,040 (\%H)$ |
| | $K_{O_2} = k_{O_2,T=20} * 1,12^{(T-20)}$ | Vlyssides et al. (2009) | |
| Espacio libre de aire (FAS) | $k_{FAS} = 1/(\exp [-23,675FAS+3,4945] + 1)$ | Petric & Selimbaic (2008) | |
| Porosidad | $k_\epsilon = 1/(\exp^{-23,675\epsilon + 3,4945} + 1)$ | Ekinci et al. (2005) | |
| Relación C/N | $X_{C/N} = \exp^{-0,5\{[C/N - 35,94]/11,66\}^2}$ | Keener et al. (2005) | [.] va al cuadrado |
| Combinaciones de factores | $k = 0,089 \exp^{-0,5\{[(\%H - 44,22)/19,87]^2 + 58,31/16,72\}^2}$ | Ekinci et al. (2005) | [.] van al cuadrado |
| | $k_d = k_{d,m\acute{a}x} * [C/(K_C + C)] * [O_2/(K_{O_2} + O_2)] * k_T * k_w$ | Yu et al. (2008) | K_C, K_{O_2} : ctes. saturación media en el sustrato para el C y el O_2 . |

T = Temperatura del sustrato; min = mínima; máx = máxima; opt = óptima; %H = Porcentaje de humedad.

Apéndice G:

PARTE “A”. Términos frecuentemente incluidos en los balances de energía térmica (BET).

PARTE “B”. Clasificación de dispositivos experimentales según su tamaño.

PARTE “A”

Tabla G.1 Términos típicos del BET (Mason 2006).

| Acumulación | Entradas | Salidas | Rxn |
|---|---|---|---|
| Calor sensible del sustrato contenido en el reactor | Calor sensible del aire seco de entrada | Calor sensible del aire seco de salida | Calor generado biológicamente por la degradación de SVB |
| | Calor sensible y latente del vapor de agua entrante | Calor sensible del vapor de agua saliente | |
| | Calor sensible del agua adicionada | Pérdidas por conducción / convección | |
| | Radiación entrante | Pérdidas por radiación | |
| | | Calor latente del agua evaporada | |

SVB : Sólidos volátiles biodegradables.

PARTE “B”**Tabla G.2** Clasificación de reactores según su tamaño (Mason & Milke 2005a).

| | Escala Laboratorio | Escala Piloto | Escala Industrial |
|---|-------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Capacidad del Reactor | < 100 L | 100 - 2000 L | > 2000 L |
| Relación A/V | > 10:1 | 4 – 10:1 | 0,5 – 3,8 |
| Pérdidas por convección (aireación) | 3,3 % | | 12,4 % |
| Pérdidas por conducción (paredes reactor) | 61,6 % | | 10,9 % |
| Pérdidas por evaporación (Calor latente) | 34,3 % | | 75,8 % |
| Calor sensible sólidos/reactor | 0,8 % | | 0,9 % |

A/V : Área total superficial / volumen másico

Apéndice H: Técnicas Analíticas

PRIMERA PARTE. Métodos analíticos utilizados

Como se expresó en el capítulo 4 de la Tesis, la mayoría de las determinaciones realizadas durante la fase experimental de este trabajo corresponden a parámetros de rutina en laboratorios de suelos y aguas, para los cuales se emplearon técnicas analíticas ya estandarizadas. En la siguiente tabla se resume para cada parámetro el procedimiento principal, el instrumental requerido, y la bibliografía de referencia utilizada en los ensayos para su cuantificación.

Tabla H.1 Resumen de métodos analíticos.

| Parámetro | Procedimiento Analítico General | Equipamiento principal ^(a) / Instrumental utilizado | Referencia bibliográfica |
|--------------------------------------|--|--|--|
| Humedad | Secado en estufa, 24 h, 70 ± 5 °C | Balanza analítica digital, vasos de precipitado y estufa de secado. | Sánchez-Monedero et al. (2001); Laos et al. (2002); Sadzawka et al. (Nch2880, 2005); Tognetti et al. (2007a, b); Leconte et al. (2009); entre otros. |
| pH | Suspensión muestra: agua destilada 1 (g) :10 (mL), 2 h agitación. Medición luego de 15 min en reposo con instrumento calibrado. | Agitador magnético, buzos magnéticos, peachímetro. | Sánchez-Monedero et al. (2001); Laos et al. (2002); Sadzawka et al. (Nch2880, 2005); Tognetti et al. (2007a, b); Leconte et al. (2009); entre otros. |
| Densidad aparente | Medida de la masa por unidad de volumen del recipiente utilizado. | Vaso de precipitado de 2 L, Balanza electrónica (30 kg capacidad) | Cooperband (2002), Sadzawka et al. (Nch2880, 2005). |
| Granulometría | Método semi directo (tamizado en "seco"). Tamices: 8; 4,75; 2; 1; <1 (fondo) mm, 5 min. Vibración a potencia media. Pesaje de cada fracción. | Balanza digital analítica, equipo vibrador + tamices varios secuenciados. | Australian Standard (2003); Sadzawka et al. (Nch2880, 2005). |
| Sólidos Volátiles (SV) Cenizas | Tarar crisol c/tapa + muestra seca. Calcinación (4 h, 550 °C). Pesaje una vez enfriado (crisol + cenizas). Cálculo por diferencia de pesada. | Balanza analítica digital, crisoles de porcelana con tapa (≠ capacidad), horno de placas (mufla), desecador de vidrio. | Rynk (1992); Barrington et al. (2002); Sadzawka et al. (Nch2880, 2005). |
| Carbono orgánico (C _{org}) | $\% C_{org} = \% SV / 1,8$ | | Haug (1993); Marugg et al. (1993); Barrington et al. (2002); entre otros. |

| | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| Nitrógeno Total (N_T) | Método de Kjeldahl básico: Digestión (H_2SO_4 + catalizador) + destilación y titulación. | Balanza analítica digital, equipo de análisis de N-Kjeldahl, equipo triturador RS. | Eklind et al. (2000); Laos et al. (2002); Zhu (2007); entre otros. |
| Lignina Insoluble "Lignina Klason" | Hidrólisis ácida (H_2SO_4 al 72 % + muestra, 30 °C, 1 h) - autoclave (1 atm, 120 °C, 1 h) - filtración (diám. poro 420 micras). - secado - pesaje - calcinación (550 °C, 1 h) - pesaje. | Balanza analítica, material vidrio (vasos de precip., erlenmeyer), baño termostático, autoclave, crisoles porcelana (50 mL), estufa, equipo filtración, mufla. | Adaptación propia basada en la técnica de la norma TAPPI T 222 om-88, "Acid-insoluble lignin in wood and pulp" (ver Apéndice H). |
| Lignina Soluble | Determinación espectrofotométrica, UV longitud de onda 205 nm, cubetas de cuarzo. | Espectrofotómetro UV- Visible | Maekawa et al. (1989). |
| Índice de Germinación (IG) | Test de germinación: 25 semillas (ryegrass estacional) + filtro papel + 3 mL extracto en cajas de Petri. Incubación 7 días, 23 °C, en oscuridad. | Cajas de Petri de vidrio, 10 cm diám. | Emino & Warman (2004); Zubillaga et al. (2008); Bernal et al. (2009). |

(a) Ver descripción de los equipos (marca, modelo y características técnicas principales) en Tabla J.1 del Apéndice J (Parte "A").

SEGUNDA PARTE. Adaptaciones realizadas a la técnica Tappi Method T 222 om-88 para determinación de la Lignina Insoluble en RSO.

H.1 Comentarios previos

La determinación de la lignina es un ensayo comúnmente realizado en el ámbito de la industria del papel, y las técnicas para su obtención han sido desarrolladas y ajustadas para materiales como la madera. En ellas, por ejemplo, es común la extracción previa de solventes orgánicos, ya que suelen ser utilizados en el tratamiento de este tipo de materiales, pudiendo alterar los resultados de lignina.

Entre los métodos utilizados para aislar este componente se distinguen: 1) los que la remueven selectivamente y la recuperan en una solución final y, 2) los que la obtienen como un residuo insoluble luego de la disolución en ácido de los restantes compuestos carbonosos. El Número de Kappa (oxidación de la lignina utilizando una solución de permanganato de potasio) y la lignina de Klason (determinada gravimétricamente luego de la disolución en ácido sulfúrico al 72 % del resto de los componentes), son dos de las técnicas más utilizadas. Otras técnicas implementadas son: Neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) y acid detergent lignin (ADL).

Por su parte, los residuos lignocelulósicos utilizados en compostaje (restos de podas, hojas y ramas, residuos agrícolas), están compuestos principalmente de un 40 % de celulosa, seguidos de un 20 a un 30 % de hemicelulosa, y un 20 a un 30 % de lignina (Tuomela et al. 2000), y en general, no son tratados con solventes orgánicos. Grupos de investigación que estudian su biodegradación a través del compostaje, determinan la lignina insoluble aplicando en forma directa las técnicas

analíticas mencionadas, o al menos sin aclarar las adaptaciones realizadas para este tipo de materiales. Así por ejemplo la hemicelulosa es estimada como la diferencia entre NDF y ADF, celulosa como la diferencia entre ADF y ADL, y finalmente la lignina se obtiene por diferencia entre ADL y el contenido de cenizas (Vargas-García et al. 2007; Yu et al. 2008). Otros como Ko J-J. et al. (2009) aplican el método clásico de Klason.

En esta Tesis se realizaron esfuerzos por mejorar la precisión de los resultados obtenidos, adaptando la técnica de Lignina de Klason tomada como referencia (la Tappi Method T 222 om-88), para la determinación de la fracción insoluble de este componente teniendo en consideración el tipo de matriz analizada, como se detalla en el siguiente apartado.

H.2 Adaptaciones realizadas

Preparación de la muestra: Secar el material muestreado en estufa (a 70 ± 5 °C si es del tipo circulación forzada o a 105 °C si es por convección natural) hasta obtener una pesada estable. Determinar su humedad. Luego procesar la muestra seca dentro de un contenedor con un dispositivo tipo minipimer para reducir el tamaño de las partículas o mediante molino Willey de laboratorio. Tamizar la muestra seca y molido, separando y pesando el material retenido en malla 40 (diám. de poro 0.42 mm).

Hidrólisis ácida: En un vaso de precipitado de 100 mL colocar la cantidad de muestra previamente acondicionada (ver Tabla H.2) dependiendo del % esperado de lignina del material a determinar. Agregarle gradualmente con pipeta ácido

sulfúrico al 72 % frío (recién sacado de la heladera, ver cantidad en Tabla H.2), agitando en forma continua con una varilla de vidrio, manteniendo el vaso dentro de un baño con agua fría a 2 o 3 °C durante el proceso de dispersión del material. Llevar a baño termostático (30 °C, 1 h) mezclando frecuentemente. Por otro lado, agregar 300 a 400 mL de agua destilada a un erlenmeyer de la capacidad adecuada previamente marcado hasta los mL finales que correspondan según el tamaño y tipo de la muestra (ver Tabla H.2). Una vez terminado el baño, transferir cuantitativamente la muestra al erlenmeyer para diluir la concentración del ácido y enrasar hasta el punto marcado para llevarlo al 3 % (El ácido a esta concentración tiene $1,0229 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$). Tapar el erlenmeyer con tapones de vidrio o similar y autoclavar 1 h a 120 °C (1 atm). Retirar, permitir sedimentar la lignina insoluble (15 min) y dejar enfriar. Llevar a heladera hasta continuar con el siguiente paso.

Tabla H.2 Proporción muestra/ácido sulfúrico para la hidrólisis ácida (adaptada).

| Contenido lignina esperable en muestra | Cantidad muestra a utilizar (g, en b.s.) | Ácido sulfúrico al 72 % (mL) | Capacidad del Erlenmeyer a utilizar para dilución al 3 % (mL) | Agua destilada (mL) |
|--|--|------------------------------|---|---------------------|
| Alto (> 15 %) | 0,5 | 13 | 500 | 300 + hasta 500 |
| Medio (5 – 15 %) | 1 | 15 | 1000 | 300 + hasta 575 |
| | 1 | 13 | 500 | 300 + hasta 500 |
| Bajo (< 5 %) | 2 | 40 | 2000 | 400 + hasta 1540 |

Filtrado y separación de la lignina insoluble en ácido: Tarar en forma conjunta

el filtro a utilizar (Whatman GF/A o C) y un crisol con tapa. Filtrar el líquido separando la fracción disuelta de la particulada (diámetro de poro 420 micras = ,42 mm).

Determinación del contenido de lignina insoluble (retenida sobre el filtro):

Retirar el filtro del equipo de filtración ayudado de un par de pinzas. Colocarlo dentro del crisol abierto (sin tapa) y secar en estufa a 70 ± 5 °C hasta pesada constante. Una vez evaporada toda el agua, sacar y dejar enfriar en desecador, luego pesar.

Determinación del contenido de cenizas en la lignina: Tapar el crisol y llevarlo a mufla (4 h, 550 °C). Transcurrido este tiempo dejar enfriar en desecador y pesar.

Para la determinación del contenido de Lignina Total, se determina por espectrofotometría el contenido de lignina soluble (ver técnica analítica de referencia, Tabla H.1 en la primera parte del presente) y sumar al resultado anterior.

Apéndice I: Ejemplo del cálculo de la fórmula química para los RSO utilizados

Para la obtención de la fórmula química tanto de cada RSO en particular como de la “mezcla” o sustrato inicial a compostar en cada experiencia, se siguió la metodología de cálculo propuesta por Tchobanoglous et al. (1993). A continuación a modo de ejemplo se presenta en las Tablas I.1 a I.5 los resultados obtenidos de la secuencia de cálculo indicada hasta llegar a la fórmula química de cada RSO en cuestión.

Datos necesarios de entrada:

1. El contenido elemental (% en peso de C, H, O, N, S) y de cenizas presente en cada residuo, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla I.1 (a) Composición elemental de los RSO utilizados en los ensayos (Tchobanoglous et al. 1993).

| | % C | % H | % O | % N | % S | % Cenizas |
|--------------------|------|-----|------|-----|-----|--------------|
| Residuos de comida | 48,0 | 6,4 | 37,6 | 2,6 | 0,4 | 5,0 |
| Estiércol equino | 43,5 | 5,2 | 39,7 | 1,0 | 0,1 | 10,5 |
| Paja de trigo | 42,9 | 5,8 | 40,5 | 0,4 | 0,1 | 10,4 |
| Restos de poda | 48,5 | 5,9 | 42,5 | 0,1 | 0,0 | 3,1 |

| | | | | | | |
|---------------------------|------|-----|------|-----|-----|-----|
| Recortes de césped fresco | 44,8 | 6,0 | 38,8 | 3,4 | 0,4 | 6,7 |
|---------------------------|------|-----|------|-----|-----|-----|

2. Los pesos moleculares de cada uno de los elementos constituyentes:

Tabla I.1 (b) Pesos moleculares de los elementos constituyentes.

| Elemento | Peso molecular ($\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$) |
|----------|--|
| C | 12 |
| H | 1 |
| O | 16 |
| N | 14 |
| S | 32 |

3. Con los datos anteriores, se comienzan los cálculos tomando como base 1 kg de residuo:

Tabla I.2 Cálculos másicos del contenido de agua, sólidos totales (ST), hidrógeno (H) y oxígeno (O).

| Tipo de RSO | Humedad (%, b.h.) | kg de H_2O | ST (kg, b.s.) | $\frac{\text{kg de H}}{\text{en H}_2\text{O}}$ | $\frac{\text{kg de O en H}_2\text{O}}$ |
|--------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|--|--|
| Residuos de comida | 69,0 | 0,690 | 0,310 | 0,077 | 0,613 |

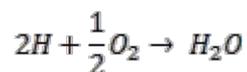
| | | | | | |
|---------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Estiércol equino | 51,1 | 0,511 | 0,489 | 0,057 | 0,454 |
| Paja de trigo | 10,5 | 0,105 | 0,895 | 0,012 | 0,093 |
| Restos de poda | 9,7 | 0,097 | 0,903 | 0,011 | 0,086 |
| Recortes de césped fresco | 70,5 | 0,705 | 0,295 | 0,078 | 0,627 |

Donde:

$$\text{masa de agua (kg agua)} = m_{\text{total}} * \% \text{ humedad} \quad [\text{ec. I.1}]$$

$$\text{Para los ST (sólidos totales) o masa seca (kg, b.s.)} = m_{\text{total}} - m_{\text{agua}} \quad [\text{ec. I.2}]$$

Para expresar la fórmula química considerando el agua contenida en el residuo, planteando la reacción estequiométrica de formación del agua, se debe calcular la masa de H y de O contenidos en dicha masa de agua, de acuerdo entonces a la siguiente reacción:



$$2 \text{ g/mol} + 16 \text{ g/mol} = 18 \text{ g/mol}$$

Tabla I.3 (a) Masa (con y sin agua) de cada elemento en los diferentes RSO utilizados.

| Tipo de RSO | Composición sin agua (kg) | | | | | | Composición con agua (kg) | |
|---------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|---------------------------|-------|
| | C | H | O | N | S | Cenizas | H | O |
| Residuos de comida | 0,149 | 0,020 | 0,117 | 0,008 | 0,001 | 0,016 | 0,097 | 0,730 |
| Estiércol equino | 0,213 | 0,025 | 0,194 | 0,005 | 0,001 | 0,051 | 0,082 | 0,648 |
| Paja de trigo | 0,384 | 0,052 | 0,362 | 0,003 | 0,001 | 0,093 | 0,064 | 0,455 |
| Restos de poda | 0,438 | 0,053 | 0,383 | 0,001 | 0,000 | 0,028 | 0,064 | 0,470 |
| Recortes de césped fresco | 0,132 | 0,018 | 0,114 | 0,010 | 0,001 | 0,020 | 0,096 | 0,741 |

Donde: *masa elemento "i" (kg, b.s.)* = $m_{seca} * \% \text{Peso Elemento "i"}$ [ec. I.3]

Dividiendo los valores máxicos de cada elemento de la tabla anterior por su respectivo peso molecular (**Tabla I.1. (b)**), se obtienen las cantidades en base molar:

Tabla I.3 (b) Moles (con y sin agua) de cada elemento en los diferentes RSO utilizados.

