

**UNIVERSIDAD SAN PEDRO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**SECCIÓN DE POSGRADO DE INGENIERÍA**



**APLICACIÓN DE SOFTWARE EN DISEÑO Y OPERACIÓN DE  
BIORREACTOR PARA TRATAMIENTO AERÓBICO DE  
MATERIA ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS,**

**Tesis para obtener el grado de Doctorado en INGENIERÍA**

**QUÍMICA**

**Autor:**

**Eusebio Lara Saúl Marco**

**Código Orcid: 0000-0001-6875-240X**

**Asesora:**

**Montes Lizárraga, Carolina**

**Código Orcid : 0000-0002-0074-9228**

**Chimbote – Perú**

**2024**

## ÍNDICE GENERAL

Índice general.....	i
Índice de tablas .....	ii
Índice de figuras.....	iii
Palabras clave .....	iv
Título.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Introducción .....	1
Metodología .....	45
Resultados.....	48
Análisis y Discusión .....	65
Conclusiones.....	68
Recomendaciones .....	69
Agradecimientos .....	70
Referencias bibliográficas.....	71
Anexos .....	0

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición física de los RSM.....	7
Tabla 2 Composición química de los RSM .....	8
Tabla 3 Fracción biodegradable de SV de los RSM .....	10
Tabla 4 Clasificación de microorganismos según fuentes de energía y carbono.....	11
Tabla 5 Comparación entre los proceso aerobicos y anaeróbicos para el procesamiento de la fracción orgánica de los RSM .....	16
Tabla 6 Tipos de biorreactores y sus usos característicos.....	17
Tabla 7 Tipos de microorganismos .....	22
Tabla 8 Características de una bacteria.....	23
Tabla 9 Técnicas de recolección de datos .....	46
Tabla 10 Composición física de los RSM de Nuevo Chimbote.....	49
Tabla 11 Composición química de los RSM de Nuevo Chimbote .....	50
Tabla 12 Composición molar de los residuos orgánicos.....	50
Tabla 13 Relación molar de componentes biodegradables .....	51
Tabla 14 Conversión fraccional biodegradable de la muestra .....	51
Tabla 15 Demanda bioquímica de oxígeno de la muestra de residuos solidos en Be	51
Tabla 16 Registro de ecuaciones del programa polymath .....	56
Tabla 17 Matriz de solución de ecuaciones y variables.....	57
Tabla 18 Demanda de oxígeno de la muestra de residuos sólidos en Bc y Be .....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Biorreactores de laboratorio .....	31
Figura 2 Planta piloto (5 L– 2500 L) .....	32
Figura 3 Planta de producción (5000 L – 400 000 L).....	32
Figura 4 Prueba de orden cero para la DBO .....	60
Figura 5 Prueba de primer orden para la DBO .....	60
Figura 6 Prueba de primer orden reajustado al valor de k, para la DBO .....	61
Figura 7 Biorreactor experimental por lotes .....	61
Figura 8 Biorreactor control de laboratorio de Q.G.I – UNS .....	62
Figura 9 Cambio de concentración del sustrato del material biodegradable .....	62
Figura 10 Cambio en la concentración de células y formación de producto .....	63
Figura 11 Velocidades de agotamiento del sustrato, decaimiento celular, estabilidad del producto y descomposición endógena .....	63
Figura 12 Conversión de materia orgánica biodegradable en el biorreactor .....	64

### **Palabras clave**

Tratamiento de residuos sólidos, biorreactores, software de aplicación, materia orgánica, tratamiento aeróbico.

### **Keywords**

Solid waste treatment, bioreactors, application software, organic matter, aerobic treatment.

### Línea de investigación

Línea de investigación	Gestión de residuos sólidos urbanos
Área	Ciencias naturales
SubÁrea	Ciencias de la tierra y medioambientales
Disciplina	Ciencias del medio ambiente



## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El que suscribe, Vicerrector de Investigación de la Universidad San Pedro:

### HACE CONSTAR

Que, de la revisión del trabajo titulado "**Aplicación de software en diseño y operación de biorreactor para tratamiento aeróbico de materia orgánica de residuos sólidos urbano**" del (a) estudiante: **EUSEBIO LARA SAUL MARCO**, identificado(a) con Código N° **1111200696**, se ha verificado un porcentaje de similitud del **19%**, el cual se encuentra dentro del parámetro establecido por la Universidad San Pedro mediante resolución de Consejo Universitario N° 5037-2019-USP/CU para la obtención de grados y títulos académicos de pre y posgrado, así como proyectos de investigación anual Docente.

Se expide la presente constancia para los fines pertinentes.

Chimbote, 11 de agosto de 2025

UNIVERSIDAD SAN PEDRO  
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN



Dr. JAVIER MARTÍNEZ CARRIÓN  
VICERRECTOR



**NOTA:** Este documento carece de valor si no tiene adjunta el reporte del Software TURNITIN.

## **TITULO**

Aplicación de software en diseño y operación de biorreactor para  
tratamiento aeróbico de materia orgánica de residuos sólidos urbanos,  
Nuevo Chimbote, 2021

Application of software in the design and operation of bioreactors for  
aerobic treatment of organic matter from municipal solid waste, Nuevo  
Chimbote, 2021.

## RESUMEN

El propósito del trabajo fue explicar la influencia de aplicar un software en el tratamiento aeróbico de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos en un biorreactor discontinuo. La metodología fue de investigación aplicada y diseño experimental. La muestra fueron los residuos sólidos domésticos de Nuevo Chimbote. La recolección de datos se realizó mediante análisis documental y formatos estandarizados para la caracterización de los residuos procesados en un biorreactor de 7 litros con operación isotérmica (35°C). El control fue la caracterización cinética, tratamiento de residuos biodegradables y crecimiento de células con los programas Matlab y Polymath. Los resultados mostraron que la DBO para residuos con una dilución del 15 % fue de 464,15 mg O<sub>2</sub>/L a 341,15 mg O<sub>2</sub>/L en 30 días. La reacción fue de primer orden con una constante cinética  $k$  (0,0105 d<sup>-1</sup>). La estabilidad del material orgánico degradado en el biorreactor alcanzó un promedio del 73,5 %, con cambios en concentración: sustrato de 24,1 g/L a 24,00 g/L, células de 0,46 g/L a 0,086 g/L (81,3 %) y productos de 0,2922 g/L a 0,1077 g/L (63,14 %) en 50 horas. Se concluye que Matlab y Polymath influyen significativamente en el diseño y operación del biorreactor.

## ABSTRACT

The purpose of the work was to explain the influence of applying software in the aerobic treatment of biodegradable organic matter from solid waste in a discontinuous bioreactor. The methodology was applied research and experimental design. The sample consisted of domestic solid waste from Nuevo Chimbote. Data collection was carried out through documentary analysis and standardized formats for characterizing the waste processed in a 7-liter bioreactor operating under isothermal conditions (35°C). The control was the kinetic characterization, treatment of biodegradable waste, and cell growth using MATLAB and Polymath programs. The results showed that the BOD for waste with a 15% dilution ranged from 464.15 mg O<sub>2</sub>/L to 341.15 mg O<sub>2</sub>/L over 30 days. The reaction followed first-order kinetics with a kinetic constant  $k$  (0.0105 d<sup>-1</sup>). The stability of the degraded organic material in the bioreactor reached an average of 73,5%, with concentration changes: substrate from 24.1 g/L to 24.00 g/L, cells from 0.46 g/L to 0.086 g/L (81,3 %), and products from 0,2922 g/L to 0,1077 g/L (63,14 %) over 50 hours. It is concluded that MATLAB and Polymath significantly influence the design and operation of the bioreactor.

## INTRODUCCIÓN

Respecto a los antecedentes internacionales se tiene a Qayoom et al. (2021), en su artículo de investigación, Evaluación de la eficiencia de tecnologías de tratamiento de aguas residuales: Implicaciones en la salud de los ecosistemas acuáticos, se plantearon como propósito El objetivo fue identificar y abordar los problemas relacionados con la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y evaluar sus implicaciones para el ecosistema del lago Dal en Srinagar, Kashmir, India. Para ello, se evaluaron las tecnologías de biorreactor aeróbico fluido (FAB) y reactor secuencial por lotes (SBR), que fueron instaladas recientemente alrededor del lago Dal, desde diciembre de 2016 hasta noviembre de 2018, en cuanto a la metodología, realizaron análisis exhaustivos de la calidad química del agua y se llevaron a cabo pruebas para determinar los niveles de coliformes totales (TC), coliformes fecales (FC) y estreptococos fecales (FS) y emplearon técnicas estadísticas, específicamente el análisis de varianza (ANOVA), para evaluar las variaciones significativas en los parámetros clave como amoníaco ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), fósforo total (TP), TC, FC, FS entre otros, obtuvieron como resultados que la eficiencia de eliminación de contaminantes era muy baja, especialmente en el biorreactor aeróbico fluido durante los meses de invierno. En estos meses, la eficiencia del tratamiento se redujo drásticamente, mostrando un rendimiento significativamente disminuido en la eliminación de TSS, BOD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TP, TC, FC y FS, con ello llegaron a la conclusión que tanto el FAB como el SBR enfrentan problemas significativos en términos de eficiencia de tratamiento.

Huan et al. (2021), en su artículo Análisis del rendimiento de desodorización de un reactor de biotrickling filter mixotrófico utilizando diferentes residuos industriales y agrícolas como material de empaque, el objetivo del estudio fue evaluar la eficiencia en la eliminación de  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{NH}_3$  y la reducción de contaminación secundaria usando diferentes materiales de relleno en un filtro biológico por lecho móvil (BTF) bajo condiciones mixotróficas. Se empleó un diseño experimental aplicando materiales como corteza de pino, ceniza de carbón, paja y rellenos en un reactor de lecho móvil biológico (MBBR). La evaluación, realizada durante 24 meses, operó con tasas de carga de  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{NH}_3$  de  $53,59 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$  y un tiempo de residencia en lecho vacío (EBRT)

de 40,5 s. Utilizaron técnicas para la recolección de datos y ajuste de curvas cinéticas para determinar la carga máxima teórica, y realizaron análisis microbiológicos para identificar géneros bacterianos en los reactores, los resultados indicaron que el BTF con relleno de corteza de pino (BTF-A) alcanzó las mejores tasas de eliminación, con 86,31% para H<sub>2</sub>S y 94,06% para NH<sub>3</sub>, con ello calcularon la carga máxima teórica de 90,09 g H<sub>2</sub>S m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> y 172,41 g NH<sub>3</sub> m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>, tratando 720 ppm de NH<sub>3</sub>, la concentración promedio de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el fluido circulante fue 127,58 mg/L, concluyendo que la corteza de pino es altamente efectiva para eliminar H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub>, con un buen control sobre la contaminación secundaria.

Sriwiriyarat et al. (2021), en su artículo Presencia de bacterias desnitrificantes aeróbicas en sistemas de lodos activados con película fija integrada, se plantearon cómo objetivo evaluar la mejora de la desnitrificación en sistemas Integrados de Filtro de Película Activada (IFAS) mediante la integración de medios en las zonas anóxicas o aeróbicas y se analizó la simultaneidad de nitrificación y desnitrificación (SND) en el biofilm, utilizando medios Bioweb® a tres proporciones de recirculación de nitritos y nitratos (NR): 75%, 100% y 125%. Operaron dos sistemas IFAS en paralelo, uno con medios en la zona anóxica y el otro en la zona aeróbica del reactor, evaluándolos a las diferentes tasas de NR. Utilizaron métodos estándar para medir la eficiencia en la eliminación de materia orgánica y nitrógeno, y técnicas microbiológicas para identificar microorganismos desnitrificantes. Los resultados mostraron eficiencias similares en ambos sistemas, sin diferencias significativas, y una ligera mejora en la desnitrificación anóxica con un NR del 125%. La SND en el biofilm fue insignificante, y los microorganismos en crecimiento suspendido almacenaron sustratos debido a un tiempo de retención insuficiente. *Chryseobacterium sp.*, *Klebsiella pneumoniae* y *Pseudomonas aeruginosa* predominaban en ambos sistemas, proporcionando desnitrificación aeróbica. En conclusión, la mejora en la desnitrificación anóxica y la SND en el biofilm, facilitadas por los medios de película fija, no contribuyó significativamente al sistema IFAS para la eliminación biológica de nitrógeno debido a la acumulación de productos de almacenamiento microbianos y la desnitrificación aeróbica.

Rolleberg et al. (2021), en su artículo Evaluación de la producción de exopolisacáridos similares a alginato (ALE) y triptófano en sistemas de lodos granulares aeróbicos, se plantearon como objetivo general evaluar los aspectos ingenieriles y microbiológicos implicados en la producción de exopolisacáridos similares al alginato (ALE) y triptófano (TRY) en sistemas de lodo granular aeróbico. Para lograr esto, los investigadores integraron una fase anóxica corta dentro de un ciclo A/O/A (anaeróbico, oxicó y anóxico) y controlaron el tiempo de retención del lodo (SRT  $\approx$  10 días). Las técnicas utilizadas incluyeron la medición de la concentración de sustrato y análisis microbiológicos para identificar los grupos microbianos responsables de la producción de estos bioproductos. Los resultados mostraron que la inclusión de la fase anóxica y el control del SRT fueron efectivos para aumentar el contenido de ALE y TRY en los gránulos, con ello identificaron que los grupos microbianos heterótrofos de crecimiento lento, como los PAOs y GAOs, estaban asociados con la producción de ALE, mientras que las bacterias fermentativas productoras de EPS estaban vinculadas a la producción de TRY, con lo cual concluyeron que la recuperación de ALE en los sistemas AGS podría reducir los costos operativos (OPEX) del tratamiento, especialmente en plantas de tratamiento de aguas residuales grandes o en aguas residuales industriales con alta carga orgánica.

Cui et al. (2021), en su artículo Aplicación del análisis de componentes principales (PCA) para la evaluación de las correlaciones de parámetros en el proceso de nitrificación parcial utilizando lodos granulares aeróbicos, se plantearon como objetivo general utilizar el análisis de componentes principales (PCA) para extraer información relevante del proceso de nitrificación parcial con lodo granular aeróbico, apoyándose de la metodología básica y experimental que incluyó la determinación de parámetros como nitrógeno amónico total (TAN), nitrógeno nitrito ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), nitrógeno nitrato ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), y otros parámetros de calidad del agua como sólidos suspendidos volátiles (MLVSS), alcalinidad, nitrógeno total (TN), índice de volumen de lodo (SVI), pH y oxígeno disuelto (DO), cómo técnicas e instrumentos se utilizaron formatos en donde identificaron la comunidad bacteriana usando secuenciación 16S rRNA con el sistema de secuenciación GS Junior. Los datos de calidad del agua fueron analizados utilizando PCA con el software MATLAB, con ello obtuvieron como

resultados que la relación de acumulación de nitrito (NAR) varió entre 0,55 y 0,85, manteniendo una estructura compacta del lodo granular aeróbico y el PCA les permitió reducir la dimensionalidad de los datos de 8 variables a 2 componentes principales que explicaron el 75% de la varianza total, con ello concluyeron que la aplicación de PCA facilitó la detección de anomalías en los datos y la separación de información útil de interferencias no deseadas.

Sobieszuk et al. (2021), en su artículo Investigación de la posibilidad de cultivar levaduras aeróbicas con adición de nanoburbujas de oxígeno y evaluación de los resultados de cultivos en lote y semicontinuos de *Saccharomyces cerevisiae*, el objetivo del estudio fue investigar la posibilidad de cultivar *Saccharomyces cerevisiae* usando nanoburbujas de oxígeno como única fuente de oxígeno y evaluar su impacto en el crecimiento de las levaduras en comparación con la aireación clásica. Se llevaron a cabo cultivos en tres configuraciones: en lote (batch), batch secuencial y semicontinuo, utilizando tanto nanoburbujas de oxígeno como aireación clásica en el biorreactor. Los resultados se compararon con cultivos en lote sin nanoburbujas. Se utilizaron técnicas para medir perfiles de biomasa, sustrato y oxígeno a lo largo del tiempo de cultivo, y se aplicaron los modelos de Monod y Tsao-Hanson para describir el crecimiento de las levaduras. Los datos se analizaron con el software MATLAB. Los cultivos con nanoburbujas mostraron una tasa de crecimiento específica máxima superior en comparación con los cultivos sin nanoburbujas y también revelaron una mejora en los parámetros cinéticos y de balance. La conclusión fue que el uso de nanoburbujas de oxígeno como única fuente de oxígeno en cultivos de *Saccharomyces cerevisiae* resultó en una mayor tasa de crecimiento específica y demostró el potencial de las nanoburbujas para mejorar el crecimiento de microorganismos en procesos industriales y biotecnológicos.

Da Silva et al. (2020), en su artículo Degradación anaeróbica-aeróbica en tándem de ranitidina, diclofenaco y simvastatina en aguas residuales domésticas, se plantearon como objetivo evaluar la biodegradación de los fármacos ranitidina (RNT), diclofenaco (DCF) y simvastatina (SVT) en aguas residuales domésticas utilizando un reactor continuo anaeróbico-aeróbico con biomasa inmovilizada y un reactor anaeróbico en lote, apoyándose para ello de una metodología básica y experimental,

en donde el reactor continuo operó durante seis meses con un tiempo de retención hidráulica (HRT) de 8 horas, manteniendo concentraciones iniciales de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  para cada fármaco, simultáneamente, utilizaron un reactor anaeróbico en lote para analizar productos de biodegradación, evaluar la inhibición de la actividad metanogénica específica (SMA) y estimar las ecotoxicidades agudas y crónicas con el software ECOSAR 1.11, obtuvieron como que el sistema de tratamiento eliminó el 90% de RNT, el 72% de DCF y el 62% de SVT. Las capacidades máximas de oxidación (MOC) fueron del 100% para RNT, 93% para DCF y 72% para SVT, además, lograron una eliminación del 71% de la demanda química de oxígeno soluble (COD), la RNT se degradó a lo largo de todo el reactor, DCF principalmente en las dos cámaras anaeróbicas, y SVT en la primera cámara anaeróbica. La inhibición de SMA y la ecotoxicidad aumentaron con la lipofilia de los fármacos, concluyeron así que, RNT, DCF y SVT inhiben la SMA a niveles ambientales, con la magnitud de la inhibición y la ecotoxicidad influenciadas por la lipofilia de los fármacos.

Pana et al. (2019), en su artículo Estudio preliminar sobre la degradación de polímeros utilizando un reactor aeróbico, planteándose como objetivo desarrollar una técnica para la degradación de polímeros a base de azúcar utilizando un bioreactor aeróbico, alimentado con aguas residuales del proceso de fabricación de cerveza, apoyándose de una metodología básica y experimental, en donde diseñaron un bioreactor aeróbico en el cual se introdujeron los polímeros de azúcar para su degradación, incluyendo la monitorización de la pérdida de peso de los polímeros como indicador de degradación y evaluaron la susceptibilidad de los polímeros al ataque de microorganismos presentes en el biorreactor, para ello utilizaron como técnicas e instrumentos los formatos estandarizados, para recolectar datos y generar los modelos matemáticos para analizar la cinética de degradación, como el crecimiento exponencial, el modelo de Gompertz modificado y el modelo logístico, esto lo realizaron utilizando el software MATLAB R2018a con el toolbox de optimización, obtuvieron como resultados que los polímeros de azúcar presentaron una buena susceptibilidad al ataque microbiano y experimentaron una pérdida de peso significativa durante el proceso de degradación, así como la cinética de degradación se ajustó adecuadamente a los tres modelos matemáticos mencionados, lo que confirma la efectividad del bioreactor en la

degradación de estos polímeros, concluyendo que los polímeros a base de azúcar pueden ser degradados eficientemente en un bioreactor aeróbico utilizando aguas residuales de cerveza presentando un enfoque prometedor para el manejo ambiental de polímeros biodegradables.

Ravi-Sankar et al. (2018), en su artículo Evaluación del rendimiento, cinética y modelado de un biorreactor de membrana de biofilm para el tratamiento de aguas residuales lácteas, se plantearon como objetivo evaluar el rendimiento de un biorreactor de membrana de biofilm (BF-MBR) a escala de banco y determinar los coeficientes biocinéticos para la modelización y simulación. Se diseñó un BF-MBR combinando un reactor de membrana aeróbico convencional con un reactor de biofilm de lecho móvil. El biorreactor se operó a tiempos de retención hidráulica (HRT) de cuatro, seis y ocho horas para identificar el HRT óptimo y mejorar el rendimiento. Se realizaron estudios cinéticos para determinar los coeficientes biocinéticos, incluyendo el coeficiente de rendimiento y otras constantes de velocidad. La modelización y simulación cinética se llevaron a cabo utilizando el software BioWin para optimizar el diseño y rendimiento del sistema, obtuvieron como resultados mostraron que el BF-MBR operando a un HRT óptimo de seis horas logró efluentes tratados con Demanda Química de Oxígeno (COD) de  $60.90 \text{ mg l}^{-1}$ , Nitrógeno Total (TN) de  $9.61 \text{ mg l}^{-1}$  y Fósforo Total (TP) de  $6.26 \text{ mg l}^{-1}$ , con eficiencias de eliminación del 97.25%, 91.8% y 64.8%, respectivamente. Los coeficientes biocinéticos promedio fueron: coeficiente de rendimiento =  $0.617 \text{ mg mg}^{-1}$ , tasa de decadencia = 0.1387 por día, tasa de crecimiento específico máximo = 2.5189 por día, y constante de saturación =  $888.917 \text{ mg COD l}^{-1}$ . La simulación mostró buena correlación con los datos experimentales ( $R^2 = 0.9586, 0.8394$  y  $0.8362$  para COD, TN y TP, respectivamente), con ello concluyeron que el BF-MBR es eficaz para la eliminación de contaminantes orgánicos y nutrientes en aguas residuales lácteas, cumpliendo con los estándares de descarga.

En cuanto a la fundamentación científica, se tiene en cuenta los diferentes aportes teóricos que brindan las variables, los cuales se utilizan para reforzar los indicadores que se van a utilizar para establecer la evaluación de la influencia que tiene una variable sobre otra variable, en ese sentido, se define a los residuos sólidos urbanos

(RSU), o llamado también residuos sólidos municipales (R.S.M.), como se trata de materiales sólidos o semisólidos que la comunidad ya no percibe como valiosos para conservar. Los Residuos Sólidos Municipales (RSM) comúnmente comprenden todos los desechos generados por la comunidad, excluyendo los provenientes de procesos industriales y los residuos agrícolas. Las características de los R.S.M., son muy distintos a los residuos sólidos industriales, ya que en los primeros predominan los residuos alimentarios biodegradables, referidos como basura por su tendencia a la descomposición, y los materiales sólidos no biodegradables, que se identifican simplemente como desechos (Welz et al., 2024)

La composición física de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se refiere a los elementos individuales que conforman el flujo de residuos, así como a su distribución relativa, la cual generalmente se expresa como un porcentaje en función de su peso seco o húmedo (Liu et al., 2024). En este trabajo la información consiste en resaltar la composición de los residuos sólidos orgánicos que son importantes para evaluar las necesidades del diseño de un equipo para la conversión biológica en condiciones aerobias. La información relacionada con la composición física de los residuos sólidos, tanto orgánicos como inorgánicos que aparece a continuación:

**Tabla 1.** *Composición física de los RSM*

Componente	Porcentaje en peso		
	Países de Bajos Ingresos		RSM de Chimbote
	Rango	Típico	Típico (a)
Residuos de Comida	40 – 85	58	56.00
Papel y Cartón	1 – 10	5	19.00
Plásticos	1 – 5	3	8.00
Textiles	1 – 5	3	-
Goma y Cuero	1 – 5	3	-
Residuos de jardín y madera	1 – 5	3	-
Vidrio	1 – 10	5	7.00
Metales y Otros	1 – 40	20	10.00
<b>Totales:</b>		100	100.00

*Nota.* Elaboración propia, sobre la base de 10 kg de recolección

Composición química de los RSU: El análisis elemental de los residuos generalmente incluye la determinación de los porcentajes de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno

(O), nitrógeno (N), azufre (S) y cenizas. Estos resultados son fundamentales para caracterizar la composición química de la materia orgánica presente en los RSU. En la Tabla 1, se muestran los datos representativos para los componentes típicos de los Residuos Sólidos Municipales (RSM), los cuales se detallan en la siguiente tabla. (Le et al., 2024).

**Tabla 2.** *Composición química de los RSM*

Componente	Porcentaje en peso (Base Seca)					
	C	H	O	N	S	Ceniza
Residuos de Comida	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Papel	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
Cartón	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
Plásticos	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
Textiles	55.0	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
Goma	78.0	10.0	-	2.0	-	10.0
Cuero	60.0	8.0	11.6	10.00	0.4	10.0
Residuos de jardín	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
Madera	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
Vidrio	0.5	0.1	0.4	<0.1	-	98.9

*Nota.* Elaboración propia, sobre la base de 10 kg de recolección

Las características biológicas de los Residuos Sólidos Municipales (RSM) indican que la basura depositada en un botadero municipal contiene microorganismos, los cuales constituyen la parte viva de la materia orgánica. Estos microorganismos son cruciales en los procesos de degradación, descomposición y depuración. Los cambios bioquímicos, que resultan en la producción de gases disueltos, desempeñan un papel fundamental; por ejemplo, el desarrollo de microorganismos aeróbicos se ve favorecido por la presencia de oxígeno disuelto. A través de estos microorganismos, se lleva a cabo un proceso de descomposición aeróbica, lo que puede ocasionar putrefacción y la generación de malos olores.

La materia orgánica de los RSM, contienen normalmente del 70 al 80 % de material orgánico. Los componentes que integran esta fracción orgánica incluyen residuos alimentarios, papel, cartón, plásticos, textiles, goma, cuero, restos de jardín y madera. Todos estos materiales pueden ser reciclados, ya sea de manera separada o en conjunto. La descomposición de la materia orgánica puede llevarse a cabo bajo condiciones tanto

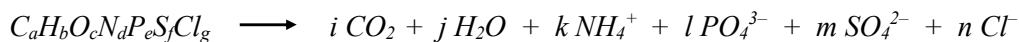
aeróbicas como anaeróbicas. El proceso aeróbico, que requiere un suministro constante de oxígeno disuelto libre, es el método más efectivo para disminuir el contenido orgánico de los residuos líquidos diluidos.

La materia orgánica biodegradable de los RSM, son compuestos de la fracción orgánica que pueden ser degradados o convertidos en compuestos más sencillos, por microorganismos.

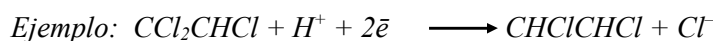
La transformación biológica de un residuo orgánico exige que el sistema biológico mantenga un equilibrio dinámico. Los microorganismos al encontrarse en este estado de equilibrio pueden estabilizar eficazmente un residuo orgánico. Para lograr y mantener el equilibrio dinámico, el entorno debe estar exento de concentraciones inhibitorias de metales pesados, amoníaco, sulfitos y otros compuestos tóxicos que están interactuando continuamente (Archana et al., 2024).

La biodegradación es una forma de reacción bioquímica o biotransformación de materia orgánica. Hay dos tipos generales de biodegradación:

La mineralización ocurre cuando organismos vivos transforman compuestos orgánicos en productos finales minerales.



*La biotransformación sucede cuando los compuestos orgánicos precursores no se mineralizan por completo, y una parte de ellos se transforma en otros compuestos orgánicos.* (Sawyer, y McCarty, 2001, p. 320)



Todas las fermentaciones son biotransformaciones.

La biodegradabilidad de los componentes orgánicos RSM se evalúa mediante el contenido de sólidos volátiles (SV) determinado a 550 °C. Este método se emplea frecuentemente para medir la biodegradabilidad de la fracción orgánica de los RSM. Sin embargo, el uso del SV puede ser inadecuado, ya que algunos componentes orgánicos de los RSM, como el papel periódico, son altamente volátiles, pero presentan baja biodegradabilidad. En su lugar, se puede utilizar la siguiente ecuación para estimar la fracción biodegradable (Miranda et al., 2024)

$$BF = 0.83 - 0.028 LC \quad \dots (1)$$

Donde:

BF: Fracción biodegradable expresada en base a los sólidos volátiles (SV)

Constantes empíricas: 0.83 y 0.028.

LC: Contenido de lignina de los SV expresado como porcentaje en peso Seco.

La tabla siguiente presenta la fracción biodegradable de los sólidos volátiles (SV), calculada utilizando la ecuación (1), para los diferentes componentes de los residuos orgánicos municipales. (Wirasembada et al., 2024).

**Tabla 3.** *Fracción biodegradable de SV de los RSM*

<b>Componente</b>	<b>Sólidos volátiles (SV); porcentaje sólidos totales (ST)</b>	<b>Contenido de lignina (LC) (% SV)</b>	<b>Fracción biodegradable (BF)</b>
Residuos de comida.	7 – 15	0.4	0.82
Papel periódico.	94.00	21.9	0.22
Papel de oficina.	96.40	0.4	0.82
Cartón	94.00	12.9	0.47
Residuos de jardín	50 – 90	4.1	0.72

Los procesos de conversión biológica, que constituyen el enfoque principal de esta sección, se centran en los métodos biológicos más comúnmente empleados para la transformación de materiales de residuos orgánicos. Los procesos biológicos considerados son: compostaje aerobio, digestión anaerobia de baja y alta concentración, al considerar los procesos específicos utilizados en la conversión biológica de residuos, resulta útil examinar: a) las necesidades nutricionales de los microorganismos presentes en las instalaciones de tratamiento de residuos sólidos; b) el tipo de metabolismo microbiano en función de la necesidad de oxígeno molecular; c) los microorganismos clave en la conversión de residuos sólidos; d) los requisitos ambientales; e) las transformaciones aeróbicas y anaeróbicas; y f) la selección de los procesos adecuados.

Para el crecimiento microbiano, un organismo requiere una fuente de energía para la reproducción y el funcionamiento óptimo. Además, necesita carbono para la síntesis de nuevo tejido celular y elementos inorgánicos como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. También son necesarios nutrientes orgánicos, conocidos como factores de crecimiento, para la síntesis celular.

Las fuentes de carbono y energía son fundamentales en la formación de tejido celular. El carbono orgánico y el dióxido de carbono son dos fuentes comunes de carbono. Los organismos que utilizan carbono orgánico para la formación de su tejido celular se denominan heterótrofos, mientras que aquellos que obtienen carbono a partir de dióxido de carbono son conocidos como autótrofos. La conversión del dióxido de carbono en tejido celular orgánico es un proceso reductor que requiere una entrada neta de energía, a diferencia de los organismos autótrofos, que deben invertir más energía en la síntesis celular (Chen et al., 2024).

**Tabla 4.** *Clasificación de microorganismos según fuentes de energía y carbono*

<b>Clasificación</b>	<b>Fuente de energía</b>	<b>Fuente de carbono</b>
<b><i>Autotróficos</i></b>		
Fotoautotróficos	Luz	CO <sub>2</sub>
Quimioautotróficos	Rxs inorgánica de oxidación – reducción	CO <sub>2</sub>
<b><i>Heterotróficos</i></b>		
Quimioheterotróficos	Rx orgánica de oxidación – reducción	Carbono orgánico
Fotoheterotróficos	Luz	Carbono orgánico

Los principales nutrientes inorgánicos necesarios para los microorganismos incluyen nitrógeno (N), azufre (S), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), hierro (Fe), sodio (Na) y cloro (Cl). Los nutrientes en menor cantidad, pero igualmente esenciales, son el zinc (Zn), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), selenio (Se), cobalto (Co), cobre (Cu), níquel (Ni) y tungsteno (W). Además, los nutrientes orgánicos, conocidos como factores de crecimiento, son compuestos que los organismos requieren como precursores o componentes del material celular orgánico y que no pueden sintetizar a partir de otras fuentes de carbono. Los principales factores de crecimiento se clasifican en tres grupos: aminoácidos, purinas y pirimidinas, y vitaminas.

El objetivo principal de la mayoría de los procesos de conversión biológica es transformar la materia orgánica de los residuos en un producto final estable. Para lograr este tipo de tratamiento, los organismos quimioheterotróficos son cruciales, ya que requieren compuestos orgánicos tanto como fuente de carbono como de energía. La

fracción orgánica de los Residuos Sólidos Municipales (RSM) generalmente proporciona cantidades adecuadas de nutrientes, tanto orgánicos como inorgánicos, necesarios para soportar la conversión biológica de los residuos (Esparza-Soto et al., 2024).

Los tipos de metabolismo microbiano en los cuales los organismos que generan energía a través del transporte de electrones, mediado por enzimas, desde un donante de electrones hasta un receptor externo de electrones, como el oxígeno, presentan un metabolismo respiratorio. En contraste, el metabolismo fermentativo no involucra la participación de un receptor externo de electrones (Salamony et al., 2024).

Cuando el oxígeno molecular actúa como receptor de electrones en el metabolismo respiratorio, el proceso se denomina respiración aeróbica. Los organismos que dependen exclusivamente de la respiración aeróbica para obtener energía son conocidos como aerobios obligados, ya que solo pueden sobrevivir en presencia de oxígeno. Los organismos que producen energía mediante fermentación y que sobreviven en ambientes sin oxígeno se denominan anaerobios obligados. En contraste, hay microorganismos que pueden crecer tanto en presencia como en ausencia de oxígeno, conocidos como anaerobios facultativos

Los microorganismos se clasifican según su estructura y función celular en dos principales grupos: los procarióticos y los eucarióticos. Los procarióticos, que incluyen eubacterias y arqueobacterias, son cruciales en la conversión biológica de la fracción orgánica de los residuos sólidos y se conocen comúnmente como bacterias. Por otro lado, los eucarióticos abarcan plantas, animales y protistas. Dentro de este grupo, los hongos, levaduras y actinobacterias son particularmente importantes para la conversión biológica

*Bacterias.* - Son los organismos dominantes en el tratamiento biológico de residuos y en muchos sistemas ecológicos, incluyendo las aguas corrientes, aguas estancadas en suelos y también en la atmósfera. Las bacterias son unicelulares y tienen la forma de: esferas (cocos) cuyo diámetro varía de 0,5 a 4  $\mu\text{m}$ ; estas bacterias con forma de barras (bacilos) tienen dimensiones que varían entre 0,5 y 20  $\mu\text{m}$  de largo y de 0,5 a 4  $\mu\text{m}$  de ancho, mientras que las bacterias en forma de espiral (espirilos) pueden superar los 10  $\mu\text{m}$  de largo y tienen un ancho de aproximadamente 0,5  $\mu\text{m}$ . Las bacterias son ubicuas

en la naturaleza (presente en todas partes al mismo tiempo) en ambientes aerobios y anaerobios.

La composición química de una bacteria es: aproximadamente 80 % formada por agua y es a través del agua que la célula bacteriana recibe su alimento en forma disuelta; 20 % de materia seca, de la cual el 90 % es orgánica (50 % de C, 20 % de O, 15 % de N y 5 % de H) y 10 % es inorgánica (50 % de P, 9 % de Ca, 11 % de Na, 8 % de Mg, 6 % de K, 1 % de Fe y resto S). su fórmula química aproximada es  $C_5H_7NO_2$  (más común) o  $C_{42}H_{100}N_{11}O_{13}P$ .

Hongos, se consideran protistas multicelulares, no fotosintéticos y heterotróficos. Tienen la capacidad de crecer en condiciones de baja humedad que no favorecen a las bacterias. Además, pueden tolerar un rango de pH relativamente amplio, desde 2 hasta 9. Su metabolismo es principalmente aeróbico y se desarrollan en estructuras largas llamadas hifas, que tienen un ancho que varía entre 4 y 20  $\mu m$ .

Las levaduras son hongos unicelulares que no forman filamentos (micelios). Algunas tienen una forma elíptica, con dimensiones que varían entre 8 y 15  $\mu m$  de largo por 3 a 5  $\mu m$  de ancho, mientras que otras presentan una forma esférica, con un tamaño de 8 a 12  $\mu m$ . En el procesamiento industrial, las levaduras se dividen en dos categorías: naturales y cultivadas.

Los actinobacterias son organismos con características intermedias entre bacterias y hongos. Su forma es similar a la de los hongos, con un ancho que varía entre 0,5 y 1,4  $\mu m$ . En la industria, estos organismos se utilizan ampliamente para la producción de antibióticos.

Las condiciones ambientales, como la temperatura y el pH, influyen significativamente en la supervivencia y el crecimiento de los microorganismos. El crecimiento óptimo ocurre dentro de un rango relativamente estrecho de temperatura y valores de pH. Se ha observado que las tasas de crecimiento se duplican aproximadamente con cada incremento de 10 °C en la temperatura, hasta alcanzar el nivel óptimo (Awhangbo et al., 2024).

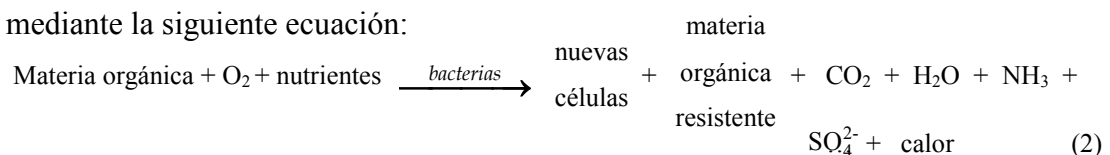
De acuerdo con la gama de temperatura en la que las bacterias funcionan mejor, se pueden clasificar como psicrófilas (de - 30 a 30 °C); mesófilas (de 20 a 50 °C) o termófilas (de 45 a 75 °C).

El pH no es un factor crítico para el crecimiento de microorganismos dentro del rango de 6 a 9. Sin embargo, el pH óptimo para el crecimiento bacteriano suele estar entre 6,5 y 7,5. Otro requisito ambiental fundamental es el contenido de humedad, especialmente en procesos secos como el compostaje. En muchas operaciones de compostaje aeróbico, es necesario añadir agua para asegurar una actividad bacteriana óptima (El-kebeer et al., 2024).

Las transformaciones biológicas aerobias y anaerobias, se consideran en dos bloques, donde se tiene a la digestión aerobia, la cual se define, como la digestión aeróbica que es un método alternativo para el tratamiento de los fangos orgánicos generados durante diversas operaciones de tratamiento de aguas residuales. Los digestores aerobios pueden utilizarse para tratar: exclusivamente fangos activados o de filtros percoladores; mezclas de fangos activados o de filtros percoladores con fangos primarios; o fango biológico en exceso de plantas de tratamiento de fangos activados sin sedimentación primaria (Okopi et al., 2024).

Actualmente, se utilizan dos variantes principales del proceso de digestión aeróbica: el sistema convencional y el sistema de oxígeno puro. Este proceso puede llevarse a cabo de forma continua o discontinua. En la digestión aeróbica convencional, el fango se airea durante un período prolongado en un tanque abierto, sin calefacción, utilizando difusores convencionales o aireadores superficiales. En plantas de menor tamaño, se emplea el sistema discontinuo, en el cual el fango se airea y mezcla completamente durante un período extenso, para luego permitir que se sedimenten en el mismo tanque o cuba (Molina-Peñate et al., 2024). La digestión con oxígeno puro es una variante del proceso de digestión aeróbica en la que el aire se reemplaza por oxígeno de alta pureza. El fango resultante es similar al que se obtiene mediante los métodos convencionales de digestión aeróbica (Chubur et al., 2024).

La transformación aeróbica general de los residuos sólidos puede representarse mediante la siguiente ecuación:



Si la materia orgánica en los residuos sólidos se representa sobre una base molar como:  $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ , entonces no se considera la producción de nuevas células y de sulfato, y la

composición del material resistente se representa como  $C_wH_xO_yN_z$ . En este caso la cantidad de oxígeno requerido para la estabilización aeróbica de la fracción orgánica biodegradable de los RSU puede estimarse utilizando la siguiente ecuación:

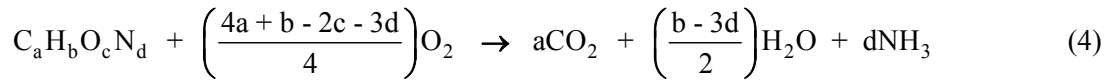


Dónde:  $r = 0,5[b - nx - 3(d - nz)]$

$$s = a - nw$$

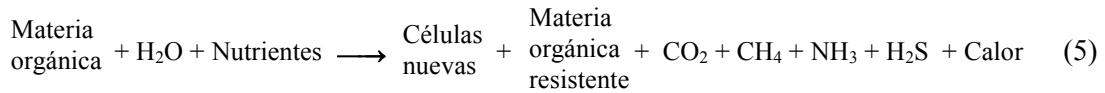
$C_aH_bO_cN_d$  y  $C_wH_xO_yN_z$ : representan la composición molar empírica del material orgánico presente al inicio y al término del proceso (R. Chen et al., 2024).

Si se produce la conversión completa la ecuación correspondiente es:

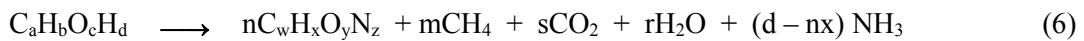


La digestión anaeróbica es un proceso que descompone la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular. Este proceso se utiliza principalmente para la estabilización de fangos concentrados generados durante el tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos diluidos y de determinados residuos industriales (Xu et al., 2024).

La transformación anaeróbica general de los residuos sólidos se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

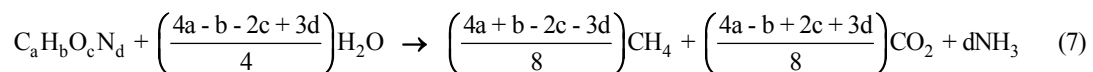


De manera práctica en el proceso de transformación se puede representar con la siguiente ecuación:



dónde:  $s = a - nw - m$ ,  $r = c - ny - 2s$

En el caso de que los residuos orgánicos estén completamente estabilizados durante la digestión anaeróbica, la conversión global se puede representar con la siguiente ecuación simplificada:



La selección del proceso biológico, se lleva a cabo mediante ambos tipos de procesos, aeróbicos y anaeróbicos, juegan roles importantes en la gestión de residuos sólidos.

Los procesos anaeróbicos tienen la ventaja de generar energía en forma de metano, convirtiéndose así en productores netos de energía. En contraste, los procesos aeróbicos requieren un aporte de energía adicional debido a la necesidad de suministrar oxígeno para la descomposición de los residuos. Sin embargo, estos procesos son relativamente simples de operar y, si se gestionan adecuadamente, pueden reducir de manera significativa el volumen de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (Da Silva et al., 2024).

**Tabla 5.** *Comparación entre los procesos aeróbicos y anaeróbicos para el procesamiento de la fracción orgánica de los RSM*

<b>Característica</b>	<b>Procesos aerobios</b>	<b>Procesos anaerobios</b>
Uso energético	Consumidor de energía	Producto neto de energía
Productos finales	Humus, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Fangos, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
Reducción de volumen	Hasta el 50 %	Hasta el 50 %
Tiempo de procesamiento	20 – 30 días	20 – 40 días
Objetivo primario	Reducción de volumen	Producción de energía
Objetivo secundario	Producción de compost	Reducción de volumen, estabilización de residuos.