| Tipo de RSO | Moles sin agua | | | | | Moles con agua (kg) | |
|---------------------------|----------------|-------|-------|--------|---------|------------------------|-------|
| | C | H | O | N | S | H | O |
| Residuos de comida | 0,012 | 0,020 | 0,007 | 0,0006 | 0,00004 | 0,097 | 0,046 |
| Estiércol equino | 0,018 | 0,025 | 0,012 | 0,0004 | 0,00002 | 0,082 | 0,041 |
| Paja de trigo | 0,032 | 0,052 | 0,023 | 0,0002 | 0,00003 | 0,064 | 0,028 |
| Restos de poda | 0,036 | 0,053 | 0,024 | 0,0001 | 0,00001 | 0,064 | 0,029 |
| Recortes de césped fresco | 0,011 | 0,018 | 0,007 | 0,0007 | 0,00004 | 0,096 | 0,046 |

Dividiendo el número de moles de cada elemento por el número de moles del nitrógeno, se normaliza cada valor sobre la base $N = 1$, como sigue:

Tabla I.4 Aplicación de la relación N = 1 en base molar.

| Tipo de RSO | Relación mol (N = 1) sin agua | | | | Relación mol (N=1) con agua | |
|---------------------------|-------------------------------|-------|-------|-----|-----------------------------|-------|
| | C | H | O | N | H | O |
| Residuos de comida | 21,5 | 34,5 | 12,7 | 1,0 | 167,6 | 79,2 |
| Estiércol equino | 48,8 | 69,9 | 33,4 | 1,0 | 226,2 | 111,5 |
| Paja de trigo | 139,0 | 226,3 | 98,4 | 1,0 | 276,9 | 123,7 |
| Restos de poda | 565,5 | 827,4 | 371,4 | 1,0 | 994,5 | 455,0 |
| Recortes de césped fresco | 15,6 | 25,1 | 10,1 | 1,0 | 136,0 | 65,6 |

Tabla I.5 Fórmulas químicas obtenidas (con y sin agua).

| Tipo de Sustrato | Fórmula Química (N = 1) ¹ | |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| | Sin agua | Con agua |
| Residuos de comida | $C_{21,5}H_{34,5}O_{12,7}N$ | $C_{21,5}H_{167,6}O_{79,2}N$ |
| Estiércol equino | $C_{26,2}H_{39,7}O_{19}N$ | $C_{26,2}H_{128,5}O_{63,4}N$ |
| Paja de trigo | $C_{150,4}H_{226,3}O_{98,4}N$ | $C_{150,4}H_{276,9}O_{123,7}N$ |
| Restos de poda | $C_{578,4}H_{827,4}O_{371,4}N$ | $C_{578,4}H_{994,5}O_{455,1}N$ |
| Recortes de césped fresco | $C_{15,6}H_{25,1}O_{10,1}N$ | $C_{15,6}H_{136,1}O_{65,6}N$ |

Apéndice J:

Parte “A”. Información de los principales equipos / instrumental utilizados con las técnicas analíticas aplicadas. Parte “B”. Tratamiento y conservación de las muestras de compost.

Parte “A”**Tabla J.1** Descripción de los equipos / instrumental utilizado.

| Equipo / Instrumental | Descripción (marca, modelo, características técnicas) |
|---|---|
| Balanza analítica digital. | PRECISA. Mod. XT 200A. Precisión $\pm 0,01$ g. |
| Balanza electrónica | SYSTEL. Mod. Clipse, Bumer 30. Precisión 0.005 kg/kg, capacidad máx. 30 kg. |
| Estufa de secado / esterilización. | DALVO. Precisión ± 1 °C, 30 – 200 °C. |
| Horno de placas (mufla). | JONOMEX. Mod. N° 801. Temperatura máxima 1250 °C, 380 V, I máx. 12 A. |
| Autoclave | VZ. Mod. VZ 200. Cámara cilíndrica de cobre de 316 L, doble válvula seguridad y manómetro incorporado. Esterilización por vapor saturado. |
| Agitador magnético con regulador de temperatura | Mod. 78HW-1. Veloc. ~ 0 -2000 rpm. |
| Peachímetro (calibrado a pH 4, 7, 10). | HANNA. Mod. HI 8424. |
| Medidor de conductividad-resistencia | YSI Incorporated. Mod. YSI 3403. |
| Equipo vibrador | FRITSCH analysette. Mod. 03.502 N° 1321, 220 V. |
| Tamices (\neq tamaño abertura de poro) | ZONYTEST. Mallas de acero inox. (certificadas s/norma ISO 3310-1) y cuerpo de ABS (s/norma IRAm 1501 y ASTM E-11/70). |

| | |
|----------------------------------|---|
| Equipo de análisis N-Kjeldahl | BÜCHI 342 - Control Unit; BÜCHI 322 - Distillation Unit; BÜCHI 430 Digester. |
| Equipo de filtración | SARTORIUS. Mod. SM 16510. 250 mL capac. |
| Baño termostático | LAUDA mgw. Mod. Type: WB 20 - D8 /17. |
| Espectrofotómetro | CARY 100 Bio UV-Visible spectrophotometer. |
| Equipo triturador / molienda (1) | MOULINEX. Mod. La Moulinette (AD5663). Potencia 700 W. |
| Equipo triturador / molienda (2) | BRAUN. Mod. Household type (Nº 15651), Potencia 250 W. |

Parte “B”

Tabla J.2 Tipos de pre tratamiento y conservación de las muestras.

| Parámetro | Masa requerida por determinación ^(a) | Pre tratamiento a aplicar a muestra | Tipo de conservación ^(c) |
|----------------------|--|---|--|
| Humedad | 2 a 5 g (b. h.) | | |
| pH | 5 g (b. h.) | Ninguno, tal como extraído (b. h.) | La muestra fresca es conservada en frasco de plástico, cerrado, con tapa a rosca, en heladera a 4 °C. Momentos antes de la determinación se saca de la heladera para que se equilibre con la temperatura ambiente. Utilización dentro de las 4 a 6 h de extraída la muestra. |
| Densidad aparente | En función del volumen del recipiente utilizado. | | |
| Granulometría | 0,5 a 1 % de la masa total (b. h.) RS en reactor | Muestra seca al aire ^(b) | |
| Test de Germinación | 1,5 g (b. h.) | Extracto 1:10 con compost estabilizado, 2 h agitación. | |
| %SV | | | |
| % Cenizas | 0.5 a 0.8 g (b. s.) | Secado a 70 ± 5 °C por 24 h | |
| %Corg | | | |
| % Nitrógeno Orgánico | 0.5 g (b. s.) | Secado a 70 ± 5 °C por 24h + reducción de tamaño (trituración) | La muestra seca es conservada en bolsa de papel madera sellada, dispuesta a su vez dentro de bolsa plástica con cierre tipo ziploc. Se guarda en lugar seco, oscuro y a 20 ± 3 °C. |
| % Lignina Insoluble | 1 g (b. s) | Secado a 70 ± 5 °C por 24h + reducción del tamaño de partícula y tamizado. Se utiliza la fracción retenida por la malla N° 40 (diám. de poro 0,42 mm) | |
| % Lignina Soluble | Utiliza el volumen de líquido filtrado durante la determinación de la Lignina Insoluble. | | |

^(a) La cantidad de masa indicada se debe multiplicar por 2 o por 3 según el número de repeticiones consideradas en cada análisis. ^(b) Muestra seca al aire = muestra secada en estufa por 24 h a 40 ° C. ^(c) Conservación implementada desde el momento de extracción de la muestra hasta su utilización para determinaciones analíticas. b.h.: base húmeda; b.s.: base seca.

Apéndice K: Ajustes de propiedades en una mezcla de RSO a compostar.

K.1 Ajuste de nutrientes

A continuación se expone un ejemplo del cálculo de la mezcla a realizar entre dos residuos cualesquiera A y B, para obtener una relación C/N inicial de diseño para los ensayos, siguiendo la metodología propuesta por Rynk (1992) y Tchobanoglous et al. (1993). Dichos cálculos se realizan en base seca (salvo que se indique lo contrario) y se expresan en términos máxicos.

Por último en relación a dicha metodología, cabe señalar que ésta se basa en la hipótesis de que solo dos de los residuos que se van a compostar son los que realizan el aporte necesario de los nutrientes a la mezcla, mientras que los demás residuos que pueden ser incorporados a la misma, se los considera como enmienda (ya sea balanceando contenido de humedad, estructura o textura), y no participando en el balance de nutrientes biodisponibles al proceso.

Procedimiento de cálculo:

Para cada tipo de RSO se debe conocer como datos de entrada: 1) % humedad, 2) % nitrógeno, y 3) % carbono orgánico o su relación C/N .

Sean:

i = tipo de residuo, A o B.

$m_{s,i}$ = masa seca del residuo "i" (kg, b.s.)

H_i = porcentaje de humedad del residuo "i" (% , b.h.)

N_i = porcentaje de nitrógeno en el residuo "i" (% , b.s.)

C_i = porcentaje de carbono en el residuo "i" (% , b.s.)

$C/N_{(i)}$ = relación C/N del residuo "i" (% , b.s.)

Cálculos genéricos para cada tipo de residuo:

Cantidad de agua en "i" = $m_i \cdot (\%H_i/100)$

Masa seca en "i" = $m_i \cdot (1 - \%H_i/100) = m_{s,i}$

Contenido de N en "i" = $m_{s,i} \cdot (\%N_i/100)$

$\% C_i = C/N_{(i)} \cdot \% N_i$

Contenido de C en "i" = $m_{s,i} \cdot (\% C_i/100)$

Para la mezcla de materiales, sean:

R = relación C/N deseada

x = kg del residuo A/ kg del residuo B (b. s.)

$$R = \frac{C}{N_{deseada}} = \frac{\%C_B \cdot m_{s,B} + x \cdot (\%C_A \cdot m_{s,A})}{\%N_B \cdot m_{s,B} + x \cdot (\%N_A \cdot m_{s,A})} \quad [K.1]$$

Operando y despejando x de la ecuación anterior se obtiene:

$$x = \frac{\%N_B * (R - \frac{C}{N_B}) * (1 - \frac{\%H_B}{100})}{\%N_A * (\frac{C}{N_A} - R) * (1 - \frac{\%H_A}{100})} \quad [K.2]$$

Que es la relación entre tipos de RSO buscada.

K.2 Ajuste del contenido de agua (por defecto o exceso)

Durante las experiencias se buscó mantener aproximadamente constante el valor inicial de humedad fijado para cada ensayo. Para determinar los requerimientos de agua adicional (a fin de reponer la cantidad evaporada) se extrajeron muestras periódicamente y se determinó la humedad promedio de la masa en cada momento. La diferencia de valores entre dos registros consecutivos permitió determinar la cantidad de agua evaporada, consumida o generada por la reacción de descomposición biológica del material, en cada caso. Como criterio, cuando la humedad del sustrato se encontraba fuera de la condición de estudio especificada (ya sea por exceso o por defecto), se procedió a realizar los ajustes necesarios.

En la Tabla K.1 se resumen los pasos de cálculo para estimar los requerimientos de agua a adicionar, a fin de restablecer un valor de diseño inicial.

Tabla K.1 Secuencia de cálculo para la estimación del agua adicional.

| | | |
|---|-------------|--|
| Humedad deseable ($\%H_2$, b.h.): | 60 | >> Se fija por condición de estudio |
| Humedad actual ($\%H_1$, b.h.): | 35 | >> Con $H_1 < H_2$, fuera del rango óptimo |
| Humedad a incrementar ($\%$, b.h.): | 25 | >> Calculo $\% H_2 - \% H_1$ |
| Masa húmeda sustrato actual (m_{h1} , kg b.h.): | 10 | >> Registro de pesada del reactor (contenedor + RSO) |
| Masa seca sustrato actual (m_{s1} , kg b.s.) | 6,5 | >> Calculo $m_{h1} \cdot (1 - \% H_2/100)$ |
| Masa de agua actual ($m_{H_2O,1}$, kg): | 3,5 | >> Calculo $m_{h1} - m_{s1}$ |
| Masa húmeda deseable (m_{h2} , kg b.h.): | 16,25 | >> Calculo $m_{s1}/(1 - \% H_2/100)$ |
| Masa de agua a agregar (m_{H_2O}, kg) | 6,25 | >> Calculo $m_{h2} - m_{h1}$ |
| Densidad del agua (ρ_{H_2O} , kg/L): | 1 | >> dato |
| Cantidad de agua a agregar (L): | 6,25 | >> Calculo m_{H_2O}/ρ_{H_2O} |

Para estimar la **cantidad de enmienda a agregar** en caso de necesitar disminuir el contenido de agua de una mezcla, los cálculos se realizan en base a una humedad de diseño deseada ($\%H_2O_{(deseada)}$), despejando x de la siguiente ecuación:

$$m_{h,RSO(1)} \cdot \%H_2O_{(1)} + x \cdot (m_{h,RSO(2)} \cdot \%H_2O_{(2)}) = \%H_2O_{(deseada)} \cdot (m_{h,RSO(1)} + x \cdot m_{h,RSO(2)})$$

Donde:

$$m_{h,RSO(1)} = 1 \text{ kg del residuo o mezcla de sustrato inicial (kg, b.h.)}$$

$\%H_2O_{(1)}$ = Humedad del residuo o mezcla de sustrato inicial (% , b.h.)

x = Relación kg de enmienda / kg de residuo inicial

$m_{h,RSO(2)}$ = 1 kg de enmienda a utilizar (kg, b.h.)

$\%H_2O_{(2)}$ = Humedad de la enmienda (% , b.h.)

Siendo $\%H_2O_{(1)} > \%H_2O_{(2)}$

Apéndice M: Fichas técnicas de las experiencias realizadas

A continuación se presentan las fichas técnicas correspondientes al conjunto de corridas experimentales definitivas llevadas a cabo durante la fase experimental de esta Tesis. Las mismas se encuentran organizadas en “paquetes de corridas experimentales” (es decir, se presenta una ficha por paquete experimental), considerando como tales a aquellos grupos de reactores iniciados el mismo día y operando en paralelo, bajo condiciones de diseño y operativas fijadas en pos de un objetivo común de análisis definido previamente para el conjunto.

Cabe mencionar por último que no se incluyen fichas correspondientes a los ensayos de estudios previos, de repeticiones ni de aquellas consideradas como blanco o control.

FICHA TÉCNICA: Paquete de Corridas Experimentales N° 1Fecha de inicio: Duración (días): Fecha de finalización: **CONDICIONES INICIALES Y DE ESTUDIO:**

| Corrida Exp. N° | Masa inicial (kg, b.h.) | Relación C/N (b. s.) | Humedad inicial (% , b.h.) | Régimen de volteos | Condición de Contorno superior | Temp. Inicial sustrato (°C) |
|-----------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 10,1 | 32,4 | 53,1 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 29,7 |
| 2 | 7,3 | 41,1 | 52 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 29,7 |
| 3 | 10,2 | 48,3 | 56,1 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 29,7 |

MONITOREO TEMPERATURA MÁSCA:Único punto (centro): Varios puntos (perfiles): **OBSERVACIONES VARIAS:**Muestras periódicos: Pesadas periódicas del sustrato remanente: **Objetivo de la experiencia:** Estudio de distintas relaciones C/N.**RSO utilizados:** Estiércol equino, chips de madera y ramas (estructurante), cama de caballo (aserrín con orina), recortes de césped fresco. NOTA: ver la composición completa de las mezclas de cada experiencia en la Tabla 4.5 del Cap. 4.**Parámetros determinados:** % H₂O, %C_{org}, SV, cenizas, pH, N_{org}, Lignina Total.⁽¹⁾ **Práctica de volteos tipo A:** Realizados luego de un pico de temperatura, una vez manifestada una tendencia descendente de la temperatura, los días: 0, 3, 7, 16, 26, 35 y 48.⁽²⁾ La temperatura se midió en 3 puntos de la masa de la pila distribuidos longitudinalmente (frente, centro, fondo). Teniendo en cuenta el sentido vertical, todas las mediciones fueron hechas en el medio de la masa.

FICHA TÉCNICA: Paquete de Corridas Experimentales N° 2Fecha de inicio: Duración (días): Fecha de finalización: **CONDICIONES INICIALES Y DE ESTUDIO:**

| Corrida Exp. N° | Masa inicial (kg, b.h.) | Relación C/N (b. s.) | Humedad inicial (% , b.h.) | Régimen de volteos | Condic. de Contorno superior | Temp. Inicial sustrato (°C) |
|-----------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 4 | 5,25 | 48,7 | 53,9 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 15,9 |
| 5 | 9,1 | 33,8 | 58,2 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 15,9 |
| 6 | 5,25 | 42 | 54,6 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 15,9 |
| 7 | 3,32 | 30,7 | 54,8 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 15,9 |
| 8 | 5,68 | 29 | 50,0 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 15,9 |
| 9 | 3,03 | 31,7 | 54 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 15,9 |

MONITOREO TEMPERATURA MÁSCICA:Único punto (centro): Varios puntos (perfiles): **OBSERVACIONES VARIAS:**Muestreos periódicos: Pesadas periódicas del sustrato remanente:

Objetivo de la experiencia: Estudio de distintas relaciones C/N, así del efecto de la masa crítica inicial. Para esto último se repiten las mismas proporciones de C/N variando la masa de sustrato inicial.

RSO utilizados: Estiércol equino, chips de madera y ramas (estructurante) y paja de trigo.
 NOTA: ver la composición completa de las mezclas de cada experiencia en la Tabla 4.5 del Cap. 4.

Parámetros determinados: % H₂O, %C_{org}, SV, cenizas, pH, N_{org}, Lignina Total.

⁽¹⁾ **Práctica de volteos tipo A:** Realizados luego de un pico de temperatura, una vez manifestada una tendencia descendente de la temperatura, los días: 0, 7, 13, 20, 49 y 71.

⁽²⁾ La temperatura se midió en un único punto ubicado en el centro-medio de la masa de sustrato contenida en el reactor.

FICHA TÉCNICA: Paquete de Corridas Experimentales N° 3Fecha de inicio: Duración (días): Fecha de finalización: **CONDICIONES INICIALES Y DE ESTUDIO:**

| Corrida Exp. N° | Masa inicial (kg, b.h.) | Relación C/N (b. s.) | Humedad inicial (% , b.h.) | Régimen de volteos | Condic. de Contorno superior | Temp. Inicial sustrato (°C) |
|-----------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 10 | 10 | 27,1 | 63,7 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 18,6 |
| 11 | 10 | 27,1 | 65,6 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 18,6 |

MONITOREO TEMPERATURA MÁSCA:Único punto (centro): Varios puntos (perfiles): **OBSERVACIONES VARIAS:**Muestras periódicos: Pesadas periódicas del sustrato remanente:

Objetivo de la experiencia: Para una misma relación C/N, analizar el efecto de la biodegradabilidad o biodisponibilidad de los nutrientes contenidos en los RSO empleados, en condiciones adecuadas para el proceso, y mantenidas aproximadamente constantes.