Sistemas de tratamiento y conversión biológica, Los sistemas de tratamiento biológico se clasifican en forma amplia en: Sistemas de cultivo en suspensión, sistemas de cultivo fijo y sistemas duales o mixtos (biológicos fijos y en suspensión).

En estos sistemas, el tratamiento de los residuos requiere el uso de recipientes o tanques diseñados para tales propósitos, sea para cultivo en suspensión, para cultivo fijo o para la combinación de ambos.

En el estudio de las transformaciones biológicas, el crecimiento de microorganismos involucra a reacciones bioquímicas (bioconversiones) cuya ley de crecimiento microbiano queda descrita por la ecuación de MONOD. Por lo tanto, debido a la presencia de estas células vivas las transformaciones o bioconversiones deben analizarse en recipientes denominados reactores biológicos o biorreactores que operen en condiciones de reacciones moderadas y altos rendimientos (Yusof et al., 2024).

Los biorreactores característicos que se utilizan en aplicaciones de medio ambiente son de tres tipos básicos: Reactores discontinuos, reactores de tanque agitado de flujo continuo y reactor de flujo en pistón, que se usan tanto como biorreactores de cultivo en suspensión o de película fija.

**Tabla 6.** *Tipos de biorreactores y sus usos característicos*

Tipo de Biorreactor	Usos Característicos
<b><i>Biorreactores de crecimiento en suspensión</i></b>	
Discontinuo	El test de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es altamente eficaz para evaluar la eliminación de componentes específicos en aguas residuales.
Tanque agitado de flujo continuo (CSTR)	En el contexto de tratamiento de residuos, se aplican diversos métodos como la digestión anaeróbica para lodos y aguas concentradas, el uso de balsas aireadas para tratar residuos industriales, y la estabilización de estanques tanto para aguas residuales industriales como municipales. Estos procesos son
Flujo en pistón (PFR)	fundamentales en el tratamiento de lodo activo en aguas residuales y en la gestión de residuos industriales y municipales. Adicionalmente, incluyen la nitrificación y ofrecen una alta eficacia en la eliminación de componentes individuales presentes en las aguas residuales.

Los biorreactores de cultivo en suspensión, en esta categoría, el reactor más simple es el reactor discontinuo. El reactor se llena con proporciones adecuadas de líquido y corriente de lodo que han de tratarse, el cultivo de bacterias que va usarse y los nutrientes requeridos como nitrógeno y fósforo. A continuación, con el objeto de mantener el contenido del reactor en suspensión, se agita en caso necesario y se introduce aire u oxígeno si el proceso es aerobio (DeCola et al., 2024).

La dinámica de eliminación de contaminantes en un reactor discontinuo se asemeja a la observada en un reactor ideal de flujo pistón, sistema que puede conducir a la eliminación altamente eficaz de contaminantes individuales. Este reconocimiento ha conducido al concepto de reactores discontinuos secuenciales, sistema de tratamiento

que utiliza varios reactores discontinuos que operan en paralelo, uno de ellos puede estar llenándose, otro vaciándose y otro u otros pueden estar operando. De esta forma el flujo es continuo, aunque el tratamiento sea discontinuo, con tal funcionamiento un solo reactor puede operar de forma aerobia durante cierto tiempo como para obtener la nitrificación del amoníaco y operar posteriormente en ausencia de oxígeno, como para conseguir una desnitrificación (Lee et al., 2024).

Los biorreactores de cultivo fijo, son los reactores de cultivo fijo llamados también de película fija, exhiben alguna de las características de los tres tipos básicos de reactores mencionados antes, pero la mayoría de los microorganismos se adhieren a la superficie y de esta manera se mantienen en el reactor. Mientras los microorganismos se desprenden de la capa adherida y pueden proliferar en el medio líquido circundante estas bacterias en suspensión tienen generalmente una influencia pequeña en la eliminación del sustrato (Tanguay-Rioux et al., 2024).

Concentración y balance de materia en los residuos orgánicos biodegradables, en los sistemas de tratamiento biológico, fundamentalmente los biorreactores, el material orgánico o residuos de interés a ser tratado, es su fracción biodegradable, en la cual se producen interacciones sustrato – organismos durante un determinado proceso de tratamiento (Prem et al., 2024).

El hecho de utilizar microorganismos para tratar material orgánico biodegradable, en aguas residuales, por ejemplo, se han desarrollado procesos que utilizan poblaciones bacterianas mixtas que se encuentran en la naturaleza debido a que, las aguas residuales constituyen una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas. Durante el tratamiento, estos materiales potencialmente contaminantes entran en contacto con comunidades bacterianas bajo condiciones específicas que permiten su degradación y metabolismo (Daskiran et al., 2024).

De otro lado, los procesos que utilizan microorganismos que intervienen en reacciones enzimáticas o células de mamíferos se enfocan en la elaboración de diversos productos, tales como insulina, antibióticos y polímeros. Así como también, en mejorar la administración y protección del medio ambiente a través de: Comprender la dinámica de la *población microbiana* mediante la simulación o modelamiento en los diversos sistemas de tratamiento (Duguma et al., 2024).

En cuanto a la concentración, se tiene al sustrato, el cual, es un término utilizado para describir la materia orgánica o los nutrientes que sufren transformación o que pueden limitar el proceso biológico es el de 'sustrato de conversión'. Por ejemplo, en el tratamiento biológico de aguas residuales, la materia orgánica carbonosa actúa como el sustrato que se convierte. Además, la 'eliminación biológica de nutrientes' se refiere al proceso de eliminación de nitrógeno y fósforo mediante técnicas de tratamiento biológico. Por otro lado, la 'eliminación de la DBO carbonosa' se refiere a la conversión biológica de la materia carbonosa en el agua residual en biomasa y productos gaseosos diversos. Durante este proceso, se asume que el nitrógeno presente en los compuestos se convierte en amoníaco.

La Bioconcentración. - Se refiere a la concentración de un contaminante directamente del agua. A menudo los contaminantes que se bioacumulan son lipofílicos y como consecuencia son almacenados o se acumulan en las grasas y aceites (Duguma et al., 2024).

La bioconcentración puede tener un valor numérico, como factor de bioconcentración (BCF), que se utiliza con frecuencia:

$$BCF = \frac{\text{Concentración de un compuesto en un organismo}}{\text{Concentración en el entorno circundante}}$$

La nitrificación es un proceso biológico en el que el amoníaco se oxida en dos etapas: primero se convierte en nitrito y, posteriormente, en nitrato (De Crescenzo et al., 2024).

La desnitrificación es un proceso biológico que transforma el nitrato en nitrógeno gaseoso y otros compuestos gaseosos (Wang et al., 2024).

El grado de conversión, se utiliza para definir conversión, en general lo mejor es, a partir de una reacción, seleccionar el reactivo limitante como base de cálculo. Es decir, desarrollando las relaciones estequiométricas y las ecuaciones de diseño se puede considerar una reacción general como:  $aA + bB \rightarrow cC + dD$ , en la cual, Las letras mayúsculas indican las especies químicas, mientras que las minúsculas se utilizan para los coeficientes estequiométricos. Al tomar la especie A como base para el cálculo, se divide la ecuación de la reacción por el coeficiente estequiométrico de la especie A. Esto permite reformular la ecuación de la reacción en la siguiente forma:

$A + (b/a) B \rightarrow (c/a) C + (d/a) D$ , y expresar todas las cantidades "por mol de A".

En la nueva expresión de la reacción para el diseño, se suele preguntar: ¿Cómo se puede cuantificar el grado de avance de esta reacción o ¿Cuántos moles de C se forman por cada mol de A consumido? Una forma útil de contestar tales preguntas consiste en definir este parámetro llamado conversión. Entonces, la conversión  $X_A$  es el número de moles de A que han reaccionado por mol de A al sistema:

$$X_A = \frac{\text{moles de A que reaccionaron}}{\text{moles de A alimentados}}$$

El balance de materiales en los residuos orgánicos, en el campo de la ingeniería ambiental se utilizan diversos métodos en el tratamiento de efluentes: Los tratamientos de materiales se dividen en tres categorías principales: físicos, químicos y bioquímicos. Los métodos físicos incluyen técnicas como la sedimentación y la filtración. Los métodos químicos abarcan procesos como la precipitación y el ablandamiento. Por su parte, los métodos bioquímicos comprenden sistemas como los lodos activados y la digestión aerobia o anaerobia. Estos tratamientos se realizan típicamente en fase líquida dentro de un tanque. Cuando en este tanque ocurre una reacción química o bioquímica, se le conoce generalmente como un reactor.

La base del análisis de todos los reactores es la ecuación del balance de materia. En el análisis del reactor puede ocurrir lo siguiente:

La acumulación puede ser positiva o negativa

La entrada puede ser a través del contorno del sistema o por generación dentro del reactor debido a la reacción.

La salida puede ser, flujo a través del contorno del sistema o por consumo debido a la reacción.

Hechas estas hipótesis, el balance de masas se puede formular de la siguiente manera:

Planteamiento general:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{acumulación de} \\ \text{reactivo dentro del} \\ \text{límite del sistema} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{entrada de} \\ \text{reactivo en} \\ \text{el sistema} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{salida de} \\ \text{reactivo del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad de generación} \\ \text{(utilización) de reactivo} \\ \text{dentro del sistema} \end{array} \right]$$

Planteamiento simplificado:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación}$$

Expresión simbólica:

$$V \frac{dC}{dt} = Q \cdot C_o - Q \cdot C + V(\text{velocidad de reacción, } r_C)$$

$$V \frac{dC}{dt} = Q \cdot C_o - Q \cdot C + V(-k \cdot C) \quad \dots (8)$$

Microbiología en los procesos de biodegradación de residuos orgánicos, El uso de células vivas para la producción de productos químicos está aumentando rápidamente cada año. Se emplean microorganismos, como bacterias, hongos y algas, así como células humanas, vegetales y animales, para fabricar una variedad de productos químicos. Entre estos se encuentran insulina, antibióticos y biosurfactantes. Los organismos vivos también juegan un papel crucial en la producción de alcohol mediante fermentación, así como en la elaboración de quesos, vinos, champán y otros productos similares. Además, los procesos biológicos son ampliamente utilizados en el tratamiento de residuos y efluentes (Devens et al., 2024).

Principales tipos de microorganismos, los microorganismos son importantes en los ambientes de agua, el aire y el suelo, no solo por su ubicuidad (que está o puede estar en todas partes) sino también por su actividad, beneficiosa o de otro tipo, en el entorno. Por tanto, la tarea del ingeniero o del científico ambiental es entender el papel de los microorganismos en cada medio concreto, para transformar ese medio beneficiosamente (Asghar et al., 2024). En ese sentido es de suma importancia una clasificación simplista del mundo microbiano en orden decreciente de tamaño y nivel de evolución celular (también según su composición celular). Finalmente, en la categoría más simple se encuentran los organismos acelulares, como los virus. Los virus no tienen una estructura celular y están en el extremo más pequeño de la escala. Consisten únicamente en material genético, ya sea ADN o ARN, envuelto en una cápside proteica. No llevan a cabo funciones metabólicas por sí mismos y dependen de células huésped para replicarse. Esta clasificación proporciona una visión general útil del mundo microbiano, basada en el tamaño, la complejidad y el nivel de evolución celular, ayudando a entender mejor las diferencias y similitudes entre los diversos grupos de microorganismos.

**Tabla 7. Tipos de microorganismos**

Reino microbiano	Algunos microbios	Estructura celular
Animales	Gusanos Helmintos	Unicelular o multicelular
Plantas	Plantas acuáticas Micrófitos Plantas de semilla Helechos Musgos	Estructura celular bien desarrollada: Eucariotas
Protistas superiores	Hongos Algas Protozoos Rotíferos Crustáceos	Estructura celular primitiva: Procariotas
Protistas inferiores	Bacterias Algas verdiazules Cianobacterias	
Virus	Muchos	Sin estructura celular

Las bacterias son los organismos dominantes en el tratamiento biológico de residuos orgánicos y en muchos sistemas ecológicos, incluyendo las aguas corrientes y estancadas en suelos y también en la atmósfera, desempeñan un papel fundamental en el tratamiento biológico de residuos orgánicos y en diversos sistemas ecológicos. En el tratamiento de residuos, las bacterias son esenciales para descomponer la materia orgánica en compuestos más simples, facilitando así la conversión de desechos en productos útiles como el compost. Este proceso biológico es crucial para la gestión de residuos sólidos y líquidos, contribuyendo a la reducción de la contaminación y la recuperación de nutrientes. Las bacterias se clasifican de diferentes formas, pero en el tratamiento de efluentes residuales se les suele describir como *aerobias* (requieren oxígeno) o *anaerobias* (no requieren oxígeno). Una característica única y esencial de las bacterias es que son organismos *unicelulares* con tamaños que oscilan de 0,5 – 5  $\mu\text{m}$  de largo y de 0,3 – 1,5  $\mu\text{m}$  de ancho. Se disponen individualmente, en parejas, en racimos o en cadenas (Ge et al., 2024).

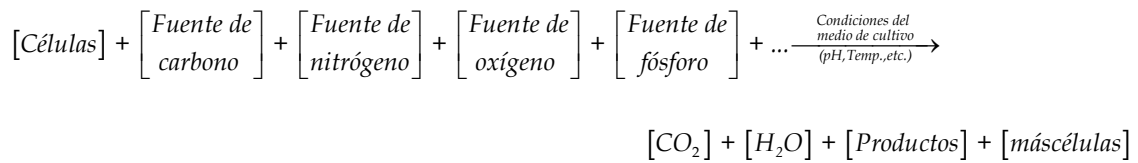
**Tabla 8. Características de una bacteria**

<p><b>Características Morfológicas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Forma General: <i>Cocos, barra, espirilo</i></li> <li>▪ Disposición de Células: <i>*Cadenas: Ejemplo, Streptococos filamentosos *Racimos: Ejemplo, micrococos * Pares o paquetes</i></li> <li>▪ Características de locomoción: <i>* Existencia o ausencia de flagelos</i></li> <li>▪ Formación de esporas</li> <li>▪ Cápsulas envueltas de lodo</li> <li>▪ Coloración grampositiva o negativa</li> </ul>
<p><b>Características Fisiológicas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Compatibilidad con Oxígeno: <i>* Aerobias * Anaerobias * Facultativas (aerobias/anaerobias): En las dos condiciones. * Obligadas (aerobias/anaerobias): Crecen en alguna de las dos condiciones.</i></li> <li>▪ Ganancia de energía de: <i>* Respiración * Fermentación * Fotosíntesis</i></li> <li>▪ Pigmentación de Células</li> <li>▪ Patogenicidad</li> </ul>

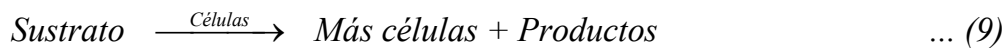
El uso de cultivos aeróbicos, en el estudio de las transformaciones biológicas, el crecimiento de microorganismos involucra a reacciones bioquímicas (bioconversiones) cuya ley de crecimiento microbiano queda descrita por la ecuación de MONOD. Por lo tanto, debido a la presencia de estas células vivas las transformaciones o bioconversiones deben analizarse en estos recipientes denominados Reactores Biológicos o Biorreactores que operen en condiciones de reacciones moderadas y altos rendimientos (Anaya-Reza et al., 2024).

En el proceso de biosíntesis, las células, también conocidas como "biomasa," utilizan nutrientes para crecer y generar tanto más células como productos valiosos. Internamente, una célula transforma estos nutrientes en energía y nuevos componentes celulares. Este proceso implica la utilización de diversas enzimas como catalizadores que facilitan una serie de reacciones para la producción de productos metabólicos.

En términos generales, el crecimiento de un organismo aeróbico puede representarse mediante la siguiente reacción:



En forma simplificada de uso general es:



Cinética de biodegradación y de crecimiento biológico, en el campo de la ingeniería ambiental son muchos los casos en los que interviene la velocidad de las reacciones para alcanzar el equilibrio. Algunos ejemplos incluyen la eliminación de compuestos orgánicos del agua, que implica tratar el agua para reducir o eliminar las sustancias orgánicas presentes. También se refiere al crecimiento de biomasa, donde microorganismos o células se multiplican y desarrollan en un entorno adecuado. La desintegración radiactiva describe el proceso por el cual átomos inestables emiten partículas o energía para alcanzar un estado más estable. La desinfección química se refiere al uso de productos químicos para eliminar o inactivar microorganismos patógenos en superficies o líquidos. Finalmente, las reacciones de los residuos industriales abarcan los cambios químicos o físicos que ocurren en los desechos generados por procesos industriales durante su manejo o tratamiento (Yan et al., 2024). La cinética de biodegradación se refiere al análisis de cómo factores como la temperatura, la presión y la concentración influyen en la rapidez con la que se lleva a cabo una reacción biológica. Este estudio permite comprender cómo estas variables afectan la velocidad con la que los microorganismos descomponen los compuestos orgánicos presentes en los residuos, con la intervención global de microorganismos en la conversión de material orgánico. Cuando se describen las reacciones sobre una base cinética, se producen diferentes órdenes de reacción para una variedad de organismos, sustratos y condiciones ambientales.

La velocidad de reacción (r), es la velocidad de reacción es el cambio en el número de moles con respecto al tiempo por unidad de volumen de una mezcla reaccionante.

$$r = \frac{1}{V} \frac{dN}{dt} \left[ \frac{\text{moles}}{\text{volumen} \cdot \text{tiempo}} \right] \quad \dots(10)$$

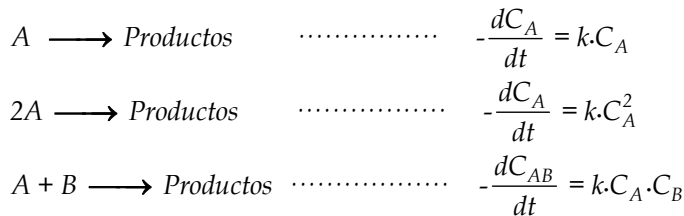
Sabiendo que:  $N = \text{Concentración (C)} \times \text{Volumen (V)}$

Además, si el volumen (V) o densidad de reacción es constante se tiene:

$$r = \frac{dC}{dt} \quad \dots(11)$$

La ley de velocidad, es la velocidad de una reacción en un momento dado es proporcional a la concentración de los reactivos, cada una elevada a una potencia que corresponde al número de moléculas de cada especie involucrada en el proceso (Chen et al., 2024).

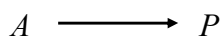
Así por ejemplo para las reacciones:



La orden de reacción, esta representado por la especificación de parámetros, asumiendo que la presión y la temperatura permanecen constantes en el sistema de reacción, el orden de reacción se determina sumando todos los exponentes a los cuales están elevadas las concentraciones en la ecuación de velocidad. Por ejemplo, si la velocidad de una reacción se describe por:

$$-\frac{dC}{dt} = k \cdot C_1^{n_1} \cdot C_2^{n_2} \cdot C_3^{n_3} \dots \quad \dots (12)$$

Las reacciones de orden cero se caracterizan por una velocidad de reacción que no varía con los cambios en la concentración de los reactivos, donde un solo reactivo A se convierte a un solo producto P.

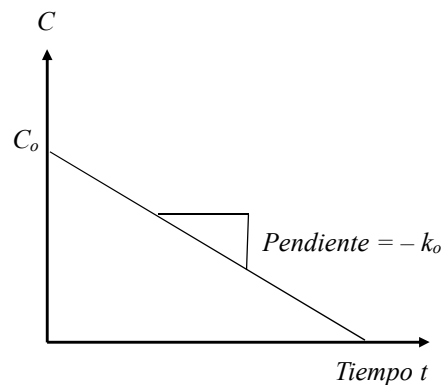


$$-\frac{dC_A}{dt} = k_o$$

Integrando:  $C_A = -k_o \cdot t + \text{Constante}$

Si:  $C_A = C_{Ao}$ , en el tiempo  $t = 0$

Entonces:  $\underline{C_A - C_{Ao} = -k_o \cdot t} \quad \dots (13)$



Reacciones de Primer Orden. - El primer orden se define cuando la velocidad es directamente proporcional a la concentración. Es decir, si la reacción es  $A \rightarrow P$ , la reacción de primer orden es:

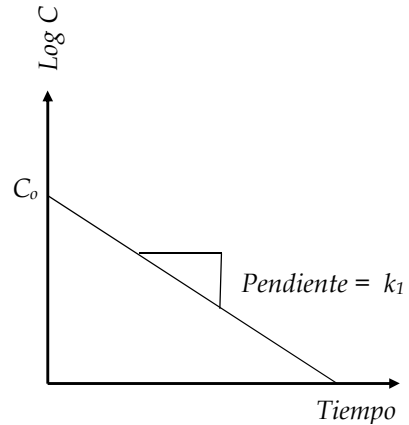
$$-\frac{dC_A}{dt} = k_1 \cdot C_A \quad , \quad k_1: \text{Constante de velocidad de primer orden}$$

$C_A$ : Concentración de A en el tiempo t

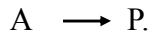
Integrando:

$$\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right) = k_1 t \quad o$$

$$\log\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right) = \frac{k_1 t}{2,3} \quad \dots (14)$$



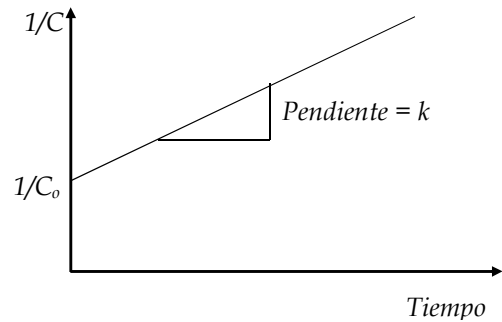
Las reacciones de segundo orden, se define cuando la velocidad es proporcional al cuadrado de la concentración (Bippus et al., 2024). La velocidad de reducción del reactivo A para una reacción de segundo orden se expresa como:



$$-\frac{dC_A}{dt} = k_2 \cdot C_A^2$$

Integrando se tiene:

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = k_2 \cdot t \quad \dots (15)$$



Las reacciones de orden variable son frecuentes en los sistemas biológicos utilizados para el tratamiento de aguas residuales referido a:

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = \frac{k_1 C_A}{1 + k_2 C_A} \quad \dots (16)$$

Ahora bien, es importante notar que a concentraciones altas  $k_2 C_A \gg 1$ ; por lo tanto, se tiene que  $1 + k_2 C_A = k_2 C_A$ , con lo cual la ecuación (16) se transforma en:

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = \frac{k_1 C_A}{k_2 C_A} = \frac{k_1}{k_2} = k \quad \dots (17)$$

Es decir, en estas condiciones, se transforma en una reacción de orden cero.

Cuando se alcanza bajas concentraciones, es decir, cuando  $I \gg k_2 C_A$ , entonces:  $1 + k_2 C_A = 1$ , así, la ecuación de velocidad (16) será:

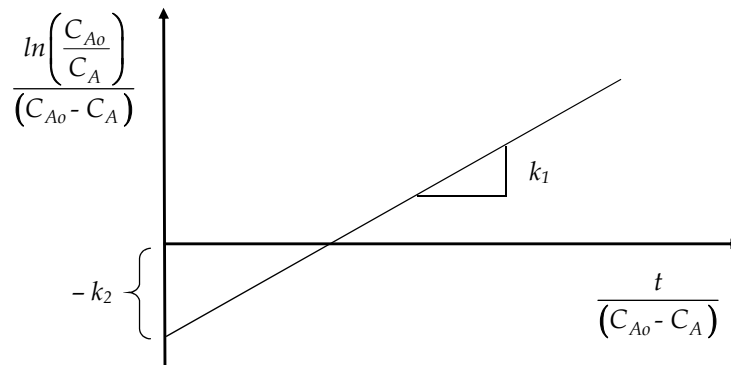
$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = \frac{k_1 C_A}{1 + k_2 C_A} = \frac{k_1 C_A}{1} = k_1 C_A \quad \dots(18)$$

Como se observa, en estas condiciones, el comportamiento varía a una reacción de primer orden, de ahí el concepto de reacciones de orden variable.

Las constantes para una cinética de orden variable también pueden ser obtenidas por el método integral. En este caso se integra la ecuación (16) y se ordena para obtener lo siguiente:

$$\frac{\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)}{(C_{A0} - C_A)} = \frac{k_1 \cdot t}{(C_{A0} - C_A)} - k_2 \quad \dots (19)$$

La cual es una recta de pendiente  $k_1$  y ordenada al origen  $-k_2$



La cinética de crecimiento biológico, se define para asegurar y optimizar el crecimiento de los microorganismos, es esencial regular las condiciones ambientales, incluyendo el pH, la temperatura, la provisión de nutrientes y elementos traza, así como la presencia o ausencia de oxígeno, y asegurar una mezcla adecuada del medio. Además, se debe proporcionar un tiempo de residencia suficiente en el sistema para que los microorganismos puedan reproducirse efectivamente. Este período de

permanencia está vinculado directamente con la tasa de crecimiento, que a su vez depende de la velocidad con la que los microorganismos metabolizan o utilizan los residuos. (Marzo-Gago et al., 2024).

En los sistemas de cultivo continuo y discontinuo, la tasa de crecimiento de las células bacterianas se puede describir utilizando la siguiente fórmula:

$$r_g = \mu C_c \quad \dots (20)$$

donde:  $r_g$  : tasa de crecimiento celular (bacteriano) (masa/volumen unitario.tiempo)

$\mu$  : tasa de crecimiento específico (tiempo<sup>-1</sup>)

$C_c$  : concentración de células (microorganismos) (masa/volumen unitario)

En los cultivos de alimentación discontinua, dado que la ecuación  $dC_c/dt = r_g$ , se cumple, también se puede utilizar la siguiente relación para describir la tasa de crecimiento de las células:

$$\frac{dC_c}{dt} = \mu C_c \quad \dots (21)$$

En los cultivos de alimentación discontinua, cuando uno de los requisitos esenciales para el crecimiento, como el sustrato o los nutrientes, está presente en cantidades limitadas, dicho componente se agotará primero y detendrá el crecimiento. Este fenómeno también limita el crecimiento en cultivos continuos. La influencia de la disponibilidad limitada de sustrato o nutrientes en el crecimiento se puede describir utilizando la ecuación formulada por Monod:

$$\mu = \mu_{max} \frac{C_s}{K_s + C_s} \quad \dots (22)$$

donde:  $\mu$  : tasa de crecimiento específico (tiempo<sup>-1</sup>)

$\mu_{max}$  : máxima tasa de crecimiento específico (tiempo<sup>-1</sup>)

$C_s$  : concentración del sustrato que limita el crecimiento  
(masa/unidad de volumen)

$K_s$  : constante de velocidad mitad, concentración de sustrato a la mitad  
de la máxima tasa de crecimiento (masa/unidad de volumen)

Si se sustituye en la ecuación (20) el valor de la ecuación (22), la expresión de la velocidad o tasa de crecimiento celular que resulta es:

$$r_g = \frac{\mu_{max} C_C C_S}{K_S + C_S} \quad \dots (23)$$

En los sistemas de cultivo, tanto continuos como discontinuos, el sustrato se divide en dos fracciones durante el crecimiento celular: una se convierte en nuevas células, mientras que la otra se oxida, generando productos finales orgánicos e inorgánicos. La relación entre la utilización del sustrato y la tasa de crecimiento se describe mediante la siguiente fórmula. Los estudios de laboratorio han demostrado que la producción está influenciada por varios factores: (a) el estado de oxidación de la fuente de carbono y los nutrientes; (b) el grado de polimerización del sustrato; (c) las rutas metabólicas; (d) la tasa de crecimiento; y (e) diversos parámetros del cultivo.

$$r_g = -Yr_s \quad \dots (24)$$

donde:  $r_g$  : tasa de crecimiento celular (masa/unidad de volumen)

$Y$  : coeficiente de producción máxima medido durante cualquier periodo finito de la fase de crecimiento exponencial, definido como la relación entre la masa de células formadas y la masa de sustrato consumido (mas/masa)

Sustituyendo el valor de  $r_g$  de la ecuación (23) en la ecuación (24), el grado de utilización de sustrato se expresa como:

$$r_s = -\frac{\mu_{max} C_C C_S}{Y(K_S + C_S)} \quad \dots (25)$$

En esta ecuación (25) :  $\frac{\mu_{max}}{Y} = k$ , el término  $k$  se define como la tasa máxima de utilización de sustrato/unidad de masa de microorganismos.

Sustituyendo en la ecuación (25) incluyendo el término  $k$  y reordenando los demás términos se tiene la expresión final para  $r_s$ :

$$r_s = -\frac{k C_C C_S}{K_S + C_S} \quad \dots (26)$$

En los sistemas de tratamiento biológico que utilizan microorganismos, las células no siempre se encuentran en la fase de crecimiento exponencial debido a la variabilidad en su edad. La energía destinada al mantenimiento celular es esencial, ya que la tasa de crecimiento se ve afectada por factores como la mortalidad celular y la depredación,

lo que provoca una reducción en la masa celular proporcional a la concentración de microorganismos. Este fenómeno, denominado descomposición endógena, se puede formular de la siguiente manera:

$$r_d(\text{descomposición endógena}) = -k_d C_C \quad \dots (27)$$

donde:  $k_d$  : coeficiente de descomposición endógena (tiempo<sup>-1</sup>)

$C_C$ : concentración de células (masa/unidad de volumen)

Combinando la ecuación (27) con las ecuaciones (23) y (24) se tienen nuevas expresiones para la *tasa neta de crecimiento celular* ( $r_g'$ : en masa/unidad de volumen):

$$r_g' = \frac{\mu_{max} C_C C_S}{K_S + C_S} - k_d C_C \quad \dots (28)$$

$$r_g' = -Y r_S - k_d C_C$$

La expresión correspondiente para la tasa neta de crecimiento específico ( $\mu'$ : h<sup>-1</sup>)

Los efectos de la respiración endógena en la producción neta de microorganismos se consideran al establecer la producción observada mediante la siguiente fórmula:

$$\mu' = \mu_{max} \frac{C_S}{K_S + C_S} - k_d \quad \dots (29)$$

$$Y_{obs} = -\frac{r_g'}{r_S} \quad \dots (30)$$

La temperatura tiene un impacto considerable en las constantes de velocidad de los procesos de tratamiento biológico. Afecta notablemente las actividades metabólicas de los microorganismos y también influye en la velocidad de transferencia de gases, así como en las propiedades de sedimentación de los sólidos biológicos (Hou y Zhu, 2024).

Este efecto de la temperatura sobre la velocidad de reacción de un proceso biológico se puede expresar del siguiente modo:

$$r_T = r_{20} \theta^{(T-20)} \quad \dots (31)$$

donde:  $r_T$  : velocidad de reacción a T °C

$r_{20}$  : velocidad de reacción a 20 °C

$\theta$  : coeficiente de actividad-temperatura

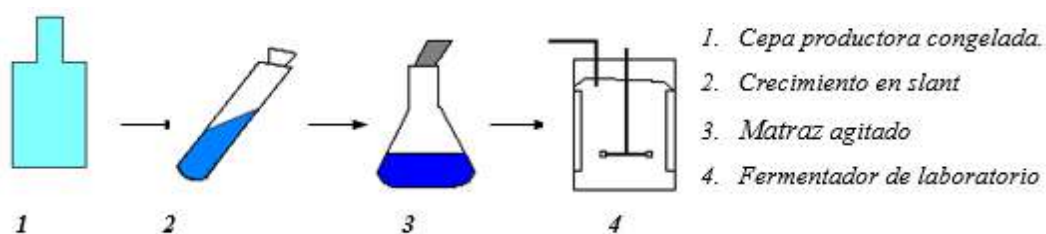
T : temperatura, en °C

Diseño y operación de un biorreactor por lotes con cultivo en suspensión, el biorreactor por lotes es el ejemplo de un sistema cerrado, el cual no intercambia ni masa ni energía con el medio que lo rodea, es decir, es el típico reactor batch adiabático. Este biorreactor constituye el componente esencial en cualquier proceso bioquímico que involucre sistemas microbianos, como bacterias y hongos, así como cultivos celulares de mamíferos o plantas en suspensión, usados para procesos biológicos, los cuales incluye fermentadores (Li y Huang, 2024).

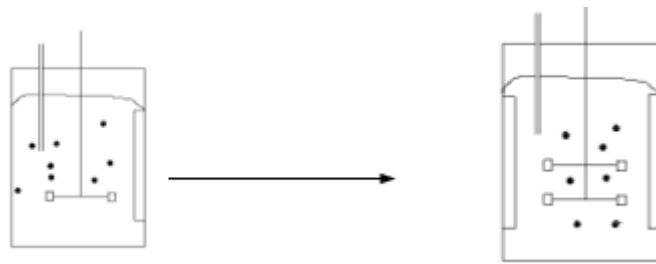
Diseño del biorreactor, la función principal de un biorreactor diseñado adecuadamente es proporcionar un entorno controlado que facilite el crecimiento óptimo y la producción de productos deseados, o ambos, en el sistema celular específico utilizado. (Singh et al., 2024)

El escalamiento en los biorreactores tiene una gran relevancia específica en los procesos de fermentación, pues de su solución correcta depende que un proceso desarrollado en el laboratorio pueda pasarse a una escala industrial. El escalamiento se utiliza por lo general utilizando un cultivo almacenado viable o una cepa liofilizada, inoculando con ellos en un matraz agitado (300 – 500 ml.) o pequeños fermentadores. Después se inoculan fermentadores piloto (5 – 2 500 L) y finalmente se pasa a la escala de producción, cuyo volumen varía entre 5 000 y 400 000 L.

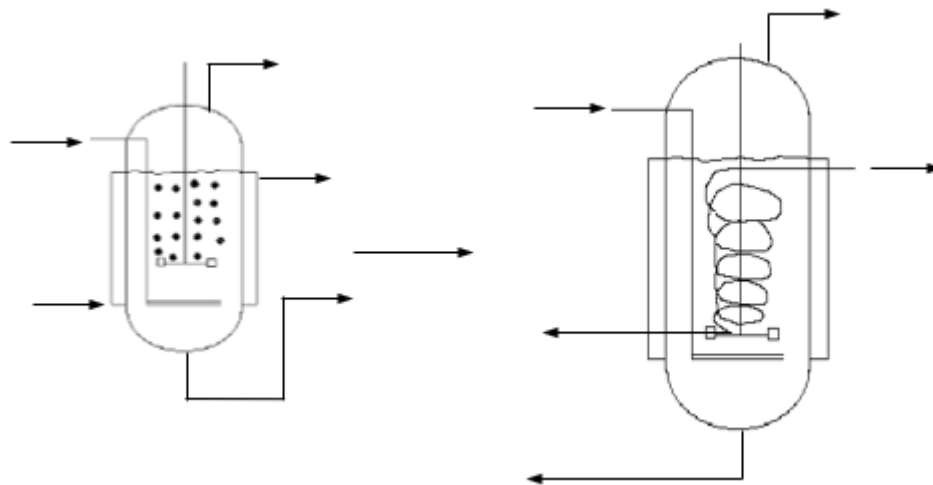
Cabe señalar que en cada una de las escalas se persiguen fines diferentes. En el laboratorio se buscan nuevos productos, cepas, medios de cultivo y se estudian mecanismos de control. En planta piloto se estudian efectos de aireación, temperatura, pH, cinética y dinámica de los cultivos. En escala industrial los fermentadores de producción operan con un calendario fijo y se trata de aumentar la productividad (L/h).



**Figura 1.** Biorreactores de laboratorio



**Figura 2.** Planta piloto (5 lt– 2500 lt)



**Figura 3.** Planta de producción (5000 lt – 400 000 lt)

Para el diseño de un sistema de agitación estándar en un biorreactor, es necesario conocer o asumir valores para las siguientes variables a fin de dimensionar el biorreactor adecuadamente (Wei et al., 2024).

Viscosidad del fluido (kg/m.s) :	$\gamma$ : 0,001 – 0,020
Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> ) :	$\delta$ : 900 – 1050
Volumen de operación del biorreactor (m <sup>3</sup> ):	$V_B$ : 0,001 – 500
Relación altura/diámetro:	H/D : 1 - 5
RPM del agitador:	N : 30 - 500
Eficiencia del motor:	$\varepsilon$ : 50 – 90

Asimismo, se consideran las siguientes proporciones geométricas, cuya nomenclatura se detalla a continuación:

Volumen total del biorreactor:	$V = V_{BR} / 0.82$
Diámetro del tanque:	$D_T = [ 4V / (3.1416 \times H/D)]^{1/3}$

Altura del tanque:  $H_T = D_T \times H/D$   
 Diámetro de rotación de agitación:  $D_A = D_T/3$   
 Distancia de hélice:  $D_D = D_A \times 2/3$   
 Dimensiones de hélice de agitación:  $A_P = D_T/10$   
 $H_A = D_T/12$   
 Altura de agitación:  $H_B = 1.2 \times D_A$   
 Altura de volumen de operación del tanque:  $H_L = 4 V_{BR}/(3.1416 \times D_T^2)$

La operación del biorreactor, se define en el balance de masa, luego de cargarse los reactivos en el reactor, se mezclan y se da inicio a la reacción; es así que en el biorreactor por lotes, donde la mezcla reacciona durante un tiempo específico sin entradas ni salidas, se observa una operación no estacionaria con una composición que varía temporalmente, aunque es uniforme en todos los puntos del biorreactor en cada instante. Las etapas del crecimiento celular en este tipo de biorreactor con nutrientes añadidos y una pequeña cantidad inicial de células se describen de la siguiente manera:  
 Fase I - Latencia: Durante esta fase, la concentración de células permanece casi constante, con un incremento mínimo observable.

Fase II - Crecimiento Exponencial: En esta etapa, la velocidad de crecimiento celular es proporcional a la concentración de células presentes, resultando en un crecimiento exponencial.

Fase III - Estacionaria: Las células alcanzan un equilibrio donde el crecimiento se ve limitado por la falta de nutrientes esenciales, resultando en una fase de crecimiento estable.

Fase IV - Muerte: En esta fase final, se observa una disminución en la concentración de células vivas, indicativa de la muerte celular.

Leyes de Velocidad.

\* *Células + Sustrato* → *Más células + Producto*

\* *Ecuación Monod para el crecimiento exponencial:*

$$r_g = \mu \cdot C_C \quad \dots (32)$$

Donde :  $r_g$  : *Velocidad de crecimiento celular (g/L.s)*

$C_C$  : *Concentración de células (g/L)*

$\mu$  : *Velocidad de crecimiento específica (s<sup>-1</sup>)*

$$\mu = \mu_{max} \frac{C_s}{K_s + C_s} \quad (s^{-1}) \quad \dots (33)$$

$\mu_{max}$  : Velocidad de reacción de crecimiento específica máxima ( $s^{-1}$ )

$K_s$  : Constante de Monod (g/L)

$C_s$  : Concentración del sustrato (g/L)

- \* Cuando **Ks es pequeña**, en el caso de varias especies de bacterias, entonces las ecuaciones (32) y (33) se transforma en:

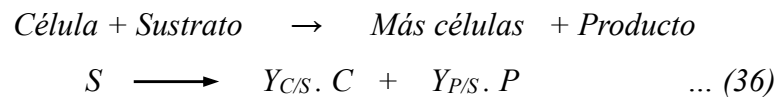
$$r_g = \mu_{max} \cdot C_C \quad \dots (34)$$

- \* Combinando las ecuaciones (32) y (33) obtenemos la ecuación de velocidad:

$$r_g = \mu_{max} \frac{C_C \cdot C_s}{K_s + C_s} \quad \dots (35)$$

### **Estequiometria. -**

- \* La estequiometria del crecimiento celular es muy compleja y varía con el sistema microorganismos/nutrientes y con las condiciones del entorno, como pH, temperatura y potencial redox. En general tenemos:



Donde los coeficientes de rendimiento son:  $Y_{C/S}$  y  $Y_{P/S}$ :

$$Y_{C/S} = \frac{\text{masa de células nuevas formadas}}{\text{masa de sustrato consumida para producir células nuevas}}$$

$$Y_{P/S} = \frac{\text{masa de producto formado}}{\text{masa de sustrato consumida para formar producto}}$$

- \* El mantenimiento celular correspondiente a las actividades diarias de la célula es:

$$m = \frac{\text{masa de sustrato consumida para mantenimiento}}{\text{masa de células} \cdot \text{tiempo}}$$

$$\text{Valor típico : } m = 0,05 \frac{\text{g sustrato}}{\text{peso seco (g)}} \cdot \frac{1}{h} = 0,05 h^{-1}$$

- \* La rapidez de consumo de sustrato para mantenimiento, sea que las células estén creciendo o no, es:

$$r_{Sm} = m.C_C \quad \dots (37)$$

- \* La velocidad de consume de nutrientes ( $-r_s$ ) (contabilización de sustrato), se puede escribir:

$$\begin{pmatrix} \text{Velocidad neta} \\ \text{de consumo} \\ \text{de sustrato} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Velocidad de} \\ \text{consumo por} \\ \text{las células} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{Velocidad de} \\ \text{consumo para} \\ \text{formar producto} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{Velocidad de} \\ \text{consumo para} \\ \text{mantenimiento} \end{pmatrix}$$

$$-r_s = Y_{S/C}.r_g + Y_{S/P}.r_p + m.C_C \quad \dots (38)$$

- \* En la fase de crecimiento, la velocidad de desaparición del sustrato (formación del producto) es:

$$-r_s = Y_{S/C}.r_g + m.C_C \quad \dots (39)$$

- \* En la fase estacionaria, la velocidad de formación de producto correspondiente es:

$$r_p = r_g.Y_{P/C} \quad \text{ó}$$

$$r_p = \frac{K_p.C_{Sn}.C_C}{K_{Sn} + C_{Sn}} \quad \dots (40)$$

Donde :  $C_{Sn}$  : Concentración del nutriente secundario (g/L)

$K_p$  : Constante de velocidad específica con producto ( $s^{-1}$ )

$C_C$  : Concentración de células (g/L)

$K_{Sn}$  : Constante (g/L)

$$r_p = Y_{P/Sn}(-r_{Sn})$$

- \* La velocidad neta de consumo del sustrato durante la fase estacionaria es:

$$-r_{Sn} = m.C_C + Y_{Sn/P}.r_p$$

$$= m.C_C + \frac{Y_{Sn/P}.K_p.C_{Sn}.C_C}{K_{Sn} + C_{Sn}} \quad \dots (41)$$

Los balances de Masa, Utilizando un balance de masa sobre la base de un reactor CSTR (quimiostato) de volumen constante, como se muestra en la figura tendremos un balance de microorganismos del siguiente modo:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de células (g/s)} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad con} \\ \text{que entran las} \\ \text{células (g/s)} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{velocidad con} \\ \text{que salen las} \\ \text{células (g/s)} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad neta} \\ \text{de generación de} \\ \text{células vivas (g/s)} \end{array} \right]$$

$$V \frac{dC_c}{dt} = v_o \cdot C_{C_o} - v \cdot C_c + (r_g - r_d)V \quad \dots (42)$$