RSO utilizados: Para ambos: Estiércol equino, chips de madera y ramas (estructurante), paja de trigo. Luego la Exp. N° 10 con recortes de césped fresco, mientras que la 11 con residuos de comida. NOTA: ver la composición completa de las mezclas de cada experiencia en la Tabla 4.5 del Cap. 4.

Parámetros determinados: % H₂O, %C_{org}, SV, cenizas, pH, N_{org}, Lignina Total, granulometría y Test de germinación.

⁽¹⁾ **Práctica de volteos tipo A:** Realizados luego de un pico de temperatura, una vez manifestada una tendencia descendente de la temperatura, según necesidad. Días volteados: 0, 3, 7, 14, 21, 33 y 41.

⁽²⁾ La temperatura se midió en un único punto ubicado en el centro-medio de la masa de sustrato contenida en el reactor.

FICHA TÉCNICA: Paquete de Corridas Experimentales N° 4Fecha de inicio: Duración (días): Fecha de finalización: **CONDICIONES INICIALES Y DE ESTUDIO:**

| Corrida Exp. N° | Masa inicial (kg, b.h.) | Relación C/N (b. s.) | Humedad inicial (% , b.h.) | Régimen de volteos | Condic. de Contorno superior | Temp. Inicial sustrato (°C) |
|-------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 12 ⁽¹⁾ | 10 | 34,2 | 61,5 | Tipo B ⁽²⁾ | abierto | 26,5 |
| 13 | 10 | 31,2 | 67,4 | Tipo B ⁽²⁾ | abierto | 26,5 |
| 14 | 10 | 24,1 | 69,9 | Tipo B ⁽²⁾ | abierto | 26,5 |
| 15 | 10 | 30,5 | 81,6 | Tipo B ⁽²⁾ | abierto | 26,5 |

⁽¹⁾ La experiencia N° 12 continuó su monitoreo hasta cumplirse los 180 días de proceso.**MONITOREO TEMPERATURA MÁSCICA:**Único punto (centro): Varios puntos (perfiles): **OBSERVACIONES VARIAS:**Muestreos periódicos: Pesadas periódicas del sustrato remanente:

Objetivo de la experiencia: (i) Estudiar el efecto de dos relaciones C/N y dos contenidos de humedad inicial (medio vs. en exceso) sobre la performance del proceso. (ii) Estudiar el efecto de una nueva práctica de volteos implementada (tipo B).

RSO utilizados: Estiércol equino, residuos de comida, recortes de césped fresco, paja de trigo y chips de madera y ramas (estructurante). NOTA: ver la composición completa de las mezclas de cada experiencia en la Tabla 4.5 del Cap. 4.

Parámetros determinados: % H₂O, %C_{org}, SV, cenizas, pH, N_{org}, Lignina Total, granulometría y Test de germinación.

⁽²⁾ **Práctica de volteos tipo B:** Frecuencia diaria de volteos (período más activo), independientemente de las necesidades. Se realizaron los días: 0, 1, 2, 3, 4, 7, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 22 y 28.

⁽³⁾ La temperatura se midió en un único punto ubicado en el centro-medio de la masa de sustrato contenida en el reactor.

FICHA TÉCNICA: Paquete de Corridas Experimentales N° 5

Fecha de inicio:

08/03/2010

Duración (días):

20

Fecha de finalización:

28/03/2010

CONDICIONES INICIALES Y DE ESTUDIO:

| Corrida Exp. N° | Masa inicial (kg, b.h.) | Relación C/N (b. s.) | Humedad inicial (% , b.h.) | Régimen de volteos | Condic. de Contorno superior | Temp. Inicial sustrato (°C) |
|-----------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 16 | 10 | 34,2 | 61,5 | Tipo B ⁽¹⁾ | abierto | 31,0 |
| 17 | 7,5 | 34,2 | 61,5 | Tipo B ⁽¹⁾ | abierto | 31,0 |
| 18 | 5 | 34,2 | 61,5 | Tipo B ⁽¹⁾ | abierto | 31,0 |
| 19 | 2,5 | 34,2 | 61,5 | Tipo B ⁽¹⁾ | abierto | 31,0 |
| 20 | 1 | 34,2 | 61,5 | Tipo B ⁽¹⁾ | abierto | 31,0 |

MONITOREO TEMPERATURA MÁSCICA:

Único punto (centro):

Si ⁽²⁾

Varios puntos (perfiles):

OBSERVACIONES VARIAS:

Muestreos periódicos:

Si

Pesadas periódicas del sustrato remanente:

Si

Objetivo de la experiencia: Estudiar el efecto de la masa crítica inicial de sustrato (variando de 1 a 10kg, b. h.), manteniendo el resto de los parámetros y prácticas de gestión de los reactores constantes y dentro de rangos considerados como no limitantes para el proceso.

Se tomó como referencia la composición y condiciones de gestión adoptadas en el ensayo N°12, correspondiente al paquete de corridas experimentales N° 4.

RSO utilizados: Estiércol equino, residuos de comida, recortes de césped fresco, paja de trigo y chips de madera y ramas (estructurante). NOTA: ver la composición completa de las mezclas de cada experiencia en la Tabla 4.5 del Cap. 4.

Parámetros determinados: % H₂O, %C_{org}, SV, cenizas, pH, N_{org}, Lignina Total, granulometría, densidad aparente y Test de germinación.

⁽¹⁾ **Práctica de volteos tipo B:** Frecuencia diaria de volteos, independientemente de las necesidades, los días: 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 14, 18 y 20.

⁽²⁾ La temperatura se midió en un único punto ubicado en el centro-medio de la masa de sustrato contenida en el reactor.

FICHA TÉCNICA: Paquete de Corridas Experimentales N° 6

Fecha de inicio:

Duración (días):

Fecha de finalización:

CONDICIONES INICIALES Y DE ESTUDIO:

| Corrida Exp. N° | Masa inicial (kg, b.h.) | Relación C/N (b. s.) | Humedad inicial (% , b.h.) | Régimen de volteos | Condic. de Contorno superior | Temp. Inicial sustrato (°C) |
|-----------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 21 | 10 | 30,5 | 61,2 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 19,6 |
| 22 | 10 | 30,2 | 63,8 | Tipo A ⁽¹⁾ | cerrado | 19,6 |
| 23 | 10 | 24,4 | 63,9 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 19,6 |
| 24 | 10 | 62,4 | 62,6 | Tipo A ⁽¹⁾ | abierto | 19,6 |
| 25 | 10 | 20,9 | 66,0 | Tipo A ⁽¹⁾ | cerrado | 19,6 |

MONITOREO TEMPERATURA MÁSCA:

Único punto (centro):

Varios puntos (perfiles):

OBSERVACIONES VARIAS:

Muestreos periódicos:

Pesadas periódicas del sustrato remanente:

Objetivo de la experiencia: Estudiar el efecto de la composición inicial y de las condiciones de contorno superior (abierto versus adiabático) sobre la performance general de cada reactor, manteniendo el resto de los parámetros y prácticas de gestión aproximadamente constantes durante el proceso, y dentro de rangos no limitantes para el mismo.

RSO utilizados: Estiércol equino, residuos de comida, recortes de césped fresco, paja de trigo y chips de madera y ramas (estructurante). NOTA: ver la composición completa de las mezclas de cada experiencia en la Tabla 4.5 del Cap. 4.

Parámetros determinados: % H₂O, %C_{org}, SV, cenizas, pH, N_{org}, Lignina Total, granulometría, densidad aparente y Test de germinación.

⁽¹⁾ **Práctica de volteos tipo A:** Realizados luego de un pico de temperatura, una vez manifestada una tendencia descendente de la temperatura, los días: 0, 2, 6, 9, 10, 30, 91 y 157.

⁽²⁾ La temperatura se midió en 6 puntos: longitudinalmente, en el borde (frente) y el centro de la masa de sustrato; transversalmente a 3 profundidades (sub-superficial, medio y fondo).

FICHA TÉCNICA: Paquete de Corridas Experimentales N° 7Fecha de inicio: Duración (días): Fecha de finalización: **CONDICIONES INICIALES Y DE ESTUDIO:**

| Corrida Exp. N° | Masa inicial (kg, b.h.) | Relación C/N (b. s.) | Humedad inicial (% , b.h.) | Régimen de volteos | Condic. de Contorno superior | Temp. Inicial sustrato (°C) |
|-----------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 26 | 10 | 22 | 67,2 | Tipo B ⁽¹⁾ | abierto | 18,8 |
| 27 | 10 | 20 | 66,8 | Tipo B ⁽¹⁾ | abierto | 18,8 |
| 28 | 10 | 24,4 | 65,4 | Tipo B ⁽¹⁾ | abierto | 18,8 |

MONITOREO TEMPERATURA MÁSCA:Único punto (centro): Varios puntos (perfiles): **OBSERVACIONES VARIAS:**Muestreos periódicos: Pesadas periódicas del sustrato remanente:

Objetivo de la experiencia: Estudiar el efecto de la forma geométrica de la pila (y su superficie superior externa expuesta al ambiente) sobre la performance general de cada reactor, manteniendo el resto de los parámetros y prácticas de gestión constantes durante el proceso, y dentro de rangos no limitantes para el mismo.

RSO utilizados: Estiércol equino, residuos de comida, recortes de césped fresco, paja de trigo y chips de madera y ramas (estructurante). NOTA: ver la composición completa de las mezclas de cada experiencia en la Tabla 4.5 del Cap. 4.

Parámetros determinados: % H₂O, %C_{org}, SV, cenizas, pH, N_{org}, Lignina Total, granulometría, densidad aparente y Test de germinación.

⁽¹⁾ **Práctica de volteos tipo B:** Realizados cada dos días en el período más activo (1ros 10 días), coincidiendo con el momento de muestreo, los días: 0, 2, 4, 6, 8, 10 y 32.

⁽²⁾ La temperatura se midió en 12 puntos: longitudinalmente, en el borde (frente) y el centro de la masa de sustrato; transversalmente del mismo modo y en cada lugar a 3 profundidades (sub-superficial, medio y fondo).

Apéndice N: Expresiones de cálculo de parámetros característicos del proceso determinados en los ensayos

A continuación se exponen las expresiones de cálculo de los parámetros secundarios estimados a partir de otros parámetros previamente determinados en laboratorio, luego del análisis y procesamiento de las muestras extraídas de los ensayos llevados a cabo durante la fase experimental de esta Tesis, siguiendo las técnicas analíticas informadas en la Tabla H.1 del Apéndice H.

$$\% \text{ SSR}_{(t)} = \left[\frac{m_{S,t}}{m_{S,0}} \right] \cdot 100 \quad [\text{N.1}]$$

$$\% \text{ SSR}_{\text{Bio.}(t)} = \left[\frac{m_{S,\text{Bio.}(t)}}{m_{S,0}} \right] \cdot 100 \quad [\text{N.2}]$$

$$R_{d,(t)} = 100 - \% \text{ SSR}_{(t)} \quad [\text{N.3}]$$

$$\% \text{ C}_{\text{org.}(t)} = \frac{\% \text{ SV}_{(t)}}{1,8} \quad [\text{N.4}]$$

$$mR = \frac{m_{S,t} - m_{S,e}}{m_{S,0} - m_{S,e}} \quad [\text{N.5}]$$

$$\% \text{ SV}_{(t)} = \% \text{ Materia Orgánica} = 100 - \% \text{ X} \quad [\text{N.6}]$$

$$m_{S,\text{Bio.}(t)} = m_{S,t} - m_{X,t} - m_{\text{LT}(t)} \quad [\text{N.7}]$$

$$C_{\text{Bio.}(t)} = m_{S,t} - m_{X,t} - m_{\text{LT}(t)} - m_{\text{Norg},t} \quad [\text{N.8}]$$

$$\% \text{ Pérdida } N_{T(t)} = 100 - 100 \left[\frac{X_{(0)} \cdot N_{T(t)}}{X_{(0)} \cdot N_{T(0)}} \right] \quad [\text{N.9}]$$

$$\%Pérdida C_{org(t)} = 100 - 100 \left[\frac{X_{(t)} \cdot C_{org(t)}}{X_{(t)} \cdot C_{org(0)}} \right] \quad [N.10]$$

$$\%Incremento L_{T(t)} = \left[\frac{L_{T(t)} - L_{T(0)}}{L_{T(0)}} \right] \cdot 100 \quad [N.11]$$

$$\%Incremento Neto X_{(t)} = \left[\frac{X_{(t)} - X_{(0)}}{X_{(0)}} \right] \cdot 100 \quad [N.12]$$

$$\%Incremento Neto N_{T(t)} = \left[\frac{N_{T(t)} - N_{T(0)}}{N_{T(0)}} \right] \cdot 100 \quad [N.13]$$

$$\%IG = \% \text{ Índice de Germinación} = \left[\frac{\%GRS \cdot \%CRR}{100} \right] \quad [N.14]$$

Donde:

$$m_{s,t} = m_{h,t} \cdot \left(1 - \frac{\%H_2O_{(t)}}{100} \right) \quad [N.15]$$

$$\%H_2O_{(t)} = \frac{m_{h,t} - m_{s,t}}{m_{h,t}} \cdot 100 \quad [N.16]$$

$$m_{Norg,t} = m_{s,t} \cdot \% N_{org(t)} \quad [N.17]$$

$$\% X_{(t)} = \% \text{ Cenizas}_{(t)} = \left[\frac{m_{X(t)}}{m_{s,t}} \right] \cdot 100 \quad [N.18]$$

$$\begin{aligned} \%GRS &= \text{Germinación Relativa de Semillas} = \\ &= \left[\frac{\text{N}^\circ \text{ semillas germinadas en el extracto}}{\text{N}^\circ \text{ semillas germinadas en el control}} \right] \cdot 100 \end{aligned} \quad [N.19]$$

$$\begin{aligned} \%CRR &= \text{Crecimiento Relativo de Raíces} = \\ &= \left[\frac{\text{Longitud raíz principal en el extracto}}{\text{Longitud raíz principal en el control}} \right] \cdot 100 \end{aligned} \quad [N.20]$$

El subíndice (0) denota valor inicial del parámetro mientras que el subíndice (t) representa su valor al tiempo t . Por otra parte, $m_{s,e}$ es la masa seca de sustrato que permanece remanente luego de 6 meses a un año de iniciado el proceso (Ekinci et al. 2004 a, c, 2006; Hamerlars 2004; Keener et al. 1993, 1997, 2005; Marugg et al. 1993; Ramírez-Pérez et al. 2007).

En el apartado “nomenclatura” de la Tesis podrán chequearse el significado de los restantes símbolos contenidos en las expresiones anteriores.

Apéndice O: Ejemplo de la evolución típica de las principales variables monitoreadas y parámetros fisicoquímicos determinados durante los ensayos.

A continuación se presenta un ejemplo de datos experimentales típicos derivados de los muestreos y monitoreos llevados a cabo durante los ensayos de esta Tesis.

En una primer parte, se transcriben extractos de la sección de “materiales y métodos” y “resultados y discusión” del trabajo titulado: “Efectos de la geometría de la pila sobre la etapa termofílica del compostaje de Residuos Sólidos Orgánicos (RSO)” (A. R. Prono y C. A. Martín), que fuera presentado en el Congreso Argentina Ambiental 2012, realizado en la ciudad de Mar del Plata.

Finalmente en una segunda parte, se presentan datos complementarios de los mismos ensayos pero que no fueron publicados en dicho trabajo.

Aclaración: el formato de las tablas y de las figuras corresponde al original presentado en el trabajo.

PRIMERA PARTE: Extracto del trabajo publicado Prono y Martín (2012).

De la sección “Materiales y Métodos”

Se realizaron dos corridas experimentales de 32 días de duración cada una, operando en cada caso tres reactores (R1-3) en paralelo.

Composición y RSO utilizados para la formulación del sustrato: estiércol equino (60 % en peso), recortes de césped (10 % en peso), restos de comida (20 % en peso), paja de trigo chipeada y chips de madera (5 % en peso cada una). En todos los casos el % en peso informado es en base húmeda. En la Tabla 1 se detalla la caracterización fisicoquímica del material utilizado en los ensayos por reactor (promedio de las dos corridas experimentales).

Tabla 1 Propiedades fisicoquímicas iniciales del sustrato por reactor ⁽¹⁾

| | Humedad [%, b. h.] | Relación C/N | N _{org} [%, b. s.] | pH | Sól. Volátiles [%, b. s.] | Cenizas [%, b. s.] | Lignina [%SV, b. s.] |
|-----------------|--------------------|--------------|-----------------------------|------------|---------------------------|--------------------|----------------------|
| R1 | 67,2 | 25,0 | 2,2 | 7,7 | 88,6 | 11,4 | 24,3 |
| R2 | 66,8 | 24,6 | 2,5 | 7,2 | 88,4 | 11,6 | 22,7 |
| R3 | 65,4 | 24,4 | 2,0 | 7,8 | 88,2 | 11,8 | 25,6 |
| Promedio | 66,5 | 24,7 | 2,2 | 7,6 | 88,4 | 11,6 | 24,2 |

⁽¹⁾ Los valores informados en la tabla son el promedio de determinaciones realizadas por triplicado.

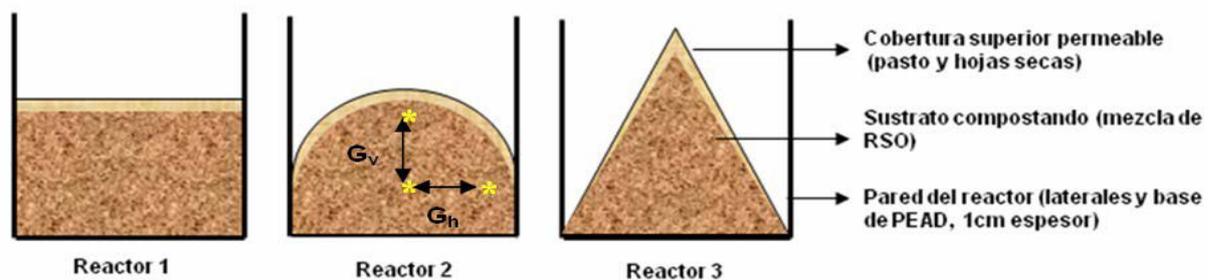


Figura 1 Formas geométricas de las pilas utilizadas en los ensayos. Referencias: *: Puntos de monitoreo de la temperatura másica (similar en los tres formatos). G_v y G_h : gradientes vertical y horizontal de temperatura, respectivamente.