\* El balance correspondiente del sustrato es:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de sustrato} \\ \text{(g/s)} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad con} \\ \text{que entra el} \\ \text{sustrato} \\ \text{(g/s)} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{velocidad con} \\ \text{que sale el} \\ \text{sustrato} \\ \text{(g/s)} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{generación} \\ \text{de sustrato} \\ \text{(g/s)} \end{array} \right]$$

$$V \frac{dC_s}{dt} = v_o \cdot C_{S_o} - v \cdot C_s + r_s \cdot V \quad \dots (43)$$

\* Para el caso del biorreactor por lotes donde,  $v_o = v = 0$  (en la mayoría de sistemas  $C_{C_o} = 0$ ), los balances de masa se desarrollan como sigue:

**Células:**

$$V \frac{dC_c}{dt} = r_g V - r_d V$$

$$\frac{dC_c}{dt} = r_g - r_d \quad \dots (44)$$

**Sustrato:** La velocidad de desaparición del sustrato ( $-r_s$ ) en la fase de crecimiento celular es:

$$V \frac{dC_s}{dt} = r_s V = Y_{S/C} (-r_g) V - m \cdot C_c \cdot V$$

$$\frac{dC_s}{dt} = Y_{S/C} (-r_g) - m \cdot C_c \quad \dots (45)$$

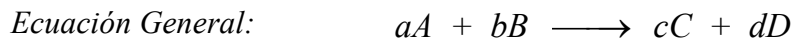
**Para el caso de células en la fase estacionaria, donde no hay crecimiento (mantenimiento celular y la formación de producto), se tiene:**

$$V \frac{dC_s}{dt} = -m C_c V + Y_{S/P} (-r_p) V \quad \dots (46)$$

**Producto:** La velocidad de formación de producto (fase de crecimiento estacionario) se puede relacionar con la velocidad de consumo de sustrato, mediante el siguiente balance:

$$V \frac{dC_P}{dt} = r_P V = Y_{P/S} (-r_S) V \quad \dots (47)$$

**Conversión:** Para el caso del biorreactor por lotes isotérmico se tiene:



Ley y orden de velocidad:  $-r_A = k \cdot C_A^x \cdot C_B^y$  ;  $(x+y)$ : ordenes de velocidad

Balance de masa:  $\frac{dX_A}{dt} = \frac{(-r_A)V}{N_{A0}} = \frac{(-r_A)}{C_{A0}} \quad \dots (48)$

El software Matlab, MATLAB, que se traduce como "Laboratorio de Matrices", es una herramienta de software especializada en la manipulación y procesamiento de matrices. Este lenguaje de programación facilita la realización de operaciones matriciales de manera directa y eficiente, superando las dificultades que pueden surgir en lenguajes como JAVA, donde estas operaciones pueden ser más complejas de implementar., así mismo la aplicación de MATLAB en Ingeniería y Ciencias Industriales, el dominio de MATLAB se ha convertido en una competencia indispensable para muchos roles en ingeniería. Este software se utiliza para resolver problemas técnicos en diversas áreas de ingeniería, ciencias y programación, siguiendo un enfoque sistemático. Este método se aplica no solo en disciplinas como química, física, y termodinámica, sino también en campos como economía y sociología. A continuación, se presenta un esquema general para abordar problemas técnicos con MATLAB:

Se debe realizar la definición del problema, en donde se tiene que tener clarificación, la cual es fundamental tener una comprensión precisa del problema. A menudo, la creación de diagramas o esquemas facilita esta comprensión y ayuda a visualizar los aspectos clave del problema, luego la identificación de valores de entrada y salida, en donde se deben tener datos conocidos y desconocidos, siendo esencial especificar los valores que se conocen y los resultados que se desean obtener. asegúrese de registrar

las unidades correspondientes para evitar errores debidos a un manejo incorrecto de las unidades y se debe complementar con las constantes relevantes, en donde se incluya cualquier constante necesaria para los cálculos, como la constante universal de los gases o la aceleración gravitacional. estos valores pueden ser anotados en el diagrama o presentados en una tabla para facilitar su referencia.

El software polymath educacional, Polymath Educacional es un sistema informático que ha sido creado para fines educativos o profesionales. Este sistema incluye varios programas que ayudan a los usuarios a aplicar de manera muy eficaz métodos numéricos de análisis útiles cuando se está buscando una solución a un problema interactivo con un ordenador personal.

Los resultados se muestran gráficamente para que se puedan comprender fácilmente y para integrarlos en documentos e informes. Ingenieros, matemáticos, científicos, estudiantes o cualquier persona con necesidad de resolver problemas apreciará la rapidez y eficacia en la solución del problema.

***Polymath – Versión 6.1.-*** Polymath 5.1, 6.0, 6.1 fueron programados por Michael Elly. PolyMath 6.1 es la versión educativa más reciente del software PolyMath. Esta versión incorpora un editor de pantalla completa con codificación por colores, diseñado para mejorar la eficiencia del usuario. Además, todas las interfaces han sido optimizadas para facilitar una experiencia de uso más fluida y efectiva, así mismo permite al usuario resolver en esta versión de PolyMath el manejo de hasta 30 ecuaciones diferenciales ordinarias simultáneas, 30 ecuaciones algebraicas no lineales simultáneas y 40 ecuaciones algebraicas explícitas. Además, ofrece una funcionalidad distintiva para exportar automáticamente cualquier problema desde PolyMath a Excel con un solo clic. De esta manera, los problemas pueden resolverse íntegramente en PolyMath o ser trasladados a Excel™ para su resolución. Incluye también un complemento, PolyMath ODE\_Solver, que facilita la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias directamente en Excel.

Polymath 6.1 es único en el sentido de que los problemas se ingresan al igual que sus ecuaciones matemáticas y hay una curva de aprendizaje mínima. Las soluciones de problemas se encuentran fácilmente con algoritmos fuertes y resistentes. Esto permite

que se utilice una solución de problemas muy conveniente en la ingeniería de reacciones químicas y otras áreas de la ingeniería

Algoritmo y optimización, El algoritmo es un lenguaje informático creado para facilitar una expresión breve y precisa; es decir el algoritmo permite llegar a un resultado final a través de un proceso de cálculo dentro de un programa. El logro del mejor resultado posible de un proceso mediante el aprovechamiento al máximo de sus potencialidades es la optimización, al desarrollar una ecuación de diseño en un software, el término óptimo se designa como la posición más adecuada del proceso para conseguir un objetivo.

Modelamiento matemático de un biorreactor, Es la representación de su sistema físico por medio de una ecuación (o conjunto de ecuaciones), la (s) cual (es) de manera limitada puede (n) representar un sistema bajo estudio. En cierta forma el modelamiento es una simulación a partir de concentraciones de entrada, flujos y dimensiones del biorreactor. Esta (s) ecuación(es) es (son) generalmente resuelta (s) por computadora.

En cuanto a la justificación de la investigación, se consideró una justificación teórica, pues, se utilizará teorías relacionadas al diseño y operación de biorreactores para el tratamiento aeróbico de residuos sólidos urbanos, estableciendo conceptos que tengan principios de la biotecnología, teoría del control y optimización y los avances tecnológicos que brinda la tecnología, los cuales se van a integrar de manera holística para lograr la reducción de residuos orgánicos contaminantes, el cual es importante cuando se dispone de un equipo como el biorreactor, llevando a cabo el tratamiento adecuado, utilizando conceptos básicos y teorías que fundamentan el funcionamiento de un biorreactor discontinuo de laboratorio, que permita el escalamiento a planta piloto o industrial para resolver tecnológicamente parte de los grandes problemas ambientales de la ciudad.

Asimismo, se estableció una justificación práctica, pues se llevará a cabo la explicación de los beneficios tangibles que brinda el diseño y operación de un biorreactor en la gestión de residuos sólidos, considerando la mejorar en la eficiencia, la facilidad para la implementación y el monitoreo, teniendo en cuenta la evaluación

de parámetros y variables de operación del biorreactor mediante la aplicación de softwares, aprovechando la difusión y expansión de la tecnología informática, con la cual se ha mejorado en forma significativa los dificultosos y prolongados procedimientos de cálculo hasta ahora, los cuales van a establecer ecuaciones de diseño, modelos matemáticos y mucha práctica en el manejo de los programas en computadora.

Del mismo modo, se consideró una justificación metodológica, pues se llevará a cabo una secuencia estructurada de procedimientos operativos para abordar los problemas de diseño con operaciones de ingeniería, considerando métodos y técnicas de investigación para obtener resultados metódicos, verificables y contrastables; con la finalidad de establecer los métodos de diseño y operación que utilizaran los biorreactores, los cuales serán integrados mediante el software de modelamiento que se va aplicar en el control del tratamiento aeróbico de materia orgánica.

En cuanto a la justificación científica, se tendrá en cuenta los avances de la tecnociencia y la biotecnología para contribuir con los aportes al campo del conocimiento científico, pues mediante el aporte científico sobre temas específicos y las ciencias básicas, se han venido resolviendo diferentes problemas relacionados al tema abordado, los cuales han utilizado los conocimientos del cálculo, las ecuaciones diferenciales y los métodos numéricos, pues aproximadamente hace tres décadas con el advenimiento de la tecnología informática se comienza a difundir el uso de los softwares en las computadoras y de allí, que su contribución comenzó a mejorar significativamente en los trabajos de investigación

Finalmente se consideró una justificación social, pues se llevará a cabo el estudio en la ciudad de Chimbote, con la finalidad de tener un impacto ambiental positivo, los cuales brindan beneficios para la comunidad, pues existen razones más que suficientes, para plantearnos exigencias de estudio e investigación en el tema de tratamiento de los residuos orgánicos de origen doméstico e industrial que son las fuentes de mayor impacto en la contaminación ambiental de la ciudad, manteniendo una ciudad limpia y sostenibles, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos, los cuales contribuyen de manera directa con los objetivos de desarrollo sostenible 3, 11 y 13.

El manejo de los residuos orgánicos ha emergido como uno de los principales desafíos en los procesos biotecnológicos modernos, especialmente en la gestión y aprovechamiento de desperdicios tanto domésticos como industriales. Las técnicas más efectivas para tratar estos residuos incluyen procesos realizados en la ingeniería de las fermentaciones y la ingeniería ambiental cuyos principios generales se basan en el modelamiento, el diseño y escalamiento de sus propios equipos. En ese sentido, el biorreactor constituye el equipo más útil para procesar residuos y desechos orgánicos en estas tecnologías; razón por la cual fue imprescindible en este trabajo el diseño y operación de un biorreactor discontinuo (batch) de laboratorio que trabaje en condiciones aeróbicas y en pequeña escala.

El biorreactor discontinuo permite la realización de procesos de biodegradación bajo condiciones controladas, facilitando la evaluación de la eficiencia del tratamiento y la optimización de los parámetros operativos. En estos sistemas, el tiempo de residencia y las condiciones ambientales, como la temperatura y el pH, pueden ajustarse para maximizar la actividad microbiana y la conversión de materia orgánica. La capacidad para operar en condiciones aeróbicas asegura que los procesos de oxidación y mineralización de los residuos se realicen de manera efectiva, favoreciendo la reducción de la carga orgánica y la minimización de los subproductos nocivos. Adicionalmente, el diseño y operación del biorreactor en condiciones controladas permiten obtener datos precisos sobre la cinética de los procesos biológicos involucrados. Estos datos son esenciales para la extrapolación a escala mayor y para la implementación de estrategias de tratamiento en sistemas industriales. El análisis de estos resultados no solo proporciona información sobre la eficacia del proceso, sino que también contribuye al desarrollo de modelos predictivos que pueden ser utilizados para mejorar el rendimiento de biorreactores en aplicaciones a gran escala. En resumen, la implementación de un biorreactor discontinuo en la investigación ofrece una plataforma valiosa para avanzar en el tratamiento de residuos orgánicos y en la integración de tecnologías biotecnológicas en la gestión de desechos.

Aunque se cuenta con abundante información sobre los parámetros cinéticos típicos para aguas residuales domésticas, la disponibilidad de datos es limitada para residuos sólidos urbanos con elevados niveles de sólidos totales, nutrientes, demanda química

de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO<sub>5</sub>). Esto ha llevado a la implementación de sistemas de tratamiento basados en modelos desarrollados para aguas domésticas, a pesar de que los residuos a tratar pueden presentar características significativamente distintas. Para mejorar el diseño de los procesos de tratamiento para residuos con alta carga orgánica y nutrientes, es crucial realizar una caracterización detallada de estos residuos. En la mayoría de procesos biotecnológicos que tienen que ver con el funcionamiento de biorreactores a escala de laboratorio, ya sea en condiciones aeróbicas y anaeróbicas, se trabajan con aquellos biorreactores tipo “banco” cuyo modo de operación continuo o discontinuo tiene un volumen de carga ya registrados. Es decir que a partir de un diseño de un biorreactor establecido (sobre todo referido a las dimensiones y volumen del reactor) se procesa un volumen equivalente de material orgánico en una o más condiciones de operación dadas.

Por otra parte, en nuestro medio la ciudad de Chimbote, las exigencias de estudios en el tema de tratamiento de los residuos municipales de origen doméstico e industrial es muy grande ya que estos residuos constituyen las fuentes de mayor impacto en la contaminación ambiental de la ciudad, es por ello que en este trabajo se plantea la siguiente pregunta ¿Cómo influye la aplicación de un software en el diseño y operación de un biorreactor discontinuo para el tratamiento aeróbico de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote?

Respecto a la conceptualización y operacionalización de variables se tiene:

Variable independiente (X): Aplicación del software Matlab – Polymath

Respecto a la definición conceptual de la aplicación del software Matlab – Polymath, se define como la utilización de herramientas de software como Matlab y Polymath en el modelado, simulación y análisis de procesos relacionados con el diseño y operación de biorreactores para el tratamiento aeróbico de materia orgánica en residuos sólidos urbanos. Matlab y Polymath son plataformas que proporcionan herramientas avanzadas para resolver problemas matemáticos complejos y realizar simulaciones.

Respecto a la definición operacional, la aplicación del software Matlab y Polymath se mide por la implementación de estos programas en el desarrollo de modelos matemáticos, simulaciones de procesos y análisis de datos relacionados con el diseño y operación del biorreactor, el cual incluye la configuración de parámetros, la

ejecución de simulaciones y la evaluación de los resultados obtenidos para optimizar el proceso de tratamiento.

Dentro de las dimensiones que se utiliza para considera la especificación de la variable, se tendrá en cuenta el modelado matemático, el cual llevará a cabo la creación de modelos matemáticos que representen el proceso de tratamiento; simulación, donde se llevará a cabo la ejecución de simulaciones para prever el comportamiento del biorreactor; y el análisis de datos, donde se llevará a cabo la evaluación de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones.

Dentro de los indicadores se tendrá en cuenta la precisión del modelo, el cual mide el error entre los resultados del modelo y los datos experimentales; el tiempo de simulación, donde se tendrá en cuenta la duración necesaria para completar las simulaciones; y la capacidad de análisis, el cual brindará la facilidad para interpretar los resultados y ajustar parámetros.

Variable dependiente (Y): Diseño y operación de biorreactor por lotes

Definición conceptual - El diseño y operación de biorreactor por lotes, se define como la configuración y gestión del biorreactor en un proceso por lotes para el tratamiento de materia orgánica. El diseño incluye la selección de parámetros operativos, la estructura del biorreactor y los procedimientos para su operación. La operación abarca la ejecución de ciclos de tratamiento, la monitorización del proceso y la evaluación de la eficiencia del tratamiento.

Respecto a la definición operacional, se mide a través de parámetros específicos del biorreactor, como el tiempo de retención, la carga orgánica, la tasa de aireación y la eficiencia en la eliminación de contaminantes. También se incluyen los datos operativos recogidos durante la ejecución de ciclos de tratamiento, así como las métricas de rendimiento como la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) y otros indicadores de eficacia del tratamiento.

Dentro de las dimensiones que establece la especificación de la variable, se tendrá al diseño del biorreactor, donde se va a realizar la configuración física y operacional del biorreactor; los parámetros operativos, teniendo en cuenta las condiciones bajo las cuales opera el biorreactor; y la eficiencia del tratamiento, utilizando la efectividad en la reducción de contaminantes.

Como indicadores, se tendrá al tiempo de retención, el cual se llevará a cabo para establecer el tiempo durante el cual el material orgánico permanece en el biorreactor; la carga orgánica ( $\text{kg/m}^3$ ), el cual indicará la cantidad de materia orgánica introducida en el biorreactor; y la eficiencia de eliminación, el cual va a indicar la reducción en los niveles de contaminantes (por ejemplo, DQO, sólidos en suspensión).

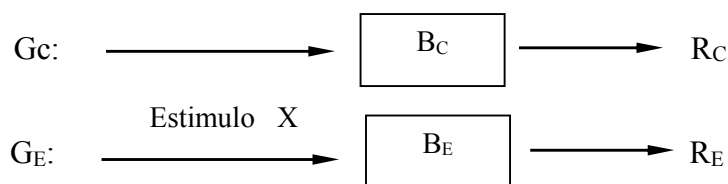
Respecto a la hipótesis se tiene que la aplicación de un software en el diseño y operación de un biorreactor discontinuo para el tratamiento aeróbico de la materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote permite optimizar la evaluación de parámetros, variables y conversión biológica durante su funcionamiento. Con lo cual se planteó como objetivo general, explicar la influencia de la aplicación de un software en el diseño y operación de un biorreactor discontinuo para el tratamiento aeróbico de la materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote, desprendiéndose los objetivos específicos, caracterizar los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote, Analizar los distintos parámetros y variables de diseño de un biorreactor discontinuo, Procesar la información del diseño, mediante la aplicación del software (Polymath-Matlab), Evaluar el diseño del biorreactor con el volumen de carga del material orgánico biodegradable en condiciones aeróbicas, Evaluar el funcionamiento del biorreactor a partir del monitoreo de un biorreactor tipo banco con escalamiento de laboratorio y Determinar el grado de influencia de la aplicación del software en la conversión biológica de materia orgánica biodegradables en condiciones aeróbicas.

## METODOLOGÍA

### Tipo y diseño de investigación:

Según la finalidad del estudio, se tuvo un tipo de investigación aplicada, pues se centro en la disminución de los efectos contaminantes de los residuos solidos municipales que se llevan a cabo en el distrito de Nuevo Chimbote. Asimismo, en cuanto a su alcance, fue explicativo, pues se llevó a cabo la profundidad y detalle con los cuales se describen y comprenden las relaciones entre variables, fenómenos o conceptos dentro de un estudio, específicamente en el diseño y operación de un biorreactor para tratamiento aeróbico de materia orgánica de residuos sólidos urbanos.

El trabajo fue exploratorio – experimental y contó con un diseño de dos grupos “después”, teniendo como grupo de control el biorreactor aerobio de laboratorio ( $B_C$ ) y como grupo experimental la aplicación del software al biorreactor experimental ( $B_E$ ).



Donde:

$G_C$ : Grupo control o testigo

$G_E$ : Grupo experimental.

$X$ : Estimulo (aplicación del software)

$B_E$ : Biorreactor aerobio experimental en  $G_E$ .

$R_C, R_E$ : Resultados de análisis “después”

### Población y Muestra

La población seleccionada para el estudio estuvo conformada por el total de los residuos sólidos municipales de dos toneladas (2 000 kg) aproximadamente, procedentes de un botadero abierto en Nuevo Chimbote (sur de Chimbote).

La muestra seleccionada para la investigación estuvo conformada 10 kg de residuos sólidos municipales procedentes de un botadero abierto en Nuevo Chimbote (sur de Chimbote).

El tipo de muestreo fue no probabilístico (por conveniencia), pues se tuvo en cuenta el tiempo semanal (2 semanas) para la recolección y los costos del investigador.

**Técnicas e instrumentos de investigación:**

La técnica de investigación se refiere a un conjunto organizado de procedimientos y métodos aplicados sistemáticamente para la recolección, análisis e interpretación de datos. Su propósito es responder preguntas de investigación o resolver problemas específicos de manera efectiva, teniendo como finalidad permitir a los investigadores obtener información relevante, validar hipótesis y construir conocimiento en un área de estudio determinada. En ese sentido para la investigación se utilizó como técnica al modelado matemático, simulación computacional, análisis de datos y optimización de parámetros.

Los instrumentos de investigación son herramientas, dispositivos o técnicas específicas utilizadas para recopilar, medir y analizar datos en un estudio científico, los cuales, con estos procedimientos permiten a los investigadores recopilar información precisa y relevante, facilitando la respuesta a preguntas de investigación y la prueba de hipótesis. y generar conclusiones basadas en datos empíricos. En ese sentido, se tendrá como instrumentos al software Matlab, software Polymath, registro de medición del biorreactor, registro de datos de los sensores de oxígeno, registro de los sensores de pH, registro de sensores de temperatura, software de herramientas estadísticas y de análisis.

**Tabla 9.** *Técnicas de recolección de datos*

Variables	Técnica	Instrumento	Fuente de información
Independiente (X): Aplicación del software Matlab – Polymath	Simulación	Software Matlab	Proceso computacional del software
	Análisis de datos	Software Polymath	
	Optimización	Registro de dispositivos	
Dependiente (Y): Diseño y operación de biorreactor por lotes	Revisión documental	Registro de parámetros	Proceso del biorreactor aeróbico
	Observación directa	Base de datos	
	Análisis de datos	Registro de biorreactor	
		Plataforma computacional	

El método de análisis de datos, se llevó a cabo mediante el análisis descriptivo y análisis inferencial, para ello se inició con la caracterización física de los residuos sólidos de Nuevo Chimbote. – sobre la base de 10 kg de residuos de recolección, seleccionando el peso húmedo y peso seco de los componentes para determinar la humedad, mostrados en la tabla 9. Asimismo, Se realizó la caracterización química de los residuos sólidos en Nuevo Chimbote. Tras recolectar las muestras de residuos sólidos municipales (RSM) y determinar su contenido de humedad, se seleccionaron los materiales orgánicos biodegradables, como restos de comida, papel, cartón y plásticos. A continuación, se presentan los cálculos necesarios para determinar los porcentajes en peso (base seca) de estos materiales. Las distribuciones porcentuales de los elementos húmedos contenidos en los residuos proporcionan la composición molar. Estos datos, excluyendo las cenizas, se presentan en la Tabla 11. A partir de la relación molar, se puede determinar la fórmula química aproximada de la fracción orgánica de la muestra en los residuos sólidos municipales (RSM):  $C_{573}H_{2380}O_{1083}N_{12}S_1$

La conversión global de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (RSM) se evalúa en función de los principales elementos biológicamente degradables, tales como carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N), considerando su contenido en base seca. A partir de la composición en peso húmedo de la fracción orgánica de la muestra, detallada en la Tabla 3, se procede a calcular la conversión fraccional biodegradable de los componentes, como se muestra en la Tabla 13. Esta conversión fraccional representa la proporción de material orgánico que puede ser efectivamente degradada mediante procesos biológicos. La precisión de este cálculo es crucial para ajustar los parámetros del proceso de tratamiento y optimizar la eliminación de residuos orgánicos, permitiendo una evaluación detallada de la eficacia del proceso de biodegradación en función de la composición específica de los residuos tratados. Además, la conversión fraccional biodegradable proporciona una base para diseñar y ajustar estrategias de tratamiento y manejo de residuos, garantizando que se maximice la eficiencia en la reducción de la carga orgánica y la mejora en la calidad del producto final.

## RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote, para ello se inició con la caracterización biológica de la materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos.

### **(a) Tratamiento de las muestras:**

- Período de prueba: mes de octubre 2019
- Contenido del biorreactor experimental: 2100 mL
- Porcentaje de dilución: 15% (80 % M.O y 20 % rumen)
- Cantidad extraída del biorreactor: 300 mL.

### **(b) Protocolo para la determinación de la DBO de las muestras:**

- *Método de Análisis:* Método Winkler y titulación con tiosulfato de sodio, normalidad (N/40).
- *Ocho botellas Winkler:* Uno para el biorreactor control y siete para el biorreactor experimental con las muestras.
- *Tratamiento de las Muestra en el Biorreactor Experimental:* Extracción de 300 mL de muestra diluída (80 % de material orgánico + 20 % de inóculo) cada 05 días a 30 días + reactivos de titulación.
- *Protocolo de Dilución para las Muestras:* Se utilizó el protocolo de dilución para la DBO en el intervalo de (300 – 1050) mg O<sub>2</sub>, por pipeteo directo para diluciones de 3 mL en cada botella.
- *Agua de Dilución en Biorreactor Control:* 300 mL de agua destilada de dilución (de un total 2100 mL de volumen), con protocolo para el oxígeno disuelto según la fórmula:

$$OD_{(mg/L)} = \frac{v \cdot N_{(1/40)} \cdot 8000}{V \cdot \frac{V_{fcoBOD} - 2}{V_{fcoBOD}}}$$

- Donde:  $v$  : Volumen del tiosulfato gastado (mL)  
 $N$  : Normalidad del tiosulfato de sodio (1/40)  
 $V$  : Volumen de muestra titulada (mL)  
 $V_{fcoBOD}$  : Volumen de frasco BOD = 300 mL

- *Tiempo de Residencia para las Muestras en los Biorreactores:* Intervalo de 0,00 días a 30,00 días. 07 ensayos para la DBO en intervalos de 05 días de tiempo.
- *Titulación de las Muestra en Biorreactores:* Se utilizó el protocolo para la determinación del oxígeno disuelto, según la ecuación:

$$OD_i(\text{mgO}_2/\text{L}) = \frac{v_i \cdot N_i}{V_i} * 8\ 000$$

$$OD_f(\text{mgO}_2/\text{L}) = \frac{v_f \cdot N_f}{V_f} * 8\ 000$$

Donde :  $v_i, v_f$  : Volumen de tiosulfato gastado en la titulación (mL), inicio y final del período de incubación (mL)

$V_i, V_f$  : Volumen de muestra titulada (mL), inicio y final del período de incubación (mL)

$N_i, N_f$  : Normalidad del tiosulfato de sodio (1/40) (eq-g/L), inicio y final del período de incubación (eq-g/L)

- *Cálculos para la DBO de las muestras:* Se utilizó el protocolo ara todos los propósitos prácticos de cálculo de la DBO por el método de dilución, según la fórmula:

$$DBO(\text{mg/L}) = \left[ (OD_c - OD_s^f) \frac{V_c}{V_s} \right] - (OD_c - OD_s^i)$$

$OD_c$  : Oxígeno disuelto del agua de dilución del biorreactor control (8 mg O<sub>2</sub>/L)

$OD_s^f$  : Oxígeno disuelto en la dilución de muestra al final del período de incubación

$OD_s^i$  : Oxígeno disuelto presente en la muestra al inicio del período de incubación

$V_c$  : Volumen de agua de dilución control (300 mL)

$V_s$  : Volumen tomado de la muestra para dilución (3 mL)

**Tabla 10.** Composición física de los RSM de Nuevo Chimbote

Residuos sólidos municipales de Chimbote			
Componente	Peso (kg)		Humedad (%)
	Peso húmedo	Peso seco	

Residuos de comida	5,6	1,680	70
Papel y cartón	1,9	1,786	6
Plásticos	0,8	0,784	2
Vidrio	0,7	0,686	2
Textiles	-	-	-
Goma y cuero	-	-	-
Residuos de jardín y madera	-	-	-
Metales y otros	1,0	0,970	3
<b>Total</b>	<b>10,0</b>	<b>5,906</b>	<b>83</b>

**Tabla 11.** *Composición química de los RSM de Nuevo Chimbote*

Componente	Peso Húmedo (kg.)	Peso Seco (kg.)	Composición (kg.)					Ceniza
			C	H	O	N	S	
Residuos de Comida	5,600	1,680	0,806	0,1075	0,6317	0,0437	0.0067	0,0840
Papel y Cartón	1,900	1,786	0,786	0,1072	0,7860	0,0054	0.0036	0,1072
Plásticos	0,800	0,784	0,470	0,0564	0,1788	-	-	0,0784
<b>Total</b>	<b>8,30</b>	<b>4,250</b>	<b>2,062</b>	<b>0,2711</b>	<b>1,5965</b>	<b>0,0491</b>	<b>0.0103</b>	<b>0,2696</b>

**Tabla 12.** *Composición molar de los residuos orgánicos*

Componente	Peso húmedo (kg)	Mol (g/mol)	Nº moles	Relación molar (S = 1)
C	2.062	12.01	0.1718	573.00
H	0.7211	1.01	0.7140	2380.00
O	5.1965	16.00	0.3248	1083.00
N	0.0491	14.01	0.0035	12.00
S	0.0103	32.07	0.0003	1.00

**Tabla 13.** *Relación molar de componentes biodegradables*

Componente	Peso Seco	Peso atómico	Moles	Relación mol ( $N=1$ )
C	2,062	12.01	0,1717	49.1
H	0,2711	1.01	0,2684	76.7
O	1,5965	16.00	0,0998	28.5
N	0,0491	14.01	0,0035	1

Fórmula biodegradable es:  $C_{49.1}H_{76.7}O_{28.5}N_1$

**Tabla 14.** *Conversión fraccional biodegradable de la muestra*

Componente	Peso húmedo (kg.)	(SV/ ST) (%)	% SV	BF	Conversión fraccional (X)
Residuos de comida.	5,6	11	0.4	0.820	0.09
Papel cartón	1,9	95	17.4	0.343	0.33
Plásticos	0,8	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>8,3</b>				<b>0,42</b>

**Tabla 15.** *Demanda bioquímica de oxígeno de la muestra de residuos sólidos en Be*

Tiempo de residencia (días)	Volumen Muestra Vs (mL)	Biorreactor experimental (Be)	
		OD <sub>e</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>e</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)
0	300	3,300	464,15
5	300	3,500	444,00
10	300	3,711	422,89
15	300	3,920	402,05
20	300	4,125	381,55
25	300	4,330	361,00
30	300	4,528	341,15

Asimismo, se llevó a cabo la caracterización cinética de la materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos de Nuevo Chimbote, para ello se llevó a cabo la

codificación, la cual se corre el programa Matlab buscando el orden de reacción con la DBO (mg/L) vs Tiempo (d) para cada muestra.

**(c) Pruebas cinéticas para el orden de reacción:**

- *Prueba para la cinética de ORDEN CERO*

```
clc, clear all
disp('Tesis Doctorado 2023')
disp('Cinética: Orden cero')
disp('M.Sc. Saúl Eusebio Lara')
disp('')
format compact
% Datos Experimentales
So=464.15
t= [5 10 15 20 25 30]; % tiempo (d)
DBO= [444.00 422.89 402.05 381.55 361.00 341.15]; % Carga orgánica (DBO
mg/L)
% gráfico de los puntos experimentales para probar una cinética de orden=0
plot(t,DBO,'o-')
title('Datos experimentales (orden cero, gráfica según ec.(13))')
xlabel('tiempo(d)')
ylabel('DBO(mg/L)')
grid
R: So = 464.1500
```

- *Prueba para la cinética de PRIMER ORDEN ajustada al valor de k.*

```
clc, clear all
disp('Tesis Doctorado 2023')
disp('Cinética: Primer orden ajustado')
disp('M.Sc. Saúl Eusebio Lara')
So=464.15
t=[5 10 15 20 25 30]; % tiempo (d)
```

DBO=[444.00 422.89 402.05 381.55 361.00 341.15]; % Carga orgánica (DBO mg/L)

% Prueba para cinética de primer orden (ecuación 14)

X=t;

Y=log(So./DBO);

plot(X,Y,'o-k')

title('Datos experimentales (primer orden, grafica según ecuación 14)')

xlabel('tiempo(d)')

ylabel('-ln(Se/So)(mg/L)')

grid

pause

% Obtención de la recta que se ajusta mejor a los datos experimentales

A=polyfit(X,Y,1);

k=A(1)% pendiente k

% Gráfica de la recta que se ajusta a los datos experimentales

recta=X.\*k;

plot(X,recta,'--k')

title('Recta ajustada a los datos experimentales con el valor de k')

**R: So = 464.1500**

**k = 0.0105**

***(d) Volumen y Dimensiones del Biorreactor.***

- Base: 1 día de operación, con el material orgánico biodegradable

Carga orgánica = 8,3 /L.d

Dilución de sólidos v. biodeg. = 15 % conc.

Eficacia de conversión = 95 %

Grado de conversión = 42 %

Tiempo de residencia = 48,5 d

- Carga orgánica real de tratamiento de concentración:  $C_{S_0} = 0,0212 \text{ mol } S_0/L$

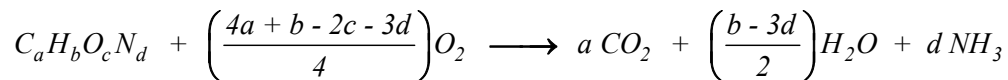
- Total de gas generado por peso unitario de s. v. biodg., en base húmeda = 0,5387 L gas/g s.v.biodeg.

- Peso de s.v.biodeg., producido por cada 0,0212 mol  $S_o$  tratado = 11 g s.v.biodeg.
- En base húmeda, cada gramo de s.v.biodeg., genera 0,5387 L de gas. El volumen de gas para 11 g s.v.biodeg = 5,93 L
- El volumen del biorreactor está referido al volumen de gas ( $CO_2 + NH_3$ ) que se produce por cada g s.v.biodeg., que se convierte del residuo:  $V_{BR} = 5.93$  L.
- Espacio adicional de volumen necesario para la carga bacteriana = 18 %
- *Volumen de biorreactor:  $V = 1,18 \times 5,93 = 7$  L*
- Las secuencias de cálculos en el procedimiento de dimensionar las proporciones geométricas de las partes del biorreactor están dadas en el anexo 8.

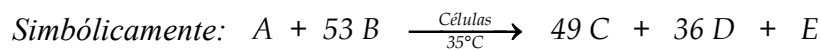
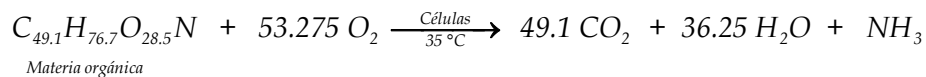
**(e) Resultados de parámetros y variables de diseño del biorreactor experimental:**

Para ello se llevó a cabo una evaluación de parámetros y variables de la m.o.b. de los residuos de N.Ch. (conversión, concentración, microorganismos, etc) con Polymath

- (1) Reacción general de oxidación de la materia orgánica de los residuos sólidos para la DBO:

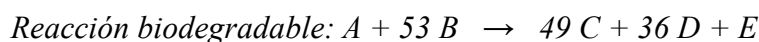


- (2) Reacción específica de oxidación de la materia orgánica en el tratamiento de las muestras:



- (3) Cinética y orden de velocidad:  $-r_A = k C_A C_B$  ; *primer orden*,  $k = 0,0105 d^{-1}$
- (4) Volumen de carga inicial de reactivos al biorreactor: *2 100 mL de reactivos A y B*
- (5) Concentraciones iniciales de los reactivos: *Sustrato biodegradable:  $C_{S_o} = 24.1$  g/L*  
*Células nutrientes:  $C_{C_o} = 0,46$  g/L*

- (6) Conversión del sustrato biodegradable:



$$\text{Ecuación de la conversión en el biorreactor: } \frac{dX_A}{dt} = \frac{(-r_A)}{C_{A_o}}$$

$$-r_A = k \cdot C_{A_o}^2 (1 - X)(\theta_B - 53X) ; \theta_B = \frac{1,125}{0,0212} = 53,1$$

(7) Temperatura de la mezcla de reactivos: 35 °C

(8) Datos adicionales:  $m = 0,05 \text{ h}^{-1}$

$$\begin{array}{ll} C_p^* = 100 \text{ g/L} & Y_{c/s} = 1,49 \text{ g/g} \\ n = 0,50 & Y_{p/s} = 1,84 \text{ g/g} \\ \mu_{max} = 0,12 \text{ h}^{-1} & Y_{p/c} = 1,23 \text{ g/g} \\ K_s = 0,1 \text{ g DBO/L} & k_d = 0,003 \text{ h}^{-1} \\ D = 0.15 & k = 0,0105 \text{ h}^{-1} \end{array}$$

(9) Pasos de algoritmo de las ecuaciones en el programa Polymath:

*Balance de masa:*  $d(C_C)/d(t) = -D * C_C + (r_g - r_d)$

$$d(C_S)/d(t) = D * (C_{S0} - C_S) - Y_{sc} * r_g - m * C_C$$

$$d(C_p)/d(t) = -D * C_p + Y_{pc} * r_g$$

$$d(X)/d(t) = -r_A / C_{A0}$$

*Leyes de velocidad:*  $r_g = ((1 - (C_p / C_{pstar}))^{0.5}) * \mu_{max} * (C_S / (K_S + C_S)) * C_C$

$$r_d = k_d * C_C$$

$$r_{sm} = m * C_C$$

$$r_A = -k * C_A * C_B$$

*Estequiometría:*  $r_p = Y_{pc} * r_g$

$$C_A = C_{A0} * (1 - X)$$

$$C_B = C_{A0} * (\text{teta}B - 53 * X)$$

(10) Parámetros de evaluación:  $m = 0,05$

$$\begin{array}{ll} C_{pstar} = 100 & Y_{CS} = 1,49 \\ n = 0,50 & Y_{PS} = 1,84 \\ \mu_{max} = 0,12 & Y_{PC} = 1,23 \\ K_s = 0,1 & k_d = 0,003 \\ D = 0.15 & k = 0,0105 \end{array}$$

(11) Valores iniciales y finales:  $t(0) = 0 \text{ h}$        $t(f) = 50 \text{ h}$

$$C_C(0) = 0.46 \quad C_S(0) = 24.1 \quad C_p(0) = 0$$

$$X(0) = 0$$

(12) Introduciendo las ecuaciones y parámetros del biorreactor, al formato Polymath se tiene:

**Tabla 16.** Registro de ecuaciones del programa polymath

The screenshot shows the POLYMATH 6.10 Professional Release software interface. The window title is "POLYMATH 6.10 Professional Release - [Ordinary Differential Equations Solver]". The menu bar includes File, Program, Edit, Format, Problem, Examples, Window, and Help. The toolbar contains various icons for file operations and solving. The main window displays the following text:

```

d(Cc) / d(t) = -D*Cc + (rg - rd)
Cc(0) = 0.46
d(Cs) / d(t) = D*(Cso - Cs) - Ysc*rg - m*Cc
Cs(0) = 24.1
d(Cp) / d(t) = -D*Cp + Ypc*rg
Cp(0) = 0
d(X) / d(t) = -rA/CAo
X(0) = 0
rA = -k*CA*CB
CA = CAo*(1-X)
CB = CAo*(tetaB-53*X)
CAo = 0.0212
k = 0.0105
tetaB = 53.1
rg = ((1 - (Cp/Cpstar))^0.50)*mumax*(Cs/(Ks + Cs))*Cc
rp = Ypc * rg
rsm = m * Cc
D = 0.15
Cso = 24.1
Ysc = 0.67
m = 0.05
Ypc = 1.23
Cpstar = 100
mumax = 0.12
Ks = 0.1
rd = kd*Cc
kd = 0.003
t(0) = 0
t(f) = 50
  
```

At the bottom of the window, the status bar shows "Ln 30", "04. Prob4DB0. (programa completo).pol", "No Title", "16:23", "7/08/2024", "CAPS", and "NUM".

A continuación, se muestra el procesamiento de la información del diseño, mediante la aplicación del software Polymath.

**Tabla 17.** Matriz de solución de ecuaciones y variables

POLYMATH Report	TABLA DE CRECIMIENTO CELULAR EN EL BIORREACTOR EXPERIMENTAL
Ordinary Differential Equations	07-Ago-2024

Calculated values of DEQ variables

	Variable	Initial value	Minimal value	Maximal value	Final value
1	CA	0.0212	0.0133222	0.0212	0.0133222
2	CAo	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212
3	CB	1.12572	0.7081952	1.12572	0.7081952
4	Cc	0.46	0.0856408	0.46	0.0856408
5	Cp	0	0	0.2922739	0.1077317
6	Cpstar	100.	100.	100.	100.
7	Cs	24.1	23.84125	24.1	24.00464
8	Cso	24.1	24.1	24.1	24.1
9	D	0.15	0.15	0.15	0.15
10	k	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
11	kd	0.003	0.003	0.003	0.003
12	Ks	0.1	0.1	0.1	0.1
13	m	0.05	0.05	0.05	0.05
14	mumax	0.12	0.12	0.12	0.12
15	rA	-0.0002506	-0.0002506	-9.906E-05	-9.906E-05
16	rd	0.00138	0.0002569	0.00138	0.0002569
17	rg	0.0549719	0.0102287	0.0549719	0.0102287
18	rp	0.0676154	0.0125814	0.0676154	0.0125814
19	rsm	0.023	0.004282	0.023	0.004282
20	t	0	0	50.	50.
21	tetaB	53.1	53.1	53.1	53.1
22	X	0	0	0.3715956	0.3715956
23	Ypc	1.23	1.23	1.23	1.23
24	Ysc	0.67	0.67	0.67	0.67

### (e) Consolidación de los Resultados

Para evaluar el funcionamiento del biorreactor con el volumen de carga del material orgánico biodegradable en condiciones aeróbicas, se tuvo en cuenta el diseño y construcción del biorreactor aerobio para la operación de tratamiento de la m.o.b:

▪ *Datos cinéticos y estequiométricos del diseño:*

- Residuos recolectados: 10 kg
- Material orgánico: 8,3 kg (incluye humedad)
- Residuos orgánicos degradables (base seca): 4.0375 kg
- Reacción de conversión completa en condiciones aeróbicas:  
$$C_{49.1}H_{76.7}O_{28.5}N + 53,275 O_2 \longrightarrow 49.1 CO_2 + 36,25 H_2O + NH_3$$
- Temperatura de reacción del diseño: 35 °C
- Volumen de gases producidos a 35 °C: 4,382 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> y 0.089 m<sup>3</sup> de NH<sub>3</sub>
- Composición en volumen de los gases: 98 % de CO<sub>2</sub> y 2 % de NH<sub>3</sub>
- Total, de gas generado por peso unitario de residuo sólido:
  - = 1,1074 m<sup>3</sup>/kg.r.s.biodeg (basado en el peso seco de material orgánico)
  - = 0,4471 m<sup>3</sup>/kg.r.s.biodeg (basado en 10 kg de residuos sólidos)
- Constantes molares de gas generado por peso unitario de residuo sólido biodegradable (base seca):
  - Densidad del gas = 1,4543 kg/m<sup>3</sup>
  - Peso molecular del gas = 43.46 g/mol
  - Masa del gas = 1,6105 g gas/g s.v.biodeg.
  - Mol de gas = 0,0371 mol gas/g s.v.biodeg.
  - Mol de gas estequiométrico de la reacción = 48,138 mol
- Carga molar del sustrato (S<sub>0</sub>), para una conversión del 42 %, rendimiento del 95 % y una producción de 0,0371 mol gas/g s.v.biodeg.:  
Conversión eficaz = 0,42 x 0,95 = 0,399

$$S_0 = 0,0371 \frac{\text{mol gas}}{\text{g s.v.biodeg.}} \cdot \frac{\text{mol } S_0}{48,138 \text{ mol gas}} \cdot \frac{1}{0,399} = 1,9316 \times 10^{-3} \frac{\text{mol } S_0}{\text{g s.v.biodeg.}}$$

- Tiempo medio de residencia del sustrato (S<sub>0</sub>):

Ley de velocidad de biodegradación: Reacción de primer orden

$$-r_s = k \cdot C_s \quad ; k = 0,0105 \text{ d}^{-1} \text{ (corrido en programa Matlab)}$$

$C_s$  : Concentración del sustrato (mol/L)

Para un biorreactor por lotes:

$$t = C_{s0} \int_0^X \frac{dX}{-r_s} \quad ; \quad -r_s = k \cdot C_s = k \cdot C_{s0} (1 - X)$$

$$t = -\frac{1}{k} \ln(1 - X) \quad ; \quad \text{para } k = 0,0105 \text{ d}^{-1}$$

$$X = 0,95 \times 0,42 = 0,399$$

$$t = 48 \text{ d } 12 \text{ h}$$

- Del mismo modo, el funcionamiento del biorreactor experimental (Be) se llevó a cabo con el monitoreo de un biorreactor tipo banco (Bc) con escalamiento de laboratorio.