Tabla 2 Características geométricas de las pilas a compostar

| | R1 | R2 | R3 |
|---|-------------|----------------|------------|
| Forma geométrica pila | rectangular | semicilíndrica | triangular |
| Área superficial expuesta [m ²] | 0,180 | 0,280 | 0,210 |
| A/V (área total/volumen), [m] | 23,0 | 22,5 | 19,7 |
| H_{\max} (altura máxima inicial), [m] | 0,245 | 0,287 | 0,315 |

Parámetros determinados: humedad, pH, N_T , % C_{org} , % SV y % X (cenizas), relación C/N, L_T (lignina total), e IG (Índice de Germinación). Además se realizaron pesadas sucesivas de cada reactor a lo largo de los ensayos y se estimó la descomposición del material orgánico en base al cálculo del % SSR (sólidos secos remanentes), el mR (grado de avance del proceso) y el % Pérdidas de N_T (corregido por el % de cenizas). Se midió en cada reactor la temperatura (T) y la humedad relativa varias veces al día y durante toda la extensión de cada experiencia, en distintos puntos de la masa, así como en la sala del laboratorio (T_{ref}) donde estaban dispuestos los reactores.

De la sección “Resultados y discusión”

En la siguiente Tabla 3 y Figura 2 (a, b y c) se encuentran sintetizados los principales resultados obtenidos del monitoreo y muestreo realizado a los distintos tratamientos estudiados.

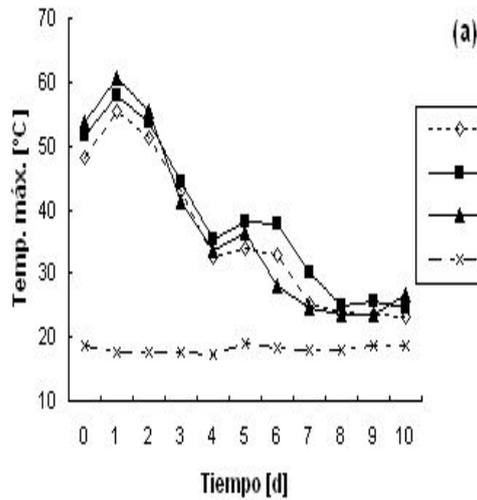


Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos

| | R1 | R2 | R3 |
|----------------------------------|------|------|------|
| Agua total evaporada [kg] | 3,81 | 4,31 | 4,30 |
| Pérdidas NT (prom.) [%, b.s.] | 26,0 | 34,1 | 27,1 |
| Reducción másica [%, b.s.] | 44,6 | 50,3 | 50,4 |
| % IG (índice de germinación) | 86,2 | 75,3 | 70,2 |
| T _{máx} alcanzada [°C] | 55,3 | 58 | 60,8 |
| Extensión etapa termofílica [hs] | 48,0 | 56,3 | 49,0 |

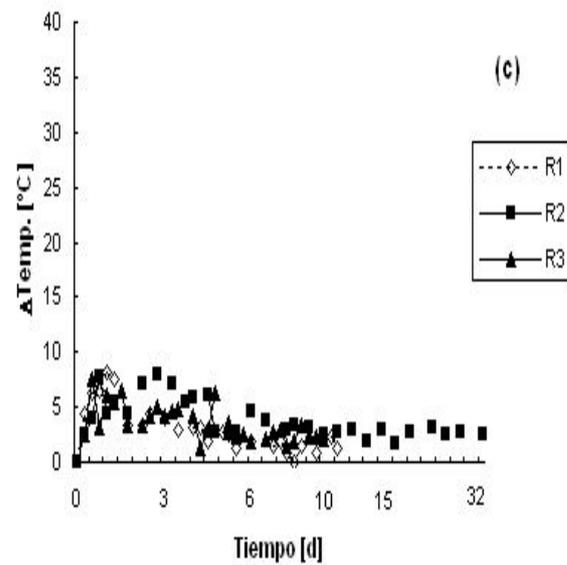
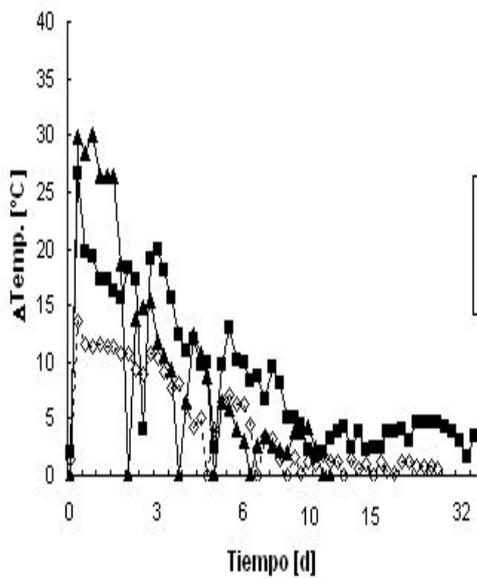


Figura 2. (a) Evolución de la Temperatura máxima; (b) Gradientes horizontales (G_h); y (c) Gradientes verticales (G_v) de temperatura en los distintos formatos de pila estudiados.

Se estimaron pérdidas de calor de 64,3 kcal/d para R1 y 72,7 kcal/d para R2 y R3.

SEGUNDA PARTE: Datos experimentales complementarios correspondientes a los mismos ensayos, pero no publicados en el trabajo citado.

Se presentan para cada parámetro o variable, el valor promedio de los dos paquetes de ensayos considerados.

Tabla O.1 Evolución típica de la masa, contenido de humedad, ST y pH durante los ensayos.

| Día | Masa Remanente (kg, b. h.) | | | % Humedad (b.h.) | | | Sólidos Totales (kg, b.s.) | | | pH (relación 1:10) | | |
|---------------------------------|----------------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|----------------------------|------|------|--------------------|-----|-----|
| | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 |
| 0 | 9,870 | 9,895 | 9,885 | 67,22 | 66,75 | 65,41 | 3,24 | 3,29 | 3,42 | 7,7 | 7,2 | 7,8 |
| 2 | 9,180 | 9,045 | 8,990 | 65,99 | 65,69 | 65,49 | 3,12 | 3,10 | 3,10 | 8,1 | 8,4 | 8,5 |
| 4 | 8,500 | 8,300 | 8,255 | 66,89 | 65,98 | 64,81 | 2,83 | 2,85 | 2,92 | | | |
| 6 | 8,070 | 7,755 | 7,795 | 67,03 | 66,22 | 63,61 | 2,69 | 2,64 | 2,86 | 8,5 | 8,9 | 8,5 |
| 8 | 7,570 | 7,245 | 7,260 | 66,38 | 64,50 | 64,16 | 2,58 | 2,60 | 2,63 | 8,2 | 8,3 | 8,1 |
| 10 | 7,245 | 6,830 | 6,880 | 66,01 | 64,41 | 64,38 | 2,49 | 2,46 | 2,48 | 7,9 | 8,1 | 8,3 |
| 32 | 5 | 5 | 5 | 63,33 | 61,24 | 59,21 | 2,01 | 1,91 | 2,00 | 8,4 | 8,3 | 8,4 |
| Promedio | | | | 66,1 | 65,0 | 63,9 | 38,0 | 42,0 | 41,5 | 8,1 | 8,2 | 8,3 |
| % Total de Reducción alcanzados | 45,5 | 51,0 | 51,4 | | | | | | | | | |

Tabla O.2 Evolución típica de la altura y volumen de una pila de compost, densidad aparente y N_T durante los ensayos.

| Día | Hmáx (cm) | | | Volumen pila (m ³ , b.h.) | | | Densidad RSO (kg/m ³ , b. h.) | | | N _{org} (% b.s.) | | |
|----------|-----------|------|------|--------------------------------------|-------|-------|--|-------|-------|---------------------------|-------|-------|
| | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 |
| 0 | 24,5 | 27,5 | 31,5 | 0,044 | 0,037 | 0,037 | 223,6 | 269,6 | 264,4 | 2,243 | 2,550 | 2,010 |
| 2 | 21,0 | 21,5 | 24,5 | 0,038 | 0,025 | 0,029 | 242,6 | 356,3 | 307,0 | 1,785 | 1,858 | 1,633 |
| 4 | 16,0 | 19,0 | 20,0 | 0,029 | 0,020 | 0,022 | 294,8 | 418,4 | 381,8 | 1,707 | 1,661 | 1,658 |
| 6 | 17,0 | 17,0 | 22,0 | 0,031 | 0,015 | 0,018 | 263,4 | 502,5 | 432,6 | 1,519 | 1,415 | 1,541 |
| 8 | 13,0 | 18,0 | 20,0 | 0,023 | 0,017 | 0,018 | 323,1 | 418,7 | 402,9 | 1,561 | 1,574 | 1,494 |
| 10 | 13,0 | 17,0 | 20,0 | 0,023 | 0,015 | 0,018 | 309,3 | 442,5 | 381,8 | 1,486 | 1,519 | 1,437 |
| 32 | 13,0 | 16,0 | 18,0 | 0,023 | 0,014 | 0,016 | 229,7 | 354,4 | 296,3 | 1,513 | 1,432 | 1,334 |
| Promedio | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| % Total de Reducc. / Increm. Alcanzados | 46,94 | 62,75 | 56,63 | 2,73 | 31,44 | 12,07 | 32,57 | 43,82 | 33,63 |
|--|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|

Tabla O.3 Evolución típica del contenido de Corg, Lignina Total, Cenizas y SV durante los ensayos.

| Día | C _{org} (% b.s.) | | | Lignina Total (% SV) | | | Cenizas (% b.s.) | | | SV (% b.s.) | | |
|---------------------------|---------------------------|-------------|-------------|----------------------|--------------|--------------|------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 |
| 0 | 49,23 | 49,11 | 49,03 | 24,30 | 22,70 | 25,60 | 11,39 | 11,60 | 11,75 | 88,61 | 88,40 | 88,25 |
| 2 | 47,13 | 45,80 | 43,29 | 22,97 | 23,30 | 21,59 | 11,66 | 11,91 | 12,79 | 84,84 | 82,43 | 77,93 |
| 4 | 42,64 | 41,49 | 39,85 | 22,33 | 21,97 | 21,97 | 10,81 | 11,83 | 13,73 | 76,75 | 74,68 | 71,73 |
| 6 | 39,43 | 38,52 | 38,85 | 21,75 | 20,34 | 21,61 | 12,02 | 11,05 | 13,87 | 71,00 | 69,34 | 69,89 |
| 8 | 37,58 | 36,70 | 34,66 | 20,54 | 20,41 | 19,72 | 12,00 | 13,05 | 14,58 | 67,61 | 66,05 | 62,43 |
| 10 | 35,96 | 34,52 | 33,38 | 20,95 | 20,27 | 19,30 | 12,29 | 12,67 | 12,43 | 64,73 | 62,13 | 60,13 |
| 32 | 28,24 | 26,08 | 26,52 | 19,16 | 17,86 | 18,02 | 11,16 | 11,05 | 10,77 | 50,83 | 46,94 | 47,74 |
| Promedio | | | | 21,7 | 21,0 | 21,1 | 11,6 | 11,9 | 12,8 | | | |
| % Reducción Másica | 42,6 | 46,9 | 45,9 | 21,17 | 21,31 | 29,60 | | | | 42,64 | 46,90 | 45,90 |

Tabla O.4 Resultados típicos obtenidos del Test de Germinación.

| TEST DE GERMINACIÓN (t = 32 d) | R1 | R2 | R3 |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| %GRS | 96,4 | 89,1 | 87,3 |
| %CRR | 88,9 | 74,6 | 71,3 |
| %IG | 85,9 | 66,4 | 62,1 |

Apéndice P: Rango de valores de los principales parámetros del modelado del compostaje encontrados en la bibliografía de referencia

Tabla P.1 Rango de valores publicados de los principales parámetros incluidos en los modelos de compostaje.

| Descripción parámetro | Símbolo | Rango de valor | Unidades | Referencia |
|-----------------------------------|------------------|----------------------------------|--|---|
| Capacidad calorífica del agua | $c_{P,H2O}$ | 1 4,1868 | $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$ | Autores varios Higgins et al. (2001). |
| Capacidad calorífica del sustrato | $c_{P,S}$ | 0,87 – 3,58 0,208 – 0,855 | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$ $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ | Barrena et al. (2006); Ghaly et al. (2006); Briski et al. (2007); Mudhoo et al. (2007); Petric et al. (2008); Yu et al. (2008). |
| Calor latente vaporización | ΔH_{vap} | 524,8 – 595,1 2196,9 – 2491,2 | $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | Haug et al. (1993); Keener et al. (1993); Higgins et al. (2001); Barrena et al. (2006); Mason et al. (2009). |
| Calor de combustión del sustrato | ΔH_{rxn} | entre -9401,2 y -24700 | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | Higgins et al. (2001); Weppen et al. (2001); Sundberg (2005); Mudhoo et al. (2007); Kjlement et al. (2008); Petric et al. (2008); Yu et al. (2008). |

| | | | | |
|---|--------------------------------|---|--|--|
| Coef. transferencia convectiva superficial de calor | h | 259,2 – 2009,3 | $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ | Bird et al. (1992); Mason et al. (2009) |
| Coeficiente global de transmisión de calor | U | 50,23 – 150,70 0,5 – 1,5 | $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ | Haug et al. (1993) |
| Coef. estequiométrico formación de agua | $b_{\text{H}_2\text{O}}$ | 0,47 – 0,87 | $(\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{Sólido degr.}}^{-1})$ | Keener et al. (1993); Das et al. (1997); Sundberg (2005). |
| Conductividad térmica sustrato | k_s | 2,59 – 69,98 0,62 – 16,72 | $(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ $(\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ | Seki et al. (1987); Barrena et al. (2006); Ahn et al. (2009). |
| Conductividad térmica efectiva del sustrato | $k_{s,ef}$ | 2,42 – 36,11 | $(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ | Moraga et al. (2009). |
| Densidad aparente | ρ_s | 114 – 707,5 | $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | Keener et al. (1997, 2005); Ekinci et al. (2004); Bari et al. (2005); Barrena et al. (2006). |
| Porosidad sustrato | ε_s | 0,4 – 0,6 | (adimens.) | Keener et al. (1993, 1996); Higgins et al. (2001). |
| Constante cinética global o aparente de degradación de sustrato (pseudo 1º orden) | k_G | 0,0042 – 0,63 | (d^{-1}) | Keener et al. (1993, 1996, 1997); Marugg et al. (1993); Bueno et al. (2008); Eklind et al. (2000); Komilis (2005); Ramirez-Pérez et al. (2007); Mason et al. (2006, 2008). |
| Relación Área/Volumen | $\left(\frac{A_2}{V_R}\right)$ | 0,4 – 3,8 (full escala) y 5,1 – 88 (escalas laboratorio y piloto) | $(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$ | Mason (2005) |
| Temperatura de referencia (sala) | T_{ref} | 0 - 35 | $(^\circ\text{C})$ | Saucedo-Castañeda et al. (1989); Higgins et al. (2001); Ekinci et al. |

| | | | | |
|----------------------------------|-------|---------|------|--|
| Temperatura inicial del sustrato | T_0 | 20 - 70 | (°C) | (2005); Keener et al. (2005); Ramirez-Pérez et al. (2007); Petric et al. (2008). |
|----------------------------------|-------|---------|------|--|

En la tabla anterior puede observarse que muchos de los parámetros intrínsecos al sustrato, es decir, que dependen de su composición y propiedades – tales como la capacidad calorífica, el calor de combustión, conductividad térmica, densidad aparente y constante cinética de degradación –, poseen rangos de valores reportados muy amplios (e. g., para la constante cinética el valor máximo reportado es 150 veces el menor, la conductividad térmica lo es 27 veces, etc.), en comparación con otros parámetros termodinámicos, ambientales y/o del proceso; reflejando de algún modo la variabilidad existente en la materia prima del compostaje, con todas las consecuencias o efectos sobre la evolución del sistema que pueda tener.

Apéndice Q: Validación cualitativa del modelo (simulaciones complementarias)

A continuación se presentan en forma complementaria a lo presentado en el capítulo 6, Resolución y Análisis de Sensibilidad del Modelo, simulaciones con el modelo aún no calibrado que tienen en cuenta los efectos:

Q.1. Sobre la Distribución Espacial y Temporal de la Temperatura ($T_{(x,t)}$) de distintas (a) concentración de sustrato; (b) contenido de agua inicial; y (c) temperatura de referencia; y

Q.2. Sobre la evolución temporal de $[C_{H_2O} / C_{H_2O,0}]$, los efectos de distintos valores de b_{H_2O} .

Q.1 Efecto de condiciones iniciales

(a) Concentración inicial de Sólidos Totales ($C_{s,0}$):

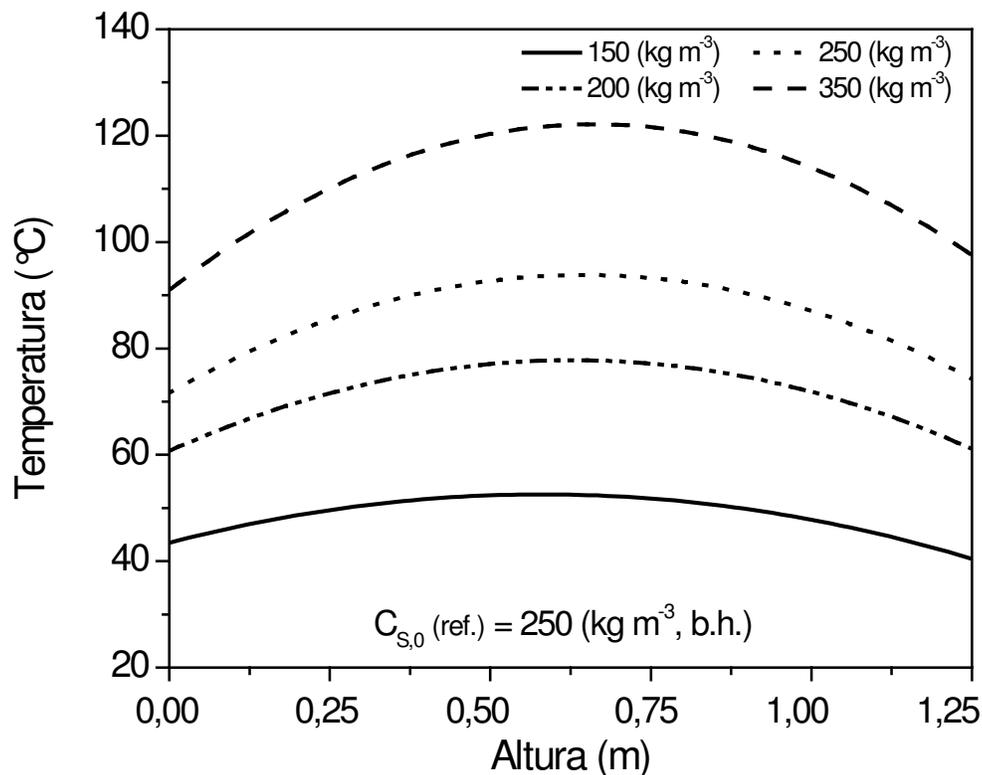


Figura Q.1 Simulación de perfiles de temperatura a distintas concentraciones iniciales de sustrato.

En la figura anterior se observa que, asumiendo volumen constante, a mayor masa inicial por unidad de volumen del sólido se corresponde con una mayor generación de calor elevando los perfiles de temperatura, que se acumula en el centro de la pila (Hot Point ubicado en el eje central de simetría) y, al mismo tiempo, al establecerse un mayor gradiente de temperatura con el ambiente exterior, se pierde más calor a través de la superficie de la pila compostando.

(b) Contenido de agua inicial ($C_{H_2O,0}$):

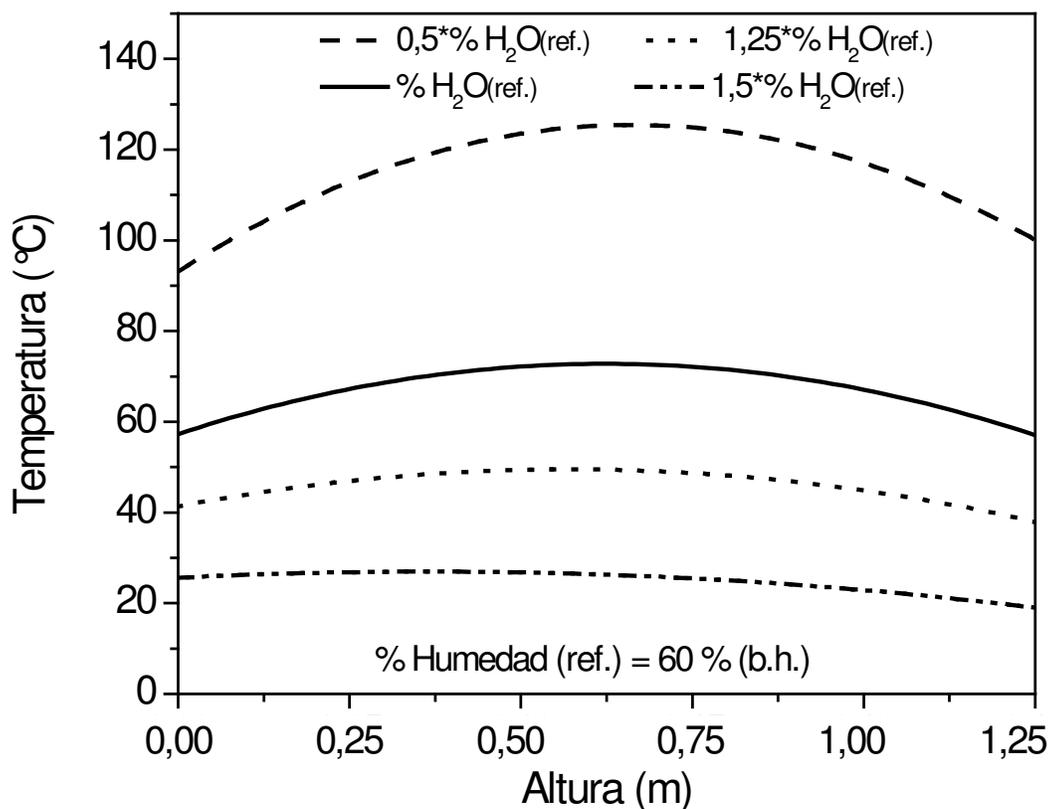


Figura Q.2 Simulación de perfiles de temperatura a distintos contenidos iniciales de agua.

En la Figura anterior puede observarse cómo a medida que se reduce la humedad inicial del sustrato, como era de esperar la temperatura se incrementa en todo el perfil. Esto es factible ya que el calor generado por la reacción, al encontrar menos agua contenida en la masa que evaporar, “está más disponible” y se acumula aumentando la temperatura en todo el sistema (regulado a su vez por las pérdidas de calor que éste pueda tener); ocurriendo lo opuesto si por el contrario el porcentaje de humedad inicial se eleva.

Efecto de la Temperatura de referencia (ambiental):

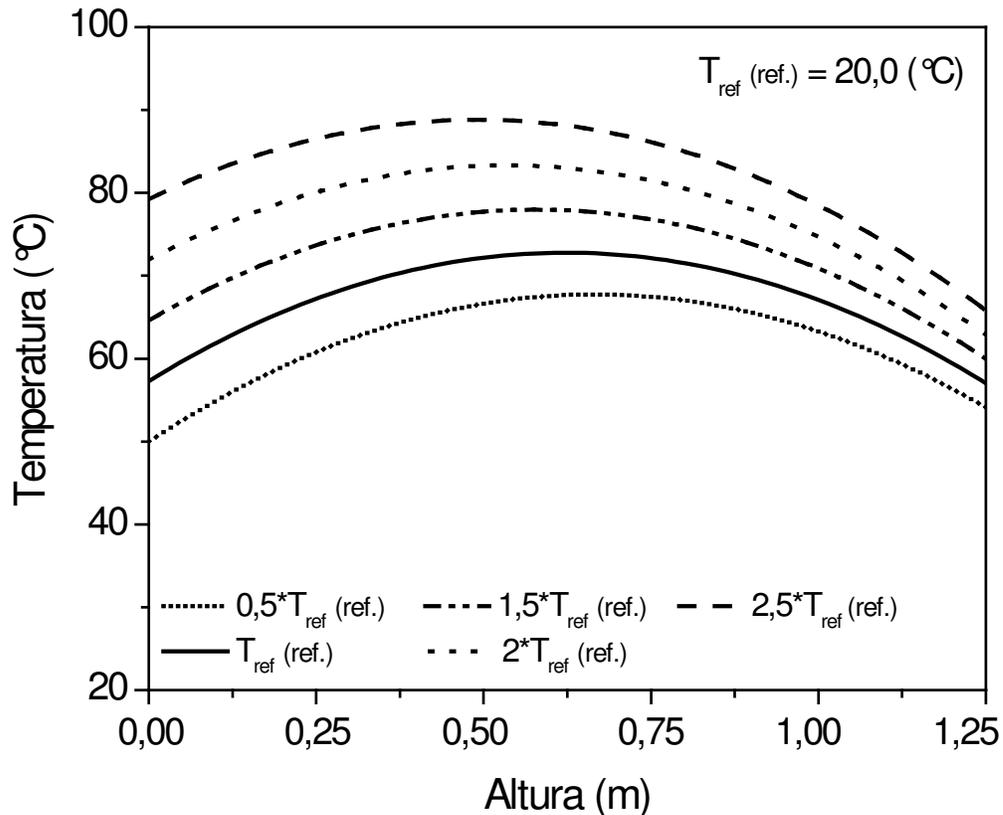


Figura Q.3 Simulación de perfiles de temperatura a distintas temperaturas de referencia.

Finalmente en esta última figura presentada, se verifica la física del problema simulado ya que cuanto menor es temperatura de referencia, a iguales condiciones de diseño y operación, se producen mayores pérdidas de calor hacia el entorno y, por lo tanto, se obtienen temperaturas menores conformando el perfil de esta variable; sucediendo lo contrario en caso de tener una temperatura ambiente mayor.

Cabe señalar que la diferencia en los gradientes de temperatura que se observa en un extremo y otro de la pila, se encuentra asociada a los distintos valores asumidos para el (h_i) en cada condición de borde.

Q.2 Efecto de distintos valores de b_{H_2O}

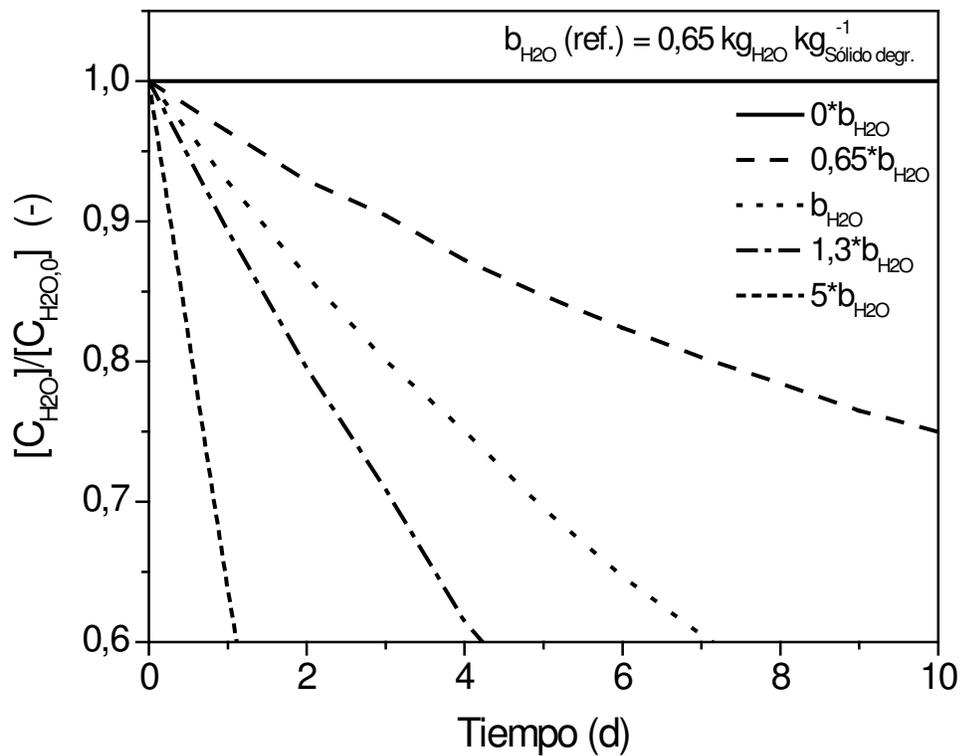


Figura Q.4 Simulación de la evolución temporal de $[C_{H_2O} / C_{H_2O,0}]$ para distintos valores de b_{H_2O} tomando $x_{\text{evap}} = 3,5$.

Debido a que el sistema es abierto y existe evaporación de agua, en la Figura Q.4 se observa cómo $[C_{H_2O} / C_{H_2O,0}]$ al aumentar el valor del coeficiente, si bien se genera proporcionalmente más agua, por el efecto combinado de la generación química y la evaporación física de este componente, se pierde 3.5 veces más agua que la generada, por lo que su contenido en el material disminuye en tal proporción.

El conjunto de graficas recién presentadas que complementan a las expuestas en el capítulo 6 de la Tesis, permitió constatar el sentido físico en la respuesta del modelo ante los cambios propuestos en sus parámetros y coeficientes.

Apéndice R: Resultados de simulaciones con el modelo calibrado aplicando distintos valores de h estimados según la expresión de Moraga et al. (2009).

Contando con el modelo calibrado y ya validado para distintas condiciones de contorno, a continuación, en la Tabla R.1 se presentan los resultados de simulación obtenidos aplicando la siguiente expresión de cálculo de h_i publicada en el trabajo de Moraga et al. (2009):

$$h_i = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad [6.1]$$

Tabla R.1 Resultados de simulaciones con el modelo aplicando distintos valores de h_i según expresión publicada en Moraga et al. (2009).

| h_i ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) | v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | T_{max} ($^\circ\text{C}$) | Tiempo con $T \geq 45^\circ\text{C}$ (d) | Tiempo con $T \geq 55^\circ\text{C}$ (d) |
|--|---|--|--|--|
| 117,6 | 0,0 | 59,4 | 6,1 | 3,1 |
| 156,8 | 0,5 | 51,2 | 4,0 | 0,0 |

| | | | | |
|-------|------|------|-----|-----|
| 196,0 | 1,0 | 46,9 | 2,0 | 0,0 |
| 274,5 | 2,0 | 42,1 | 0,0 | 0,0 |
| 352,9 | 3,0 | 39,4 | 0,0 | 0,0 |
| 431,3 | 4,0 | 37,7 | 0,0 | 0,0 |
| 509,7 | 5,00 | 36,6 | 0,0 | 0,0 |
| 588,1 | 6,0 | 35,7 | 0,0 | 0,0 |
| 666,5 | 7,0 | 35 | 0,0 | 0,0 |

Si se comparan los valores calculados del parámetro h_i de la tabla anterior, con los estimados por optimización en la Tesis, ciertamente los primeros resultan más elevados que los segundos. Al respecto, debe señalarse que esta diferencia se debe, más que a un tipo de material o mezclas de RSO utilizadas en los sustratos, a que el modelo propuesto por el autor incorpora en su expresión la velocidad del viento. Por tal motivo, atendiendo a las condiciones en las que se llevaron a cabo los ensayos en esta Tesis (dentro de un laboratorio, con velocidad de viento igual a cero), se justifica dicha diferencia. Pese a estas diferencias, se incluyó dicho planteo en la discusión de los resultados del capítulo 7 (en el 3er. Bloque de aplicaciones), fundamentado en el hecho de poder ilustrar con un ejemplo práctico (la incidencia del viento) el sentido físico del parámetro que se estaba analizando. Y, como se comentó también en el capítulo 7, en la sección

7.2.3 donde se exponen los resultados con la Distribución Espacial y Temporal de la Temperatura ($T \equiv T(\underline{x}, t)$), cuanto mayor es la velocidad del viento, menor es la temperatura máxima que se alcanza en la pila, repercutiendo de igual modo en los restantes indicadores presentados en la tabla anterior.

Apéndice S: Valores del parámetro k_G estimados en forma óptima.

En la siguiente Tabla S.1 se presentan los valores de k_G tanto para tiempos cortos como para tiempos largos, que fueron estimados en forma óptima para cada una de las corridas, mediante el algoritmo de optimización iterativo que utiliza la función “nlinfit” del Statistics Toolbox de Matlab (basada en el método de Levenberg-Marquardt), aplicado para tal fin en esta Tesis.

Tabla S.1 Valores estimados en forma óptima del parámetro k_G .

| Corrida Esp. N° | k_G “a tiempos cortos” (en d^{-1}) | k_G “a tiempos largos” (en d^{-1}) |
|--------------------|--|--|
| 10 | 0,033 | 0,0174 |
| 11 | 0,035 | 0,0187 |
| 12 | 0,049 | 0,0204 |
| 13 | 0,062 | 0,0260 |
| 14 | 0,065 | 0,0420 |
| 15 | 0,033 | 0,0290 |
| 16 | 0,047 | 0,0172 |
| 21 | 0,042 | 0,0075 |
| 22 | 0,018 | 0,0058 |
| 23 | 0,0499 | 0,0086 |
| 24 | 0,0110 | 0,0089 |
| 25 | 0,0302 | 0,0074 |
| 26 | 0,032 | 0,0190 |
| 27 | 0,039 | 0,0220 |
| 28 | 0,038 | 0,0220 |

Apéndice T: Resultados de la evolución de la temperatura máxima medida versus simulada considerando distintos regímenes de volteos.

En la Tabla T.1 se presentan resultados de simulaciones versus datos experimentales de la evolución de la temperatura máxima, tiempo de ocurrencia de la temperatura máxima y tiempos de volteos, y diferencias entre datos medidos y obtenidos con el modelo, considerando distintos regímenes o frecuencias de volteos como los estudiados (Tipo “A” menos frecuentes a Δt variados, y Tipo “B” más frecuentes y a Δt preestablecidos).

Debe señalarse que los datos de temperatura máxima (medida y simulada) con sus respectivos tiempos de ocurrencia así como los de temperatura promedio en la sala, corresponden a los valores medidos/simulados entre un volteo y otro.