**Tabla 18.** Demanda de oxígeno de la muestra de residuos sólidos en Bc y Be

Tiempo de residencia (días)	Volumen Muestra Vs (mL)	Biorreactor control (Bc)		Biorreactor experimental (Be)	
		OD <sub>c</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>c</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	OD <sub>e</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>e</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)
0	300	2,000	485,60	3,300	464,15
5	300	3,220	472,00	3,500	444,00
10	300	3,340	460,00	3,711	422,89
15	300	3,430	451,00	3,920	402,05
20	300	3,530	441,00	4,125	381,55
25	300	3,630	431,00	4,330	361,00
30	300	3,730	421,00	4,528	341,15

Oxígeno disuelto en volumen control (300 mL) OD<sub>c</sub> = 8 mg O<sub>2</sub>/L

- En cuanto a la Caracterización Cinética para la DBO<sub>5</sub>, se realizó pruebas del orden de reacción de la materia orgánica de los residuos sólidos.

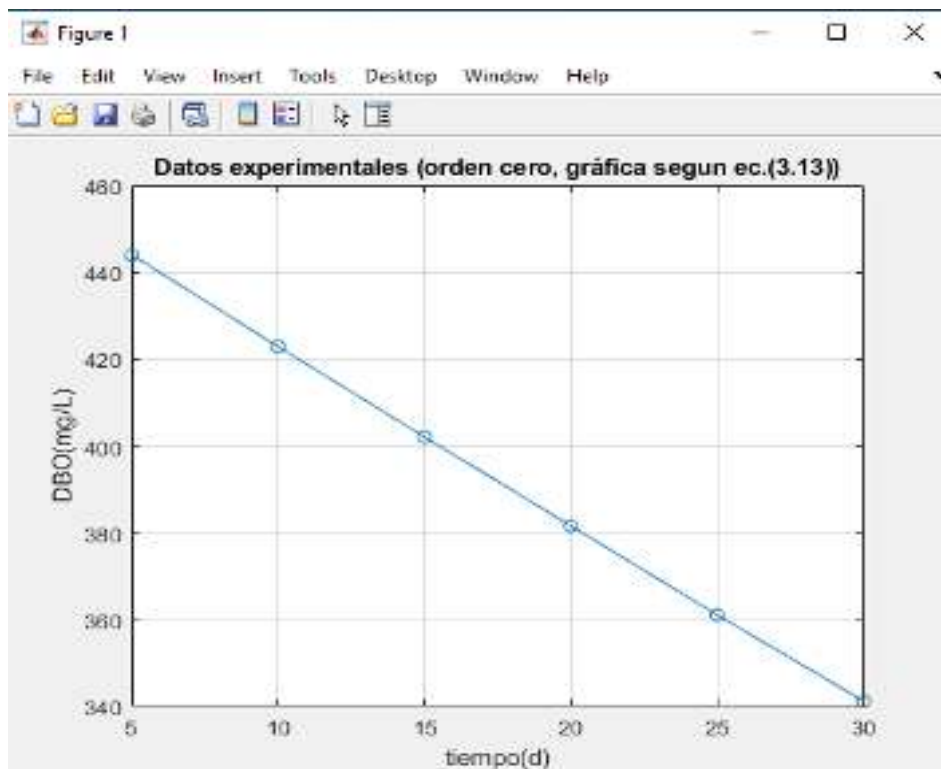


Figura 4. Prueba de orden cero para la DBO

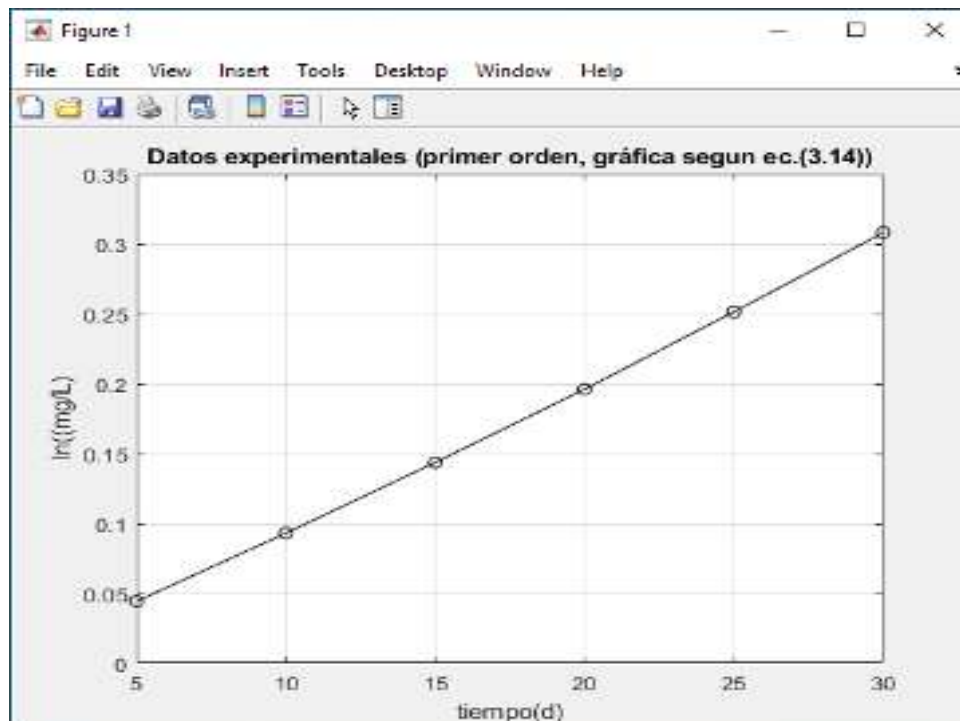
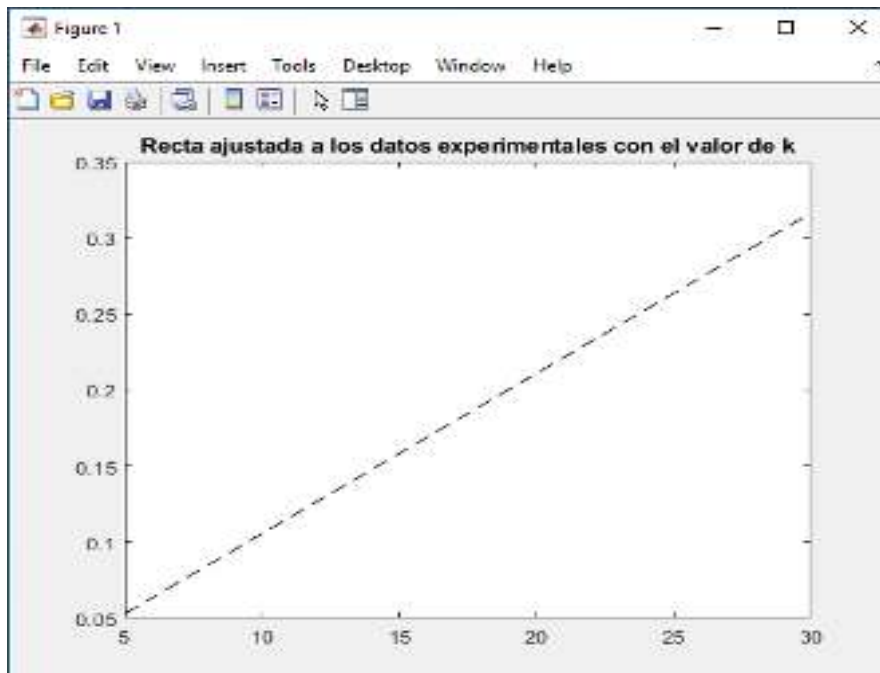


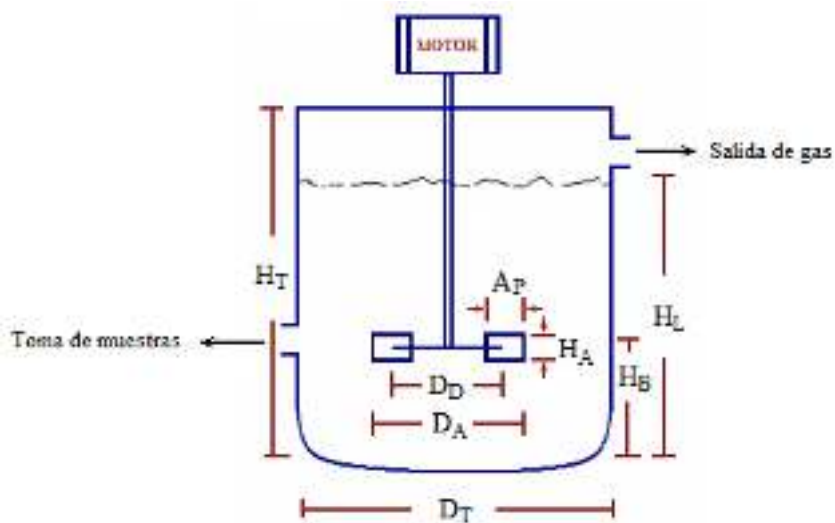
Figura 5. Prueba de primer orden para la DBO



**Figura 6.** Prueba de primer orden reajustado al valor de  $k$ , para la DBO

▪ *Volumen de Diseño y Dimensiones del Biorreactor Experimental:*

Volumen de diseño = 5,93 L	$D_T = 18$ cm	$A_P = 1,8$ cm
Volumen de carga = 7 L	$H_T = 27$ cm	$H_A = 1,5$ cm
	$D_A = 6$ cm	$H_B = 7,2$ cm
	$D_D = 4$ cm	$H_L = 23,3$ cm



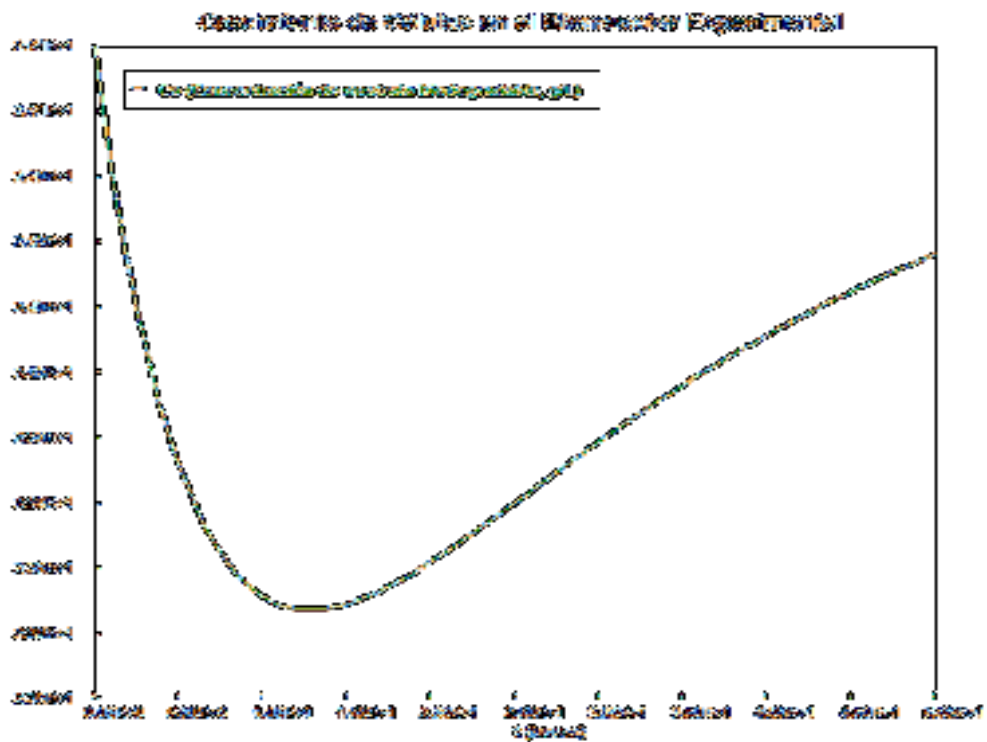
**Figura 7.** Biorreactor experimental por lotes

- *Volumen de Biorreactor control = 2,5 L*



**Figura 8.** *Biorreactor control de laboratorio de Q.G.I – UNS*

- *Cinética de Crecimiento Celular en el Biorreactor:*



**Figura 9.** *Cambio de concentración del sustrato del material biodegradable*

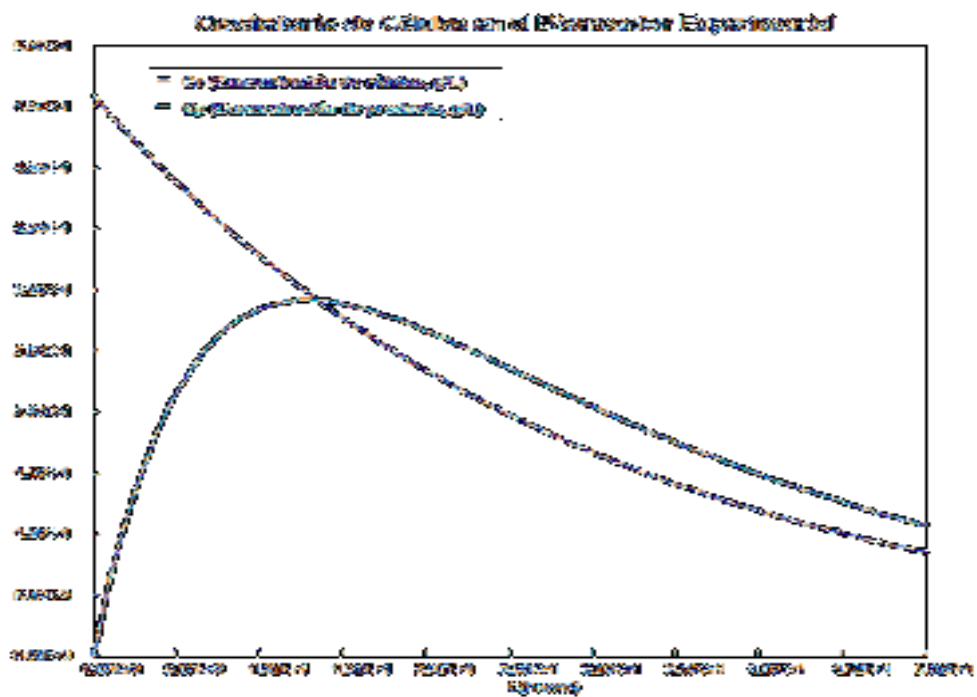


Figura 10. Cambio en la concentración de células y formación de producto

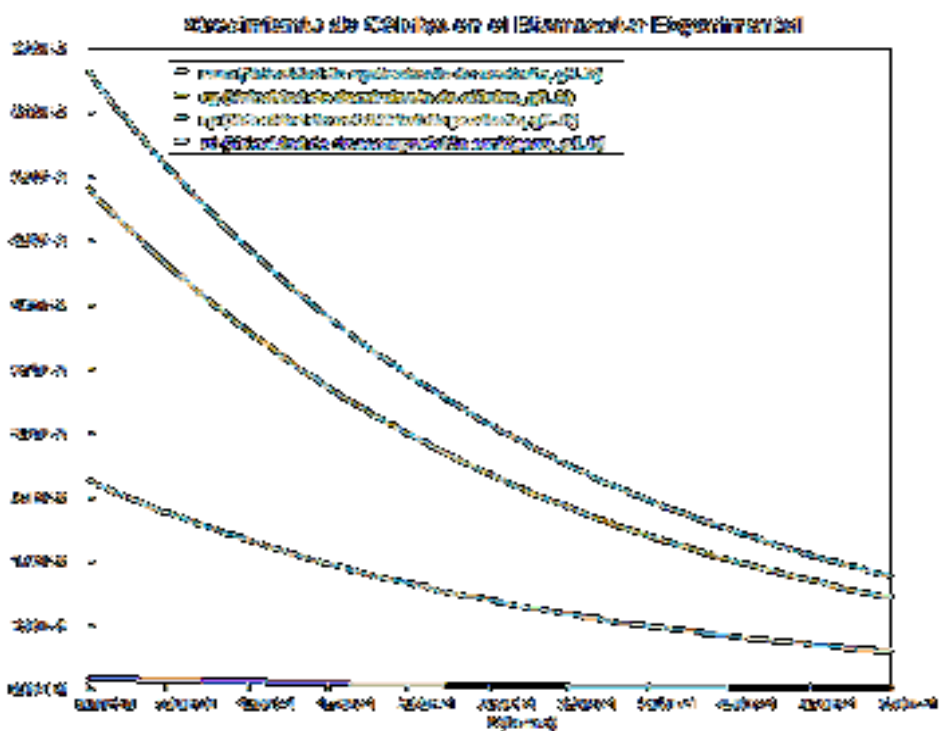


Figura 11. Velocidades de agotamiento del sustrato, decaimiento celular, estabilidad del producto y descomposición endógena

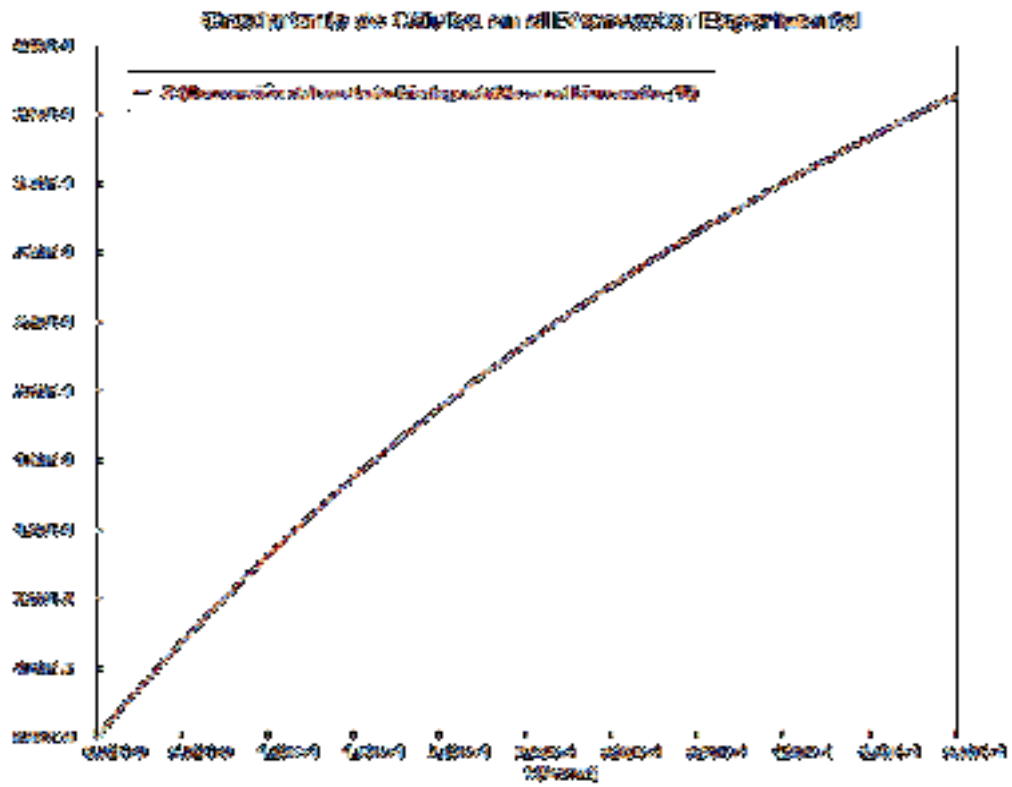


Figura 12. Conversión de materia orgánica biodegradable en el biorreactor

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En los resultados llevados a cabo en el estudio, utilizados para la determinación de la DBO de las muestras de dilución de los residuos biodegradables, se muestra un valor de 464,15 mg O<sub>2</sub>/L en el tiempo de 0,00 d para la DBO en el biorreactor experimental, la variación de la medida registra una tendencia de disminución con el tiempo hasta un valor de 341,15 mg O<sub>2</sub>/L en 30 d; también, en los mismos intervalos de tiempo, crece la concentración del oxígeno disuelto desde 3,300 mg O<sub>2</sub>/L en 0,00 d hasta 4,528 mg O<sub>2</sub>/L en 30 d en el biorreactor experimental. Igualmente, la tabla 18 muestra la misma tendencia, de disminución de la DBOc (mg O<sub>2</sub>/L) y aumento del ODc (mg O<sub>2</sub>/L) para el biorreactor control en los mismos intervalos de tiempo; también, se registra al inicio una concentración de 8 mg O<sub>2</sub>/L, de oxígeno disuelto en 300 mL de agua de dilución como volumen control en el biorreactor control.