Tabla T.1 Evolución de la T_{max} experimental versus simulada aplicando distintos regímenes de volteos.

| Tipo de Régimen de Volteos / Corrida Exp. | $T_{max,exp}$ (°C) | Tiempo ocurrencia $T_{max,exp}$ (d) | T_{ref} promedio (°C) | Tiempo de volteo (d) | $T_{max,sim}$ (°C) | Tiempo ocurrencia $T_{max,sim}$ (d) | ΔT_{max} exp. vs. sim. (°C) | Δ Tiempo ocurrencia exp. vs. sim. (d) |
|---|--------------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Volteos Tipo "A" / Corr. Exp. N° 21 | 54,5 | 0,46 | 19,5 | | 53,15 | 0,46 | 1,35 | 0,00 |
| | | | | 2,29 | | | | |
| | 47,3 | 3,01 | 20,6 | | 42,5 | 3,08 | 4,80 | -0,08 |
| | | | | 4,17 | | | | |
| | 35,5 | 4,22 | 23,2 | | 30,3 | 4,30 | 5,20 | -0,08 |
| | | | 6,21 | | | | | |
| | 24,6 | 6,46 | 19,5 | | 25,6 | 7,45 | -1,00 | -0,99 |
| | | | | 9,29 | | | | |
| | 22,5 | 10 | | | 23,4 | 10 | -0,90 | 0,00 |
| Volteos Tipo "B" / Corr. Exp. N° 16 | 66,5 | 0,35 | 30,2 | | 67,0 | 0,43 | -0,50 | -0,54 |
| | | | | 1,17 | | | | |
| | 66,5 | 1,30 | 29,4 | | 66,1 | 1,40 | 0,40 | -0,50 |
| | | | | 2,08 | | | | |
| | 67,9 | 2,38 | 28,4 | | 68,0 | 2,38 | -0,10 | 0,00 |
| | | | | 3,05 | | | | |
| | 64,6 | 3,38 | 27,7 | | 62,9 | 3,38 | 1,70 | 0,00 |
| | | | 4,08 | | | | | |
| | 52,2 | 5,10 | 25,7 | | 54,6 | 5,10 | -2,40 | 0,00 |
| | | | | 6,25 | | | | |
| | 45,1 | 6,85 | 25,2 | | 47,4 | 7,03 | -2,30 | -0,18 |

| | | | | | | | |
|------|-------|----|-------|------|-------|-------|-------|
| | | | 7,79 | | | | |
| 43,4 | 8,29 | 24 | | 40,5 | 9,25 | 2,90 | -0,96 |
| | | | 14,89 | | | | |
| 32,4 | 15,21 | 25 | | 33,7 | 15,90 | -1,30 | -0,69 |

Observando los datos de la tabla anterior, como se comentó en el cuerpo del capítulo 7 (segundo bloque, sección 7.2.3 BET Puntual: Distribución Espacial y Temporal de la Temperatura ($T \equiv T(\underline{x}, t)$), apartado c), puede apreciarse cómo con los sucesivos volteos, independientemente de la frecuencia implementada, la temperatura másica disminuye con el tiempo, y se aproxima a la temperatura de la sala o ambiente. Se destaca también la buena precisión del modelo, ya que si se calcula la raíz del error cuadrático medio porcentual resulta en 8,44 % considerando la diferencia de T_{\max} para el volteo tipo A, en 3,80 % para el volteo tipo B; y en 7,01 % si se tiene en cuenta la diferencia en el tiempo de ocurrencia para el volteo tipo A, siendo de 9,60 % para el correspondiente al tipo B. Por otro lado, la diferencia máxima en grados entre la T_{\max} medida versus simulada, resultó de 5,2 °C para el régimen de volteos tipo “A”, y de 2,9 °C para el de tipo “B”.

Nomenclatura

Nomenclatura

A = Área o superficie, en (m^2)

b = Ancho de la pila, en (m)

$b_{\text{H}_2\text{O}}$ = Coeficiente estequiométrico para el agua formada en la reacción de descomposición del sólido, en $(\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{Sól. degr.}}^{-1})$

C = Concentración, en $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$

C = Carbono, en $(\%, \text{b.s.})$

c_p = Capacidad calorífica específica a presión constante, en $(\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$

f_{O_2} = Función de ajuste semi-empírica para el oxígeno (adimens.)

\underline{g} = Aceleración de la gravedad, en $(\text{m} \cdot \text{d}^{-2})$

H , R = Altura máxima de la pila, en los sistemas de coordenadas cartesiano y cilíndrico, respectivamente, en (m)

H = Hidrógeno, en $(\%, \text{b.s.})$

H_{rxn} = Entalpía de la reacción de descomposición del sólido, en $(\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1})$

h = Coeficiente de transmisión pelicular de calor, en $(\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$

k = Conductividad térmica, en $(\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$

k = Constante cinética de pseudo 1° orden (d^{-1})

l = Largo de la pila, en (m)

L = Lignina, en (% b.s.)

L_v, L_c = Calor latente de vaporización o de condensación, en ($\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$)

m = Masa total, en (kg, b.h.)

N = Nitrógeno, en (% b.s.)

O = Oxígeno, en (% b.s.)

p = Presión atmosférica, en ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)

\underline{q} = Densidad de flujo de calor, en ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

R_i = Velocidad de la reacción química del componente "i" del sistema, en ($\text{kg componente "i"} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

R_d = Relación de degradación (adimens.)

S = Azufre, en (% b.s.)

T = Temperatura, en ($^{\circ}\text{C}$)

$\underline{\underline{T}}$ = Tensor de tensiones, en ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-2}$)

t = Tiempo, en (d)

U = Coeficiente global de transmisión de calor, en ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

\underline{v} = Velocidad, en ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)

V_R = Volumen material, en (m^3)

x_j = Coeficiente empírico de proporción (adimens.)

x_i = Fracción másica del componente “i” del sistema (adimens.)

X = Contenido de cenizas, en (% , b.s.)

$\langle \psi \rangle_{V_R}$ = Promedio de la propiedad “ ψ ” en el volumen material

Símbolos griegos

β = Coeficiente térmico de expansión volumétrica, en ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

β = Fracción de material que permanece luego de un período de estabilización (adimens.)

Δ = Variación (adimens.)

ε = Porosidad (adimens.)

ρ = Densidad, en base húmeda, en ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

$\underline{\underline{\tau}}$ = Tensor de esfuerzo viscoso, en ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-2}$)

ϕ = Término fuente o sumidero de calor, en ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

Ω = Término fuente o sumidero de materia asociado a procesos físicos dentro del sistema ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

Subíndices:

aire = Aire

Bio = Biodegradable

c = Condensación

e = Porción recalcitrante o de “equilibrio” del sólido

$evap$ = Evaporación

ef = Efectiva

G = Global o aparente

i = Componente del sistema (sólido reactivo, agua, oxígeno)

H_2O = Agua

j = Proceso físico (evaporación, condensación) o tipo de incorporación externa de agua al sistema (riego, lluvia)

max = Máxima

n = Tipo de área del volumen material en contacto con paredes del reactor o con el ambiente externo (1: base; 2: superficie superior; 3: superficies laterales, 4: base y superficies laterales)

org = Orgánico

O_2 = Oxígeno

ref = Referencia

rxn = Reacción de descomposición del sólido

s = Sólidos totales

S = Sustrato (en base húmeda, sólidos totales + contenido de agua)

T = Total

v = Vaporización

Supra índices:

R = Radiación

0 = Condición inicial

(+) = Incorpora

(-) = Pierde

Abreviaturas y Siglas:

b.h. = Base húmeda

b.s. = Base seca

CC = Capacidad de campo, en $(\% \text{ volumen H}_2\text{O} \cdot \text{volumen RSO}^{-1})$

ENGIRS = Estrategia Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos

FAS = Free Air Space = Espacio libre de aire, en $(\%)$

GEIs = Gases de efecto invernadero

GIRSU = Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos

IG = Índice de Germinación, en $(\%)$

MDSyMA = Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente de la Nación

mR = Avance de proceso (adimens.)

RSO = Residuo Sólido Orgánico

RSU = Residuos Sólidos Urbanos

SAyDS = Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación

SDSyPA = Secretaría de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental de la
Provincia de Buenos Aires, Argentina

SENASA = Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agro-Alimentaria

Argentina

SNV = Sólidos no volátiles, en (% , b.s.)

SSR = Sólidos secos remanentes, en (%)

ST = Sólidos totales, en (% , b.s.)

SV = Sólidos volátiles, en (% , b.s.)

U.S.E.P.A. = United States Environmental Protection Agency

Bibliografía

Bibliografía

1. Adani, F.; Tambone F. y Gotti A. 2004. Biostabilization of municipal solid waste. *Waste Management* 24: 775-783.
2. AFNOR. 2005. Dénominations, spécifications et marquage. Pr NF U 44-051. Association Française de Normalisation. (Organic soil improvers: Designations, specifications and making. Sludge is excluded).
3. Ahn, H.K.; Richard T.L. y Choi H.L. 2007. Mass and thermal balance during composting of a poultry manure – Wood shavings mixture at different aeration rates”. *Process Biochemistry* 42: 215–223.
4. Ahn, H.K.; Sauer T.J.; Richard T.L. y Glanville T.D. 2009. Determination of thermal properties of composting bulking materials. *Bioresource technology* 100: 3974-3981.
5. Albuquerque J.A.; McCartney D.; Yu S.; Brown L. y Leonard J.J. 2008. Air space in composting research: a literature review. *Compost Science & Utilization* 16 (3): 159-170.
6. Alexander P.D. 2007. Effect of turning and vessel type on compost temperature and composition in backyard (amateur) composting. *Compost Science & Utilization* 15 (3): 167-175.
7. Annan J.S. 1998. Evaluation of techniques for measuring air filled porosity in composts of municipal biosolids and wood chips. AWARE Environmental, Inc. Charlotte, North Carolina, pp. 88-96.
8. Australian Standard. 2003. Compost, soil conditioners and mulches. Appendix F. AS 4454-2003. Standard Australian International Ltd., Sidney, Australia.
9. Avenell C.S.; Sainz-Diaz C. y Griffiths A. 1996. Solid waste pyrolysis in a pilot-scale batch pyrolyser. *Fuel* 75 (10): 1167-1174.
10. Bach P.D.; Nakasaki K.; Shoda M. y Kubota H. 1987. Thermal balance in composting operations. *Journal of Fermentation Technology* 65 (2): 199-209.

11. Banegas V.; Moreno JL; Moreno JI; García C.; León G y Hernández T. 2007. Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust. *Waste Management* 27: 1317-1327.
12. Bari Q.H. 2011. A mathematical model for forced aeration composting: effect of air reuse and initial moisture content. 4th Annual Paper Meet and 1st Civil Engineering Congress, December 22-24, 2011, Dhaka, Bangladesh ISBN: 978-984-33-4363-5. Noor, Amin, Bhuiyan, Chowdhury and Kakoli (eds).
13. Bari Q.H. y Koenig A. 2001. Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste. *Resources Conservation & Recycling* 33: 93-111.
14. Bari Q.H. y Koenig A. 2005a. Multi-layer mathematical model of composting in a closed system: effect of airflow rate on vertical temperature distribution and organic waste degradation. ISWA 2005 World Congress and Exhibition: 6-10.
15. Bari Q.H. y Koenig A. 2005b. Mathematical model of composting in a closed system: effect of airflow rate on vertical temperature distribution. En *Proceeding of the Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*. Sardinia, Italy.
16. Barrena R.; Canovas C. y Sánchez A. 2006. Prediction of temperature and thermal inertia effect in the maturation stage and stockpiling of a large composting mass. *Waste Management* 26: 953–959.
17. Barrena R.; d'Imporzano G.; Ponsá S.; Gea T.; Artola A.; Vázquez F.; Sánchez A. y Adani F. 2009. In search of a reliable technique for the determination of the biological stability of the organic matter in the mechanical–biological treated waste. *Journal of Hazardous Materials* 162: 1065–1072.
18. Barrington S.; Choiniere D.; Trigui, M. y Knight, W. 2002. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses. *Bioresource Technology* 83: 189-194.
19. Barth J. 2006. Status of organic waste recycling in the EU. European Compost Network ECN/ORBIT e.V. – First Baltic Biowaste Conference. Pres. Nr. 01.

20. Basil G.; Mazzarino M.J.; Roselli L. y Letourneau F. 2009. Efecto del compost de biosólidos en la producción de plantines de *Austrocredus chilensis* (ciprés de la cordillera). *Ciencia del Suelo* 27: 49-55.
21. Bernal M.P.; Paredes C.; Sánchez-Monedero M.A. y Cegarra J. 1998a. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology* 63: 91-99.
22. Bernal M.P., Sánchez-Monedero M.A.; Paredes C. y Roig A. 1998b. Carbon mineralization from organic waste at different composting stages during their incubation with soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 69: 175-189.
23. Bernal M.P.; Alburquerque J.A. y Moral R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology* 100: 5444–5453.
24. BioAbfV. 1998. German Bioabfallverordnung, Bundesgesetzblatt G 5702 Bonn 28. Sept. 1998. (revised March 1999). English translation: Utilization of Bio-wastes on land used for agricultural, silvicultural and horticultural purposes.
25. Bird R.B.; Steward W.E. y Lightfoot E.N. 1992. Fenómenos de transporte. Editorial Reverté S. A. Barcelona, España.
26. BOE. 2005. Real Decreto N° 824 sobre Productos Fertilizantes. BOE N° 171, 25592-25669, Ministerio de la Presidencia, España.
27. Bongochgetsakul N. e Ishida T. 2008. A new analytical approach to optimizing the design of large-scale composting systems. *Bioresource Technology* 99: 1630-1641.
28. Branzini A.; Watteau F.; Santos González R.S.; Zubillaga M.S. y Echevarria G. 2009. Distribución de metales pesados en la fracción orgánica e inorgánica de suelos remediados. Libro de actas del X Congreso de Ingeniería Rural y del II del MERCOSUR: “El compromiso de la ingeniería rural con el desarrollo territorial”, Rosario, Argentina, pp. 143-144.
29. Branzini A. y Zubillaga M.S. 2012. Uso de compost de biosólidos en la remediación de suelos. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la*

- Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 271-282.
30. Brinton W.F. 2000. Compost quality, standards & guidelines. Final report. Compost quality in America. Woods End Research Laboratory, Inc., 42 p.
31. Briški V.M.; Vukovic M.; Papa K.; Gomzi Z. y Domanovac T. 2007. Modelling of composting of food waste in a column reactor. *Chemical Papers* 61 (1): 24-29.
32. Bueno P; Yáñez R.; Ariza J. y Díaz M.J. 2008a. Influence of environmental parameters on the composting kinetic of lignocellulosic residues. *Compost Science & Utilization* 16 (2): 132-138.
33. Bueno P.; Tapias R.; López F. y Díaz M.J. 2008b. Optimizing composting parameters for nitrogen conservation in composting. *Bioresource Technology* 99: 5069–5077.
34. Bueno P.; Yáñez R.; Rivera A. y Díaz M.J. 2009. Modelling of parameters for optimization of maturity in composting trimming residues. *Bioresource Technology* 100: 5859–5864.
35. California Compost Quality Council (CCQC). 2001. Compost Maturity, Index, Technical Report. En: www.ccqc.org
36. Cayuela M.L.; Mondini C.; Insam H.; Sinicco T. y Franke-Whittle I. 2009. Plant and animal waste composting: effects of the N source on process performance. *Bioresource Technology* 100: 3097-3106.
37. Chroni C.; Kyriacou A.; Manios T. y Lasaridi K-E. 2009. Investigation of the microbial community structure and activity as indicators of compost stability and composting process evolution. *Bioresource Technology* 100: 3745-3750.
38. Chroni C.; Kyriacou A.; Georgaki I.; Manios T.; Kotsou M. y Lasaridi K. 2009. Microbial characterization during composting of biowaste. *Waste Management* 29: 1520–1525.
39. Cooperband L.R. 2000. Sustainable use of by-products in land management. En: Powers, J.F. & W.A. Dick (Eds.). *Land application of agricultural,*

- industrial, and municipal by-products. SSSA Book Series Nr 6. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, EE.UU. pp. 215-235.
40. Cooperband L. y Good L.W. 2002. Biogenic phosphate minerals in manure: implications for phosphorus loss to surface waters. *Environmental Science Technology* 36: 5075-5082.
41. Cooperband L.R.; Stone A.G.; Fryda M.E. y Ravet J.L. 2003. Relating compost measures of commercial maturity to plant growth. *Compost Science & Utilization* 11: 113-124.
42. Council Directive. 1986. CEC-Council of the European Communities. Council Directive on the Protection of the Environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. 86/278/EEC.
43. Curtis M.J.; Kleiner W.A.; Claassen V.P. y Dahlgren R.A. 2005. Differences in a composted animal waste and straw mixture as a function of three compost methods. *Compost Science and Utilization* 13 (2): 98-107.
44. Curtis M.J. & Claassen V.P. 2009. Regenerating topsoil functionality in four drastically disturbed soil types by compost incorporation. *Restoration Ecology* 17 (1): 24–32.
45. Das K. y Keener H. 1997a. Moisture effect on compactation and permeability in compost. *Journal of Environmental Engineering* 123 (3): 1-7.
46. Das K. y Keener H. 1997b. Numerical model for the dynamic simulation of a large scale composting system. *American Society of Agricultural Engineers* 40 (4): 1179-1189.
47. de Guardia A.; Petiot C. y Rogeau D. 2008. Influence of aeration rate and biodegradability fractionation on composting kinetics. *Waste Management* 28 (1): 73–84.
48. de Guardia A.; Petiot C.; Benoist J.C. y Druilhe C. 2012. Characterization and modelling of the heat transfers in a pilot-scale reactor during composting under forced aeration. *Waste Management* 32 (6): 1091-1105.

49. Desalegn G.; Binner E y Lechner P. 2008. Humification and degradability evaluation during composting of horse manure and biowaste. *Compost Science and Utilization* 16 (2): 90-98.
50. Diambro M.E.; Lillywhite R.D. y Rahn C.R. 2007. The physical, chemical and microbial characteristics of biodegradable municipal waste derived compost. *Compost Science and Utilization* 15 (4): 243-252.
51. Ekinci K. 2001. Theoretical and experimental study in the effects of aeration strategies on the composting process. PhD diss. Columbus, Ohio: Ohio State University, Department of Food, Agricultural, and Biological Engineering.
52. Ekinci K.; Keener H.M.; Michel F.C., Jr. y Elwell D.L. 2004a. Modelling composting rate as a function of temperature and initial moisture content. *Compost Science & Utilization* 12 (4): 356-364.
53. Ekinci K.; Keener H.M. y Akbolat D. 2004b. Effect of thermocouple location on the optimum composting rate. *Biosystems Engineering* 89 (3): 345-353.
54. Ekinci K.; Keener H.M.; Elwell D.L. y Michel F.C., Jr. 2004c. Effects of aeration strategies on the composting process: Part I. Experimental studies. *Transactions of the ASAE* 47 (5): 1-12.
55. Ekinci K.; Keener H.M.; Elwell D.L. y Michel F.C., Jr. 2005. Effects of aeration strategies on the composting process: Part II. Numerical modelling and simulation. *Transactions of the ASAE* 48 (3): 1203-1215.
56. Ekinci K.; Keener H.M. y Akbolat D. 2006. Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation. *Bioresource Technology* 97: 922-932.
57. Eklind Y. y Kirchmann, H. 2000a. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. I: carbon turnover. *Bioresource Technology* 74:115-124.
58. Eklind Y. y Kirchmann, H. 2000b. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: nitrogen turnover and losses. *Bioresource Technology* 74: 125-133.

59. Emino E. y Warman P. 2004. Biological assay for compost quality. *Compost Science and Utilization* 12 (4): 342-348.
60. Eyra M.C. y Rostagno C.M. 1995. Bioconversión de algas marinas de arribazón. Experiencias en Puerto Madryn. Chubut. Argentina. *Naturalia Patagónica Serie Ciencias Biológicas* 3: 29-39.
61. Eyra M.C.; Rostagno C.M. y Defossé G. 1998. Biological evaluation of seaweed composting. *Compost Science and Utilization* 6: 74-81.
62. Eyra M.C.; Defossé G. y Dellatorre F. 2008. Seaweed compost as an amendment for horticultural soils in Patagonia, Argentina. *Compost Science and Utilization* 16: 119-124.
63. Eyra M.C. y Rostagno C.M. 2012. Compostaje de algas marinas: experiencias y perspectivas. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 141-160.
64. Ferreira de Araujo A.S.; de Melo W.J. y Singh R.P. 2010. Municipal solid waste compost amendment in agricultural soil: changes in soil microbial biomass. *Environmental Science Biotechnology* 9: 41-49.
65. Fitzpatrick G.E.; Duke E.R. y Klochmoore A. 1998. Use of compost products for ornamental crop production: research and grower experiences. *Horticultural Science* 33: 941-944.
66. Gajalakshmi S. y Abbasi S.A. 2008. Solid Waste Management by Composting: State of the Art. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 38 (5): 311-400.
67. Ghaly A.E.; Alkoik F. y Snow A. 2006. Thermal balance of in-vessel composting of tomato plant residues. *Canadian Biosystems Engineering* 48: 6.1-6.11.
68. Goldstein N. 1988. To cover or not to cover. *Biocycle*: 34-36.
69. Guerrero C.; Gómez I.; Moral R.; Mataix-Beneyto J. y Hernández T. 2001. Reclamation of a burned forest soil with municipal waste compost:

- macronutrient dynamic and improved vegetation cover recovery. *Bioresource Technology* 76: 221-227.
70. Güereca L.P.; Gassó S.; Baldasano J.M.; Jiménez-Guerrero P. 2006. Life cycle assessment of two biowaste management systems for Barcelona Spain. *Resources, Conservation and Recycling* 49: 32-48.
71. Hamelers H.V.M. 1992. A theoretical model of composting kinetics. Proceedings of the International Composting research Symposium, renaissance Publications, Columbus, OH.
72. Hamelers H.V.M. 2001. A mathematical model for composting kinetics. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen.
73. Hamelers H.V.M. 2004. Modelling composting kinetics: a review of approaches. *Reviews in Environmental Science & Bio / Technology* 3: 331–342.
74. Hansen R.C.; Keener H.M. y Hoitink J.A.H. 1989. Poultry manure composting: An exploratory Study. *Transactions of the ASAE* 32 (6): 2151-2158.
75. Hansen R.C.; Keener H.M.; Marugg C.; Dick W.A. y Hoitink J.H.A. 1993. Poultry manure composting. *Science and Engineering of Composting Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*: 131-153.
76. Hargreaves J.C.; Adl M.S. y Warman P.R. 2008. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environmental* 123: 1-14.
77. Haruta S.; Nakayama T.; Nakamura K.; Hemmi H.; Ishii M.; Igarashi Y. y Nishino T. 2005. Review: Microbial Diversity in Biodegradation and Reutilization Processes of Garbage. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 99 (1): 1–11.
78. Hassen A.; Belguith K.; Jedidi N.; Cherif A.; Cherif M. y Boudabous A. 2001. Microbial characterization during composting of municipal solid waste. *Bioresource Technology* 80: 217-225.

79. Haug R.T. 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Editorial Lewis Publishers, Florida.
80. Heinomen-Tanski H.; Mohaibes M.; Karinen P. y Koivunen J. 2006. Methods to reduce pathogen microorganisms in manure. *Livestock science* 102: 248-255.
81. Higgins C. y Walker L. 2001. Validation of a new model for aerobic organic solids decomposition: simulations with substrate specific kinetics. *Process Biochemistry* 36 (8–9): 875–884.
82. Hobson A.; Frederickson J. y Dise N. 2005. CH₄ and N₂O from mechanically turned windrow and vermicomposting systems following in-vessel pre-treatment. *Waste Management* 25: 345-352.
83. Houot S.; Bodineau G.; Rampon J-N; Annabi M.; Francou C. y Poitrenaud M. 2005. Agricultural use of different residual waste compost – Current situation and experiences in France. Conference “The future of residual waste management in Europe”.
84. Hu Z.; Lane R. y Wen Z. 2009. Composting clam processing waste in a laboratory- and pilot-scale in-vessel system. *Waste Management* 29: 180-185.
85. Hua D.; Liu F.; Li G. y Jiliang T. 2011. Effect of turning and covering techniques on pig manure-straw composting property. *Nongye Gongcheng Xuebao/ Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 27 (12): 210-216.
86. Huang C.; Han L.; Yang Z. y Liu X. 2009. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. *Waste Management* 29: 1793–1797.
87. Huang G.F.; Wong J.W.; Wu Q.T.; Nagar B.B. 2004. Effect of C/N on composting of pig manure with saw dust. *Waste Management* 24: 805–813.
88. Iannotti D.A.; Grebus M.E.; Toth B.L.; Madden L.V. y Hoitink J.A.H. 1994. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality* 23 (6): 1177-1183.

89. Imvinkelried M.B. 2008. Determinación de carbohidratos por HPLC-PAD. Tesina Licenciatura en Química. (FIQ, UNL). Capítulo III: Tratamiento de las muestras y preparación de soluciones.
90. Johnson G.A.; Davis J.G.; Qian Y.L. y Doesken K.C. 2006. Topdressing turf with composted manure improves soil quality and protects water quality. *Soil Science Society of America Journal* 70: 2114–2121.
91. Jones P. y Martin M. 2003. A review of the literature on the occurrence and survival of pathogens of animals and humans in green compost. *The Waste and Resources Action Programme*. ISBN: 1-84405-063-7.
92. Kaiser J. 1996. Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach. *Ecological Modelling* 91: 25-37.
93. Kayhanian M. y Tchobanoglous G. 1993. Innovative two-stage process for the recovery of energy and compost from the organic fraction of municipal solid waste (MSW). *Wat. Science Technology* 27 (2): 133-143.
94. Keener H.M.; Marugg C.; Hansen R.C. y Hoitink J.A.H. 1993. Optimizing the efficiency of composting process. *Science and Engineering of composting design, environmental, microbiological and utilization aspects*: 59-94.
95. Keener H.M.; Elwell D.L.; Das K. y Hansen R.C. 1996. Remix scheduling during composting based on moisture control. *Transactions of the ASAE* 39 (5): 1839-1845.
96. Keener H.M.; Hansen R.C. y Elwell D.L. 1997. Airflow through compost: design and cost implications. *Transactions of the ASAE* 13 (3): 377-384.
97. Keener H. M.; Elwell D.L. y Monnin M.J. 2000. Procedures and equations for sizing of structures and windrows for composting animal mortalities. *Transactions of the ASAE* 16 (6) 681-962.
98. Keener H.M.; Ekinci K. y Michel F.C., Jr. 2005. Composting process optimization – using on/off controls. *Compost Science & Utilization* 13 (4): 288-299.

99. Keener H.M. y Zhao L. 2008. Modified mass balance method for predicting NH₃ emissions from manure N for livestock and storage facilities. *Biosystems Engineering* 99 (1): 81-87.
100. Kjølement E. y Rosiński 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 (18): 8850-8855.
101. Ko J-J.; Shimizu Y.; Ikeda K.; Kim S-K.; Park C-H. y Matsui S. 2009. Biodegradation of high molecular weight lignin under sulfate reducing conditions: Lignin degradability and degradation by-products. *Bioresource Technology* 100: 1622–1627.
102. Koenig A. y Bari Q.H. 2000. Application of self-Heating Test for Indirect estimation of respirometric Activity of Compost: Theory and Practice. *Compost Science & Utilization* 8 (2): 99-107.
103. Komilis D.P. y Ham R.K. 2003. The effect of lignin and sugars to the aerobic decomposition of solid wastes. *Waste Management* 23: 419–423.
104. Komilis D.P. y Ham R.K. 2006. Carbon dioxide and ammonia emissions during composting of mixed paper, yard waste and food waste. *Waste Management* 26: 62-70.
105. Komilis D.P. 2006. A kinetic analysis of solid waste composting at optimal conditions. *Waste Management* 26: 82-91.
106. Kowaljow E. y Mazzarino M.J. 2007. Soil restoration in semiarid Patagonia: Chemical and biological response to different compost quality. *Soil Biology and Biochemistry* 39: 1580-1588.
107. Kowaljow E. y Mazzarino M.J. 2012. Restauración de ecosistemas naturales. Estudio de caso en la estepa patagónica con compost de biosólidos y residuos orgánicos urbanos. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 241-256.
108. Kreith F. y Bohn M.S. 1997. *Principles of Heat Transfer*. Fifth Edition. Editorial PWS Publishing Company.

109. Laos F.; Mazzarino M.J.; Walter I.; Roselli L.; Satti P. y Moyano S. 2002. Composting of fish offal and biosolids in NW Patagonia. *Bioresource Technology* 81: 179-186.
110. Laos F.; Mazzarino M.J. y Satti P. 2012. Aspectos legales del uso de residuos orgánicos. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 56-66.
111. Laos F.; Mazzarino M.J.; Roselli L. y Satti P. 2012. Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 257-270.
112. Larney F.J. y Olson A.F. 2006. Windrow temperatures and chemical properties during active and passive aeration composting of beef cattle feedlot manure. *Canadian Journal of Soil Science* 86 (5): 783-797.
113. Larney F.J. y Hao X. 2007. A review of composting as a management alternative for beef cattle feedlot manure in southern Alberta, Canada. *Bioresource Technology* 98: 3221-3227.
114. Larney F.J.; Olson A.F.; DeMaere P.R.; Handerek B.P. y Tovell B.C. 2008. Nutrient and trace element changes during manure composting at four southern Alberta feedlots. *Canadian Journal of Soil Science* 88 (1): 45-59.
115. Lavado R.S.; Rodríguez M.B. y Taboada M.A. 2005. Treatment with biosolids affects soil availability and plant uptake of potentially toxic elements. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 109: 360-364.
116. Lavado R.S. 2012. Origen del compost, proceso de compostaje y potencialidad de uso. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 3-12.
117. Lavado R.S. y Zubillaga M.S. 2012. Producción de flores de bordura utilizando compost de biosólidos. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.).

- Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 185-194.
118. Leconte C.M.; Mazzarino M.J.; Satti P.; Iglesias M.C y Laos F. 2009. Co-composting rice hulls and/or sawdust with poultry manure in NE Argentina. *Waste Management* 29 (9); 2446-2453.
119. Ley de Presupuestos Mínimos N° 25.916. Gestión integral de residuos sólidos domiciliarios (Decreto Reglamentario N° 1158/04). 2004. Argentina.
120. Ley Nacional N° 20.466. 1973. Reglamentación, contralor de la elaboración, importación, exportación, tenencia, fraccionamiento, distribución y venta de fertilizantes y enmiendas. (Decreto Reglamentario N° 4830 y Resoluciones 244/89, 310/94 y 410/94). Argentina.
121. Ley Nacional N° 24.051. 1992. Residuos Peligrosos (Decreto Reglamentario N° 831/93). Argentina.
122. Ley Provincial N° 13.055. 2009. Basura Cero. Gobierno de la Provincia de Santa Fe, Argentina.
123. Ley Orgánica de Comunas N° 2.439. 1985. Provincia de Santa Fe, Argentina.
124. Ley Orgánica de Municipios N° 2.756. 1985. Provincia de Santa Fe, Argentina.
125. Lima J.; Queiroz J. y Freitas H. 2004. Effect of selected and non-selected urban waste compost on the initial growth of corn. *Resources Conservation & Recycling* 42: 309-315.
126. Lin Y.P.; Huang G.H.; Lu H.W. y He L. 2008. Modeling of substrate degradation and oxygen consumption in waste composting processes. *Waste Management* 28: 1375–1385.
127. López-Zavala M.A.; Funamizu N. y Takakuwa T. 2004. Modeling of aerobic biodegradation of feces using sawdust as a matrix. *Water Research* 38: 1327–1339.

128. Lundgren J. y Pettersson E. 2009. Combustion of horse manure for heat production. *Bioresource Technology* 100: 3121–3126.
129. Lynch J.N.; Gering K.L. y Cherry R.S. 2006. Composting as a Reactor Design Problem Modeling and Experiment. INEL Laboratory Directed Research and Development program. DE-AC07-94ID13223: 290-301.
130. Madejón E.; Perez de Mora A.; Felipe E; Burgos P. y Cabrera F. 2006. Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation. *Environmental Pollution* 139: 40-52.
131. Maekawa E.; Ichizawa T. y Koshijima T. 1989. An evaluation of the acid-soluble lignin determination in analyses of lignin by the sulphuric acid method. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 9 (4): 549-567.
132. Marešová K. y Kollárová M. 2010. Influence of compost covers on the efficiency of biowaste composting process. *Waste Management* 30: 2469–2474.
133. Marugg C.; Grebus M.; Hansen R.C.; Keener H.M. y Hoitink J.A.H. 1993. A kinetic model of the yard waste composting process. *Compost Science & Utilization* 1: 38-51.
134. Mason I. G. y Milke M.W. 2005a. Physical modeling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems. *Waste Management* 25: 481-500.
135. Mason I.G. y Milke M.W. 2005b. Physical modeling of the composting environment: A review. Part 2: Simulation performance. *Waste Management* 25: 501-509.
136. Mason I.G. 2006. Mathematical modeling of the composting process: A review. *Waste Management* 26: 3-21.
137. Mason I.G. 2008. An evaluation of substrate degradation patterns in the composting process. Part 1: Profiles at constant temperature. *Waste Management* 28: 1598–1608.

138. Mason I.G. 2009. Predicting biodegradable volatile solids degradation profiles in the composting process. *Waste Management* 29: 559–569.
139. Mata-Álvarez J.; Macé S. y Llabrés P. 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* 74: 3-16.
140. Mata-Álvarez J. 2002. (Ed.) *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*. IWA Publishing.
141. Mataix Solera, J. 1999. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración. Tesis Doctoral. Facul. Ciencias. Univ. de Alicante, España.
142. Mazzarino M.J.; Satti P. y Roselli L. 2012. Indicadores de estabilidad, madurez y calidad de compost. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 13-28.
143. Mazzarino M.J.; Satti P.; Laos F.; Roselli L.; Crego M.P.; Kowaljew E.; Fernández H. y Poulsen L. 2012. Compostaje de biosólidos: 12 años de la planta de Bariloche. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 99-106.
144. Meima J.A.; Mora Naranjo N. y Haarstricket A. 2008. Sensitivity analysis and literature review of parameters controlling local biodegradation processes in municipal solid waste landfills. *Waste Management* 28: 904–918.
145. Michel F.C., Jr. y Reddy C.A. 1998. Effect of oxygenation level on yard trimmings composting rate, odor production, and compost quality in bench-scale reactors. *Compost Science & Utilization* 4: 6-14.
146. Miller P.A. y Clesceri N.L. 2003. *Waste sites as biological reactors. Characterization and modelling*. Lewis Publishers.
147. Ming L.; Xuya P.; Youcai Z.; Wenchuan D.; Huashuai C.; Guotao L. y Zhengsong W. 2008. Microbial inoculum with leachate recirculated cultivation

- for the enhancement of OFMSW composting. *Journal of Hazardous Materials* 153: 885–891.
148. Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente (MDSyMA). 2001. Resolución 097/01 y Anexos (1 al 5) complementarios. Reglamento para el manejo de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos. Argentina, 20 pp.
149. Monsalve M.; Delgado E.L. y Giraldo E. 2005. Modelación del compostaje de biosólidos en pila estática aireada. Centro de Investigaciones en Ing. Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. ICYA 2001-046.
150. Moraga N.O.; Corvalán F.; Escudey M.; Arias A. y Zambra C.E. 2009. Unsteady 2D coupled heat and mass transfer in porous media with biological and chemical heta generations. *International Journal of Heat and mass Transfer* 52: 5841-5848.
151. Mudhoo A. y Mohee R. 2007. Overall heat transfer coefficients in organic substrates composting. *Journal of Environmental Informatics* 9 (2): 87-99.
152. Muñoz Ratto E. 1999. Proyecto de reglamentación para la valorización agrícola de biosólidos y residuos urbanos. Actas Seminario sobre Disposición de Biosólidos. International Water Association y AIDIS Argentina. Buenos Aires, Argentina.
153. Nakasaki K. y Ohtaki A. 2002. A Simple Numerical Model for Predicting Organic Matter Decomposition in a Fed-Batch Composting Operation. *Journal of Environmental Quality* 31: 997-1003.
154. Nakasaki K.; Hong Tran L.T.; Idemoto Y.; Abe M. y Palenzuela Rollon A. 2009. Comparison of organic matter degradation and microbial community during thermophilic composting of two different types of anaerobic sludge. *Bioresource Technology* 100: 676-682.
155. Nallathambi G.V. 1997. Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass and Bioenergy* 13 (1-2): 83-114.

156. Namiot G.; Basil G.; De Errasti M.D.; Contardi L. y Rovere A.E. 2012. Producción de plantines de arbóreas nativas. Experiencias con ciprés de la cordillera. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 195-208.
157. Neklyudov A.D.; Fedotov G.N. y Ivankin A.N. 2008. Intensification of composting processes by aerobic microorganisms: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology* 44 (1): 6-18.
158. Nelson M.I.; Marchant T.R.; Wake G.C.; Balakrishnan E. y Chen X.D. 2007. Self-heating in compost piles due to biological effects. *Chemical Engineering Science* 62: 4612–4619.
159. O'Dell R.; Silk W.; Green P y Claassen V. 2007. Compost amendment of Cu-Zn minespoil reduces toxic bioavailable heavy metal concentration and promotes establishment and biomass production of *Bromus carinatus* (Hook and Arn.). *Environmental Pollution* 148: 115-124.
160. Ozisik M. N. 1980. *Heat Conduction*. J. Wiley, New York.
161. Palmisano A.C. y Barlaz M.A. 1996. *Microbiology of solid waste*. Series editor Russell H. Vreeland. Editorial CRC, Florida.
162. Parkinson R.; Gibbs P.; Burchett S. y Misselbrook T. 2004. Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure. *Bioresource Technology* 91: 171-178.
163. Penido Monteiro J.E. y Mansur J.L. 2006. (Ed.) *Manual de Gestión Integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina y el Caribe*. 1^º Edición. Río de Janeiro, Instituto Brasileño de Administración Municipal (IBAM).
164. Peralta E.; González R.; von Haefen G.; Comino A.; Gayoso G.; Vergara S.; Genga G. y Scagliola M. 2002-2003. Experiencia piloto de compostaje de barros primarios cloacales de Mar del Plata. Publicado en tres

- partes en revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 1º Parte 64: 44-50; 2º Parte 65: 49-53, 3º Parte 66: 41-47.
165. Petiot C. y de Guardia A. 2004. Composting in Laboratory Reactor: a review. *Compost Science & Utilization* 12 (1): 69-79.
166. Petric I. 2008. Aerobic Composting of Poultry Manure and Wheat Straw-Kinetic and Reactor Model. *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 6, article A95: 1-40.
167. Petric I. y Selimbaic V. 2008. Development and validation of mathematical model for aerobic composting process. *Chemical Engineering Journal* 139: 304–317.
168. Petric I.; Šestan A. y Šestan I. 2009a. Influence of initial moisture content on the composting of poultry manure with wheat straw. *Biosystems Engineering* 104 (1): 125-134.
169. Petric I.; Šestan A. y Šestan I. 2009b. Influence of wheat straw addition on composting of poultry manure. *Process Safety and Environmental Protection* 87 (3): 206-212.
170. Prono A.R. 2005. "Diseño De Un Sistema De Gestión Y Procesamiento De Residuos Sólidos Urbanos Para La Localidad De Recreo, Provincia De Santa Fe". Proyecto Final de Carrera de Ing. Ambiental (FICH, UNL).
171. Prono A.R. 2010. Contribución Personal al Proyecto de Norma "Reglamento Para El Registro De Fertilizantes, Enmiendas, Sustratos, Acondicionadores, Protectores Y Materias Primas En La Republica Argentina". Consulta pública realizada por el SENASA.
172. Prono A.R.; Martín C.A. y Mazzarino M.J. 2011. Efectos de la relación C/N y el contenido de humedad sobre la eficiencia del compostaje en reactores a escala banco-laboratorio. Capítulo del Libro: "Materia orgánica edáfica y captura de carbono en sistemas iberoamericanos". Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental: 193-212.

173. Ramírez-Pérez J.C.; Strom P.F. y Krogmann U. 2007. Horse manure and cranberry fruit composting kinetics and measures of stability. *Compost Science & Utilization* 15 (3): 200-214.
174. Randle P. 1983. The effect of insulated covers on mushroom compoststack temperatures. *Scientia Horticulturae* 20: 53-59.
175. Raut M.P.; Prince William S.P.M.; Bhattacharyya J.K.; Chakrabarti T. y Devotta S. 2008. Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste – A compost maturity analysis perspective. *Bioresource Technology* 99: 6512-6519.
176. Richard T.L. y Walker L.P. 2006. Modeling the Temperature kinetics of aerobic solid state biodegradation. *Biotechnology Progress* 22: 70-77.
177. Richard T.L.; Walker LP y Gossett JM. 2006. Effects of oxygen on aerobic solid state biodegradation kinetics. *Biotechnology Progress* 22: 60-69.
178. Risse L.M. y Faucette B. 2001. Compost utilization for erosion control. University of Georgia Coop. Extension Service Bulletin 1200, EEUU, pp. 8.
179. Robinzon R.; Kimmel E.; Krasovitski B. Y Avnimelech Y. 1999. Estimation of bulk parameters of a composting process in windrows. *Journal of Agricultural Engineering Resource* 73: 113-121.
180. Rynk R. 1992. On-Farm composting handbook. Editorial Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Cooperative Extension. Ithaca, NY.
181. Sadzawka R. R.A.; Carrasco R. M.A.; Grez Z. R. y Mora G. M.L. 2005. Métodos de Análisis para Compost. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas N° 30, Santiago, Chile, 142p.
182. Sánchez de Pinto M.I.; Umbides R.P.; Dominguez P., Albanesi A. y Polo A. 2012. Compostaje y vemicompostaje de residuos biodegradables de diferentes orígenes. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 125-140.

183. Sánchez-Monedero M.A.; Roig A.; Paredes C. y Bernal M.P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of composting mixtures. *Bioresource Technology* 78: 301-308.
184. Satti P. 2007. Biodisponibilidad de fósforo y nitrógeno en suelos volcánicos bajo bosque nativo, disturbados y enmendados. Tesis Doctoral en Biología. CRUB-UNComahue, Bariloche, Argentina.
185. Satti P.; Mazzarino M.J.; Laos F.; Roselli L.; y Crego M.P. 2012. Compostaje de materiales de diferente origen: experiencias del Grupo de Suelos del CRUB. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 77-97.
186. Saucedo-Castañeda G.; Gutiérrez-Rojas M.; Bacquet G.; Raimbault M. y Viniegra-González G. 1990. Heat transfer simulation in solid substrate fermentation. *Biotechnology and Bioengineering* 35: 802-808.
187. Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS). 2005. *Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU)*. Editorial León Goldstein.
188. Segura S F.; Echeverri F. R.; Patiño Li. A. y Mejía G. A. 2007. Descripción y discusión acerca de los métodos de análisis de fibra y del valor nutricional de forrajes y alimentos para animales. *VITAE. Revista de la Facultad de Química Farmacéutica* 14 (1): 72-81. ISSN 0121-4004. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
189. Seki H. 1989. An investigation of practical process design and control of a soil warming system with heat generated in compost. *Journal of Agricultural Meteorology* 44 (4): 259-267.
190. Semenas, L.; Laos, F. y Labud, V. 2006. Estudios sobre atracción de vectores en la Planta de Compostaje de Lodos Cloacales de Bariloche (Patagonia, Argentina). *Ingeniería Sanitaria y Ambiental* 87:105-108. ISSN 0328-2937.

191. Semenas L. 2012. Patógeno en residuos orgánicos. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 29-54.
192. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). 2010. Proyecto de Ley “Reglamento para el Registro de Fertilizantes, Enmiendas, Sustratos, Acondicionadores, Protectores y Materias Primas en la Republica Argentina” (consulta pública).
193. Shah K.L., 2000. *Basics of Solid and Harzardous waste management technology*. Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-960378-6.
194. Sharma V.K.; Canditelli M.; Fortuna F. y Cornacchia G. 1997. *Energy Conversion Management* 38 (5); 453-478.
195. Shilev S.; Naydenov M.; Vancheva V. y Aladjadjian A.I. 2007. Compost of Food and Agricultural Waste. In *Utilization of By-products Waste in the Food Industry*: 283-301.
196. Smars S.; Beck-Friis B.; Jönsson H. y Kirchmann H. 2001. An advanced experimental composting reactor for systematic simulation studies. *Journal of Agricultural Engineering Resource* 78 (4): 415–422.
197. Smars S. 2002. Influence of different temperature and aeration regulation strategies on respiration in composting of organic household waste. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala.
198. Smars S.; Gustafsson L.; Beck-Friis B. y Jönsson H. 2002. Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control. *Bioresource Technology* 84: 237-241.
199. Sole-Mauri F.; Illa J.; Magrí A.; Prenafeta-Boldú F.X. y Flotats X. 2007. An integrated biochemical and physical model for the composting process. *Bioresource Technology* 98: 3278–3293.
200. Strauch, D. 1996. Occurrence of microorganisms pathogenic for man and animals in source separated biowaste and compost – importance,

- controls, limits and epidemiology. En: *The Science of Composting* Ed. de Bertoldi, M., Sequi, P., Lemmes, B. and Tizano Papi. CEC, Blackie Academic and Professional, London, 224-232.
201. Sundberg C. 2003. Food waste composting – effects of heat, acids and size. Licentiate Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala.
202. Sundberg C. 2005. Improving compost process efficiency by controlling aeration, temperature and pH. PhD. thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
203. Sundberg C. y Jonsson H. 2008. Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration. *Waste Management*. 28: 518-526.
204. Swinker A.M. 1997. Composting characteristics of three Redding materials. *Equine nutrition and physiology annual symposium, Texas, EE.UU.* : 462-466.
205. Taha M.P.M.; Pollard S.J.T.; Sarkar U. y Longhurst P. 2005. Estimating fugitive bioaerosol releases from static compost windrows: Feasibility of a portable wind tunnel approach. *Waste Management* 25: 445–450.
206. Tappi Method T 257 cm-85. 1985. Sampling and preparing wood for analysis. TAPPI PRESS, Atlanta, GA.
207. Tappi Method T 264 om-88. 1988. Preparation of wood for chemical analysis. TAPPI PRESS, Atlanta, GA.
208. Tappi Method T 204 om-88. 1988. Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI PRESS, Atlanta, GA.
209. Tappi Method T 222 om-88. 1988. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. TAPPI PRESS, Atlanta, GA.
210. Tappi Method T 211 om-93. 1993. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. TAPPI PRESS, Atlanta, GA.
211. Tappi Method T 412 om-94. 1994. Moisture in pulp, paper and paperboard. TAPPI PRESS, Atlanta, GA.

212. Tchobanoglous G.; Theisen H. y Vigil S. 1993. Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues." Editorial Mc Graw Hill, EE.UU.
213. Tiquia S.M.; Tam N.F.Y. y Hodgkiss I.J. 1997. Effects of turning frequency on composting of spent pig-manure sawdust litter. *Bioresource Technology* 62: 37-42.
214. Tirado S.M. y Michel F.C., Jr. 2010. Effects of turning frequency, windrow size and season on the production of dairy manure/sawdust composts. *Compost Science & Utilization* 18 (2): 70-80.
215. TMECC. 2001-2002. Test Methods for the Examination of Composting and Compost. Composting Council Research and Education Foundation (CCREF), Ronkonka, New York, EE.UU.
216. Tognetti C.; Laos F.; Mazzarino M.J. y Hernandez M.T. 2005. Composting vs. vermicomposting: a comparison of end product quality. *Compost Science & Utilization* 1: 6-13.
217. Tognetti C.; Mazzarino M.J. y Laos F. 2007a. Improving the quality of municipal waste compost. *Bioresource Technology* 98 (5): 1067-1076.
218. Tognetti C.; Mazzarino M.J. y Laos F. 2007b. Co-composting biosolids and municipal organic waste: effects of process management on stabilization and quality. *Biology & Fertility of Soils* 43: 387-397.
219. Tomati U.; Galli E.; Pasetti L. y Volterra E. 1995. Bioremediation of olive-mill wastewaters by composting. *Waste Management and Research* 13 (6): 509-518.
220. Torres-Lozada P., Pérez Vidal A.; Nates Díaz P.A.; Sánchez G.; Sánchez Guzmán M.L.; Bermúdez López A.; Escobar Rivera J.C. e Imery R. 2005. Influencia del material de soporte sobre el proceso de compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad Nacional de Colombia. *Ingeniería e Investigación* 25 (2): 53-61.
221. Trémier A.; de Guardia A.; Massiani C.; Paul E. y Martel J.L. 2005. A respirometric method for characterising the organic composition and

- biodegradation kinetics and the temperature influence on the biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agent to be co-composted. *Bioresource Technology* 96: 169–180.
222. Tuomela M.; Vikman M.; Hatakka A. e Itävaara M. 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology* 72: 169 – 183.
223. Ullé J. 1999. Producción orgánica. GT Horticultura. Instituto Nacional de Tecnología Industrial de la Argentina (INTI), Buenos Aires, Argentina.
224. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1985. The Rutgers strategy for composting: process design and control. EPA/600/2-85/059. Water engineering research laboratory office of research and development USEPA. Cincinnati, Ohio 45268.
225. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge. U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C., EEUU. Federal Register 58: 9248-9415.
226. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1994. Composting yard trimmings and municipal solid waste. EPA530-R-94-03.
227. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2002. Solid Waste Management: A Local Challenge With Global Impacts. EPA530-F-02-026d. May 2002 www.epa.gov/globalwarming.
228. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2007. Title 40: Protection of Environment, Part 503. Standards for the use or disposal of sewage sludge (40CFR503, 2007). Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR).
229. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2011. Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2010. EPA-530-F-11-005. December 2011. www.epa.gov/wastes

230. Valenzuela O.R. 2009. Caracterización y evaluación agronómica de materiales regionales usados en la formulación de sustratos para plantas. Tesis Doctoral, Fac. Ciencias Agrarias. UNR. Rosario, Argentina.
231. Van Herk F.; McAllister T.; Cockwill C.; Guselle N.; Larney F.; Miller J. y Olson M. 2004. Inactivation of Giardia cysts and Cryptosporidium oocysts in beef feedlot manure by thermophilic windrow composting. *Compost Science and U 12*: 235-241.
232. Van Gestel K.; Mergaert J.; Swings J.; Coosemans J. y Ryckeboer J. 2003. Bioremediation of diesel oil-contaminated soil by composting with biowaste. *Environmental Pollution* 125: 361-368.
233. Vander-Gheynst J.S.; Gossett J.M. y Walker L.P. 1997. High-solids aerobic decomposition: pilot scale reactor development and experimentation. *Process Biochemistry* 32 (5): 361-375.
234. Varela S.A. 2005. Efecto del compost de biosólidos sobre la recuperación de un bosque quemado de *Nothofagus pumilio*. Tesis Licenciatura Ciencias Biológicas, CRUB, Uni. Nacional del Comahue, Bariloche, Argentina.
235. Varela S.A.; Gonni M.E. y Laos F. 2006. Banco de semillas de un bosque quemado de *Nothofagus pumilio*: efecto de la aplicación de compost de biosólidos. *Ecología Austral* 16: 63-78.
236. Vargas-García M.C.; Suárez-Estrella F.; López M.J. y Moreno J. 2007. Effect of inoculation in composting processes: Modifications in lignocellulosic fraction. *Waste Management* 27: 1099–1107.
237. Varnero M. M.T.; Rojas A. C. y Orellana R R. 2007. Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Journal of Soil Science Nutrition* 7 (1): 28-37.
238. Vlyssides A.; Mai S. y Barampouti E.M. 2009. An Integrated Mathematical Model For Co-Composting Of Agricultural Solid Wastes With Industrial Wastewater. *Bioresource Technology* 100: 4797–4806.

239. Wei Z.; Wang S.; Xu J. y Zhou Y. 2003. The Technology of the MSW Composting. *Nature and Science* 1(1): 91-94.
240. Weppen P. 2001. Process calorimetry on composting of municipal organic waste. *Biomass and Bioenergy* 21: 289-299.
241. Whitaker S. 1977. "Fundamental principles of heat transfer", Pergamon Press.
242. Xi B.; Zhang G. y Liu H. 2005. Process kinetics of inoculation composting of municipal solid waste. *Journal of Hazardous Materials B124*: 165–172.
243. Xi B.; Wei Z. y Liu H. 2006. Dynamic Simulation for Domestic Solid Waste Composting Processes. *The Journal of American Science* 1 (1): 34–45.
244. Xu Z.; Zhang L.; Liang L.; Wang L.; Kang W. y Li J. 2008. Impacts of different sized lab-based reactors on the aerobic composting of chicken manure. *Transactions of the CSAE* 24 (10): 205 – 208.
245. Yamada Y. y Kawase Y. 2006. Aerobic composting of waste activated sludge: Kinetic analysis for microbiological reaction and oxygen consumption. *Waste Management* 26: 49–61.
246. Yu S.; Zeng G.; Huang H.; Xi X.; Wang R.; Huang D.; Huah G y Li J. 2008. A statistical method for the analysis of nonlinear temperature time series from compost. *Bioresource Technology* 99: 1886–1895.
247. Zambra C.E.; Moraga N.O. y Escudey M. 2011. Heat and mass transfer in unsaturated porous media: Moisture effects in compost piles self-heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54: 2801-2810.
248. Zhu N. 2007. Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. *Bioresource Technology* 98 (1): 9-13.
249. Zubillaga M.S. y Lavado R.S. 2001. Biosolids compost as component of potting media for bedding plants. *Gartenbauwissenschaft* 66:304-309.

250. Zubillaga M.S.; Civeira G.; Rimski-Korsakov H. y Lavado R.S. 2004. Las pérdidas de amoníaco durante el compostaje de biosólidos y su posible impacto ambiental. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental* 77: 88 – 90.
251. Zubillaga M.S., Rimski-Korsakov H.; Traveria G. y Lavado R.S. 2005. Ammonia volatilization from different organic amendments during storage and after land application. *Agrochimica* 49 (5-6): 169 – 174.
252. Zubillaga M.S. y Lavado R.S. 2006. Phytotoxicity of biosolids compost of different maturity degree compared with biosolids and animal manures. *Compost Science and Utilization* 14: 267-270.
253. Zubillaga M.S.; Branzini A. y Lavado RS. 2008. Problemas de fitotoxicidad en compost. *Revista Pilquen, Sección Agronomía X* (9): 1 – 9. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
254. Zubillaga M.S. y Lavado R.S. 2012. Fitotoxicidad con compost de biosólidos. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. UNRN-Orientación Gráfica Editora, Bs. As., Argentina, pp. 231-240.
255. Zucconi F.; Pera, A.; Forte, M. y de Bertoldi M. 1981. Evaluating toxicity in immature compost. *Biocycle* 22: 54–57.
256. Zucconi F.; Monaco A.; Forte M. y de Bertoldi M. 1985. Phytotoxins during the stabilization of organic matter. En: Gasser JKR (Ed.). *Composting of agricultural and other wastes*. Elsevier, London, pp. 73–85.

Sitios webs

1. ANKOM Technology. Sitio web: <http://www.ankom.com/default.aspx>. Consultado los días: 18/12/2008 y 04/05/2011.
 - a. Method 5 (Revision 13/04/2011). Acid Detergent Fiber in Feeds Filter Bag Technique (For A200, A200I).

- b. Method 6 (Revision 13/04/2011). Neutral Detergent Fiber in Feeds Filter Bag Technique (For A200, A200I).
 - c. Method for Determining Acid Detergent Lignin in Beakers – 08/05
2. Richard T. L. (1996). Sitio web: <http://compost.css.cornell.edu/calc/lignin.html>. Cornell Composting Science & Engineering, Cornell Waste Management Institute, Cornell University.
 3. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, Observatorio Nacional de RSU. Sitio web: <http://www.ambiente.gob.ar/observatoriorsu/>. Consulta realizada el día 8/04/2011.

Otras fuentes consultadas

- Aportes personales de la Profesora Ana Adell y el Prof. Miguel Zanittini, ambos docentes de la Cátedra de “Fundamentos de la producción de Pastas celulósicas”, Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral (FIQ, UNL).