En el tratamiento experimental, se muestran las pruebas seguidas para la cinética y orden de la reacción de oxidación de la materia orgánica de los residuos sólidos diluidos en el programa correspondiente. En la figura 4, la prueba cinética para un orden de reacción cero se muestra una recta con una tendencia de variación de la DBO de pendiente negativa para la constante cinética  $k$ , el protocolo según la ecuación (13) y gráfica, indica que debe ser una recta con tendencia de pendiente positiva. En la figura 5, la prueba para una reacción de primer orden se muestra una recta con tendencia para la DBO con pendiente positiva; así mismo, en la figura 6 la prueba cinética para una reacción de primer orden con los datos experimentales de DBO se muestra la aproximación de una recta con la constante de velocidad  $k$ , el programa Matlab permite hacer los ajustes para este orden de reacción a una recta como se muestra en la misma figura con el valor de  $k = 0,0105 \text{ d}^{-1}$  y es concordante con el protocolo según la reacción (14) y gráfica para las reacción de primer orden con las características del material orgánico de los residuos biológicos en general para este orden de reacción.

La figura 7, muestra el volumen y dimensiones del biorreactor experimental, un volumen de diseño igual 5,93 L, calculado sobre la base de los datos cinéticos y estequiométricos de los residuos orgánicos degradables de las muestras en tratamiento.

El volumen real de carga del biorreactor experimental es igual a 7 L, considerando un espacio de volumen de 18 % adicional al volumen de diseño para la carga microbiana de crecimiento celular; y las dimensiones referidas se ajustan al protocolo recomendado por Wei et al., 2024 para un sistema estándar de agitación en biorreactores con proporciones geométricas y nomenclatura establecidas. La figura 8 muestra el biorreactor control de laboratorio de química ambiental de la UNS, de volumen 2, 5 L utilizado como blanco o testigo en el proceso de biodegradación del material orgánico.

Sobre la cinética de crecimiento de células, la figura 9, muestra el cambio de concentración del sustrato del material orgánico biodegradable durante un período de prueba de 50 horas (2,08 d), se observa en la figura un decaimiento de la concentración del sustrato desde 24,1 g/L hasta 23,85 g/L en 10 h, por efecto del consumo de nutrientes para el crecimiento de células microbianas del rumen; luego se evidencia la producción de más células inertes de sustrato y producto, con tendencia al registro de mayor estabilidad del material orgánico degradado en el período considerado. La figura 10, muestra el cambio de concentración de células y formación de productos, la concentración de las células varía desde su máxima producción hasta su completa inhibición en el período de 50 h; así mismo, la concentración de los productos aumenta hasta un máximo de 0,29 g/L en 12,5 h y decae progresivamente con tendencia de ser constante en su producción hasta alcanzar la estabilidad conjuntamente con el material orgánico degradado en el período de 50 h.

En la figura 11, se muestra las velocidades de agotamiento del sustrato, decaimiento celular, estabilidad del producto y la descomposición endógena. Las curvas de la figura indican que: La tasa de agotamiento del sustrato va desde 0,023 g/L.h hasta un mínimo, también, la tasa de decaimiento de células que va desde 0,0541 g/L.h y alcanza un mínimo, la tasa del producto de 0,0676 g/L.h alcanza un mínimo y la velocidad de descomposición endógena de 0,00138 g/L.h se reduce a 0,00, la cual indica que no afecta el mantenimiento de células o nutrientes por muerte o depredación que causen la disminución de concentración de masa celular, todas en 50 horas cuya tendencia es la estabilidad de masa celular, sustrato y producto hasta el final del proceso de biodegradación. Finalmente, en la figura 12 se muestra el grado de conversión del

sustrato biodegradable, en el período de prueba de 50 h, se alcanza una conversión del 37,16 %, cuya óptima conversión del 42 % se alcanza en período de 61 h.

## CONCLUSIONES

La característica principal de este trabajo consistió en la selección y análisis de muestras de residuos sólidos de origen doméstico, diluidos al 15 %, para el oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de cero a 30 días, mediante el método de análisis de titulación en el laboratorio de química ambiental de la Universidad Nacional del Santa.

La aplicación del programa Matlab en la metodología propuesta se realizó para la caracterización cinética de las muestras de los residuos orgánicos biodegradables diluidos (DBO vs tiempo). Es decir, se realizaron pruebas para determinar el orden de reacción de la muestra, orden cero y primer orden respectivamente; resultando una reacción de primer orden con constante cinética  $k = 0,0105 \text{ d}^{-1}$ , para las muestras como la mejor opción elegida.

Se diseñó y construyó un biorreactor experimental por lotes de 7 litros de volumen, para procesar el material orgánico biodegradable con un cultivo microbiano en suspensión. El diseño del biorreactor consistió en aplicar la información cinética y estequiométrica del material orgánico a procesar, con las dimensiones y proporciones geométricas estándar del volumen del biorreactor.

La aplicación del programa Polymath se realizó para evaluar el crecimiento celular en el biorreactor experimental: Cambio de concentración del sustrato de 24,1 g/L a 23,85 g/L en 10 h y luego crecimiento de masa estable hasta 24,00 g/L en 50 h, cambio de concentración de células de 0,46 g/L a 0,086 g/L en 50 h y cambio de concentración de los productos de 0,00 g/L a 0,29 g/L máximo y luego disminución de masa estable hasta 0,1077 g/L en 50 h. Para la variación de velocidades del sustrato, de las células y de los productos arrojaron tasas de agotamiento y fueron respectivamente: de 0,023 g/L.h a 0,0043 g/L.h para el sustrato, de 0,055 g/L.h a 0,010 g/L.h para las células y de 0,067 g/L.h a 0,013 g/L.h para los productos en 50 h y con tendencia de formación de masas estables al final del proceso en 30 días.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar serie de ensayos repetidos para muestras de residuos sólidos del mismo origen y otros, utilizando el protocolo de análisis DBO versus tiempo, de este modo al correr el programa Matlab se tendría un mejor ajuste para determinar el orden de reacción del material orgánico.

Al aplicar el programa Polymath para el tratamiento de las muestras en el biorreactor elegido, se recomienda seleccionar la mejor ecuación cinética representativa del material orgánico para incorporarlo al sistema de reacción en el biorreactor y se pueda correr con éxito el programa. Las constantes cinéticas, las leyes y parámetros de crecimiento celular bien definidos cuantitativamente de acuerdo a los protocolos de formulación arrojan mejores resultados.

Implementar y mantener un servicio de cómputo activo, extendido para el uso de estudiantes y docentes de las universidades y comunidad científica, motivando al manejo de programas que requieran el uso de computadoras para el modelamiento y simulación

## AGRADECIMIENTOS

La presente tesis no hubiera sido posible sin el apoyo y el consejo oportuno de las siguientes personas:

A la Doctora Carolina Montes Lizárraga, por su incondicional asesoramiento y orientación profesional en la culminación y defensa de esta tesis.

Al Doctor Francisco León Cavero, quien, con su apoyo incondicional en la culminación de esta investigación, en el informe oportuno de normas y trámites establecidos, hoy esta tesis es una realidad.

Al maestro Abel Rodríguez Iparraguirre, quien con su consejo y orientación académica ha sido posible culminar satisfactoriamente el presente informe.

Al maestro Joaquín Álvarez Carrillo, quien con su orientación y gestión oportuna de documentos en la escuela de Posgrado-USP, ha sido posible el cumplimiento de los requisitos normativos establecidos para la culminación de este trabajo.

A la memoria de mis padres Isaac y Lorenza, quienes, con su amor y esfuerzo, me inculcaron los deseos de superación.

A Carmen mi esposa, por su paciencia, pues convivir con un doctorando no es tarea sencilla.

A Marvin y Kevin mis amados hijos, que son mi impulso para seguir creciendo académicamente.

A todos ellos mi infinito agradecimiento.

El autor

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anaya-Reza, O., Altamirano-Corona, M. F., Basurto-García, G., Patricio-Fabián, H., García-González, S. A., Martínez-Hernandez, E., & Durán-Moreno, A. (2024). Wet anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste: experience with long-term pilot plant operation and industrial scale-up. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *47*(2), 235–247. <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02958-2>
- Archana, K., Visckram, A. S., Senthil Kumar, P., Manikandan, S., Saravanan, A., & Natrayan, L. (2024). A review on recent technological breakthroughs in anaerobic digestion of organic biowaste for biogas generation: Challenges towards sustainable development goals. *Fuel*, *358*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130298>
- Asghar, S., Chen, L., & He, B. B. (2024). Optimization of Simultaneous Nutrients and Chemical Oxygen Demand Removal from Anaerobically Digested Liquid Dairy Manure in a Two-Step Fed Sequencing Batch Reactor System Using Taguchi Method and Grey Relational Analysis. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *196*(1), 537–557. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04562-2>
- Awhangbo, L., Schmitt, V., Marcilhac, C., Charnier, C., Latrille, E., & Steyer, J. P. (2024). Determination of the optimal feed recipe of anaerobic digesters using a mathematical model and a genetic algorithm. *Bioresource Technology*, *393*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130091>
- Bippus, L., Briem, A.-K., Beck, A., Zibek, S., & Albrecht, S. (2024). Life cycle assessment for early-stage process optimization of microbial biosurfactant production using kinetic models—a case study on mannosylerythritol lipids (MEL). *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1347452>
- Chen, R., Ji, X., Chen, Z., Huang, L., & Zhu, J. (2024). Regulation of hydraulic retention time on caproic acid production via two-phase anaerobic fermentation of Chinese cabbage waste with autopoietic electron donors. *Journal of Biotechnology*, *381*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.12.012>
- Chen, Z., Liu, H., Wang, H., Liu, Y., & Wei, Z. (2024). Flue gas Pb0 removal from sludge incineration through biological lead oxidation coupled denitrification. *Fuel*, *355*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129500>
- Chen, Z., Shi, Z., Zhang, Y., Shi, Y., Sun, M., Cui, Y., Zhang, S., & Luo, G. (2024). Metagenomic analysis towards understanding the effects of ammonia on chain elongation process for medium chain fatty acids production. *Bioresource Technology*, *395*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130413>

- Chubur, V., Hasan, G., Kára, J., Hanzlíková, I., Chernysh, Y., Sedláček, J., Wang, J., & Roubík, H. (2024). Utilization of citrus, date, and jujube substrates for anaerobic digestion processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. <https://doi.org/10.1002/bbb.2665>
- Cui, F., Kim, M., Park, C., Kim, D., Mo, K., & Kim, M. (2021). Application of principal component analysis (PCA) to the assessment of parameter correlations in the partial-nitrification process using aerobic granular sludge. *Journal of Environmental Management*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112408>
- da Silva Lima, D. J., Couto, R., Souza, J. C. P., Camassola, M., Fontana, R. C., Dillon, A. J., & da Cruz Pradella, J. G. (2024). Use of an inexpensive carbon source for the production of a cellulase enzyme complex from *Penicillium ucsense* S1M29 and enzymatic hydrolysis optimization. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. <https://doi.org/10.1002/bbb.2595>
- da Silva, T. H. G., Furtado, R. X. D. S., Zaiat, M., & Azevedo, E. B. (2020). Tandem anaerobic-aerobic degradation of ranitidine, diclofenac, and simvastatin in domestic sewage. *Science of the Total Environment*, 721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137589>
- Daskiran, F., Gulhan, H., Kara, E., Guven, H., Ozgun, H., & Ersahin, M. E. (2024). Environmental impact of sewage sludge co-digestion with food waste and fat-oil-grease: Integrating plant-wide modeling with life cycle assessment approach. *Bioresource Technology*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130198>
- De Crescenzo, C., Marzocchella, A., Karatza, D., Chianese, S., & Musmarra, D. (2024). Autogenerative high-pressure anaerobic digestion modelling of volatile fatty acids: Effect of pressure variation and substrate composition on volumetric mass transfer coefficients, kinetic parameters, and process performance. *Fuel*, 358. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130144>
- DeCola, A. C., Toppen, L. C., Brown, K. P., Dadkhah, A., Rizzo, D. M., Ziels, R. M., & Scarborough, M. J. (2024). Microbiome assembly and stability during start-up of a full-scale, two-phase anaerobic digester fed cow manure and mixed organic feedstocks. *Bioresource Technology*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130247>
- Devens, K. U., Ribeiro, A. R., Trevisan, A. P., Lied, E. B., Gomes, B., Mello, E. L., & Gomes, S. D. (2024). Optimization of alkalinity supplementation in the AnSBBR using acidified cassava starch wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.109175>
- Duguma, A., Bekele, T., & Geda, A. (2024). Biogas Production through Anaerobic Codigestion of Distillery Wastewater Sludge and Disposable Spent Yeast.

- El Salamony, D. H., Salah Eldin Hassouna, M., Zaghloul, T. I., He, Z., & Moustafa Abdallah, H. (2024). Bioenergy production from chicken feather waste by anaerobic digestion and bioelectrochemical systems. *Microbial Cell Factories*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02374-5>
- El-kebeer, A. A., Mahmoud, U. F., Ismail, S., Jalal, A. A. E., Kowal, P., Al-Hazmi, H. E., & Hassan, G. K. (2024). Maximizing Bio-Hydrogen and Energy Yields Obtained in a Self-Fermented Anaerobic Bioreactor by Screening of Different Sewage Sludge Pretreatment Methods. *Processes*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/pr12010118>
- Esparza-Soto, M., Alcaraz-Ibarra, S., Lucero-Chavez, M., Jimenez-Moleon, M. D. C., Mier-Quiroga, M. D. L. A., & Fall, C. (2024). Enhancing kitchen waste minimization and energy generation at 20 °C: a psychrophilic anaerobic co-digestion study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 99(2), 522–530. <https://doi.org/10.1002/jctb.7554>
- Ge, X., Tanvir, R. U., Hu, Z., Hassanein, A., Lansing, S., Yu, Z., Luo, H., Wang, Z.-W., Wan, C., Yang, L., Khanal, S. K., & Li, Y. (2024). Rethinking anaerobic digestion for bioenergy and biopolymers production: Challenges and opportunities. *Advances in Bioenergy*, 9, 1–109. <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2024.01.001>
- Hou, H., & Zhu, H. (2024). Effects of MgCl<sub>2</sub> on sludge anaerobic digestion: Hydrolysis, acidogenesis, methanogenesis, and microbial characteristics. *Journal of Water Process Engineering*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104624>
- Huan, C., Lyu, Q., Tong, X., Li, H., Zeng, Y., Liu, Y., Jiang, X., Ji, G., Xu, L., & Yan, Z. (2021). Analyses of deodorization performance of mixotrophic biotrickling filter reactor using different industrial and agricultural wastes as packing material. *Journal of Hazardous Materials*, 420. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126608>
- Le, T.-S., Bui, X.-T., Nguyen, P.-D., Hao Ngo, H., Dang, B.-T., Le Quang, D.-T., Thi Pham, T., Visvanathan, C., & Diels, L. (2024). Bacterial community composition in a two-stage anaerobic membrane bioreactor for co-digestion of food waste and food court wastewater. *Bioresource Technology*, 391. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129925>
- Lee, E., Jin Min, K., Choi, H., & Young Park, K. (2024). Impact of dewatering inorganic coagulants on anaerobic digestion treating food waste leachate. *Bioresource Technology*, 393. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130136>

- Li, J., & Huang, C. (2024). Anaerobic co-digestion of corn straw, sewage sludge and fresh leachate: Focusing on synergistic/antagonistic effects and microbial mechanisms. *Bioresource Technology*, 395. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130414>
- Liu, Y., Xi, Y., Li, Q., Dzakpasu, M., Chen, R., & Li, Y.-Y. (2024). Biokinetic and microbial insights into regulatory mechanisms of long-chain fatty acid degradation during food waste-lipid co-digestion within anaerobic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131223>
- Marzo-Gago, C., Unger, P., Schneider, R., Venus, J., & López-Gómez, J. P. (2024). Valorising pasta industry wastes by the scale up and integration of solid-state and liquid-submerged fermentations. *Bioresource Technology*, 391. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129909>
- Miranda, S. M., Lopes, M., & Belo, I. (2024). Exploring the use of hexadecane by *Yarrowia lipolytica*: Effect of dissolved oxygen and medium supplementation. *Journal of Biotechnology*, 380, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.12.006>
- Molina-Peñate, E., Artola, A., & Sánchez, A. (2024). Exploring biorefinery alternatives for biowaste valorization: a techno-economic assessment of enzymatic hydrolysis coupled with anaerobic digestion or solid-state fermentation for high-value bioproducts. *Bioengineered*, 15(1). <https://doi.org/10.1080/21655979.2024.2307668>
- Okopi, S. I., Wang, J., Liang, W., Kong, W., Hu, Y., Cui, J., Guo, X., Zhao, W., Che, L., Gu, Z., & Xu, F. (2024). Experimental study and techno-economic analysis of co-processing system for treatment of food waste with various impurities. *Bioresource Technology*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130020>
- Pana, A.-M., Dumitrel, G. A., Ordodi, L. V., Gherman, V., Rusu, G., Stanescu, A., & Rusnac, L. M. (2019). Preliminary study on polymer degradation using an aerobic reactor. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 20(4), 1951–1959. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85081013342&partnerID=40&md5=3c5994300be10d1cb3517ad736456cf5>
- Prem, E. M., Markt, R., Wunderer, M., & Wagner, A. O. (2024). Meso- and thermophilic posttreatment of press water coming from a thermophilic municipal solid waste digester. *Biotechnology and Bioengineering*, 121(1), 266–280. <https://doi.org/10.1002/bit.28577>
- Qayoom, U., Ullah Bhat, S., & Ahmad, I. (2021). Efficiency evaluation of sewage treatment technologies: Implications on aquatic ecosystem health. *Journal of Water and Health*, 19(1), 29–46. <https://doi.org/10.2166/WH.2020.115>

- Ravi Sankar, V., Chandran, S., & Pradeep Pandiyan, D. (2018). Performance assessment, kinetics and modelling of biofilm membrane bio-reactor for the treatment of dairy wastewater. *Journal of Environmental Biology*, 39(5), 565–574. <https://doi.org/10.22438/jeb/39/5/MRN-736>
- Rolleberg, S. L. S., dos Santos, A. F., Ferreira, T. J. T., Firmino, P. I. M., & dos Santos, A. B. (2021). Evaluation of the production of alginate-like exopolysaccharides (ALE) and tryptophan in aerobic granular sludge systems. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44(2), 259–270. <https://doi.org/10.1007/s00449-020-02439-w>
- Singh, A., Sawant, M., Herlekar, M., Aymerich, E., & Starkl, M. (2024). Assessing feasibility of sewage sludge composting in rotary drum reactor. *Bioresource Technology*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130219>
- Sobieszuk, P., Strzyżewska, A., & Ulatowski, K. (2021). Investigation of the possibility of culturing aerobic yeast with oxygen nanobubble addition and evaluation of the results of batch and semi-batch cultures of *Saccharomyces cerevisiae*. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108247>
- Sriwiriyarat, T., Jangkorn, S., Charoenpanich, J., Chinwetkitvanich, S., & Fongsatitkul, P. (2021). Occurrence of aerobic denitrifying bacteria in integrated fixed film activated sludge system. *Chemosphere*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131504>
- Tanguay-Rioux, F., Spreutels, L., Roy, C., & Frigon, J.-C. (2024). Assessment of the Feasibility of Converting the Liquid Fraction Separated from Fruit and Vegetable Waste in a UASB Digester. *Bioengineering*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/bioengineering11010006>
- Wang, J.-B., Wang, H., Han, J.-Z., Xu, J., Cheng, R.-X., Hu, F., Wang, Z.-H., Zhang, R.-J., & Cai, F.-J. (2024). Co-production of biobutanol and biomethane from distillers' grain waste by an integrated process. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 99(1), 40–49. <https://doi.org/10.1002/jctb.7509>
- Wei, Y., Sun, Z., Song, X., Huang, Z., & Li, M. (2024). Optimization of aeration strategies for intensified nitrogen and phosphorus removal in an aerated electrolysis-assisted submerged fixed bed reactor treating recirculating mariculture effluent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111732>
- Welz, P. J., De Jonge, N., Lilly, M., Kaira, W., & Mpofu, A. B. (2024). Integrated biological system for remediation and valorization of tannery wastewater: Focus on microbial communities responsible for methanogenesis and sulfidogenesis. *Bioresource Technology*, 395. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130411>

- Wirasembada, Y. C., Shin, B., Shin, J., Kurniawan, A., & Cho, J. (2024). Effects of sudden shock load on simultaneous biohythane production in two-stage anaerobic digestion of high-strength organic wastewater. *Bioresource Technology*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130186>
- Xu, J., Xu, L., Zong, Y., Lin, R., He, Y., & Xie, L. (2024). Electrically-assisted anaerobic digestion under ammonia stress: Facilitating propionate oxidation and activating methanogenesis via direct interspecies electron transfer. *Bioresource Technology*, 393. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130067>
- Yan, J. Z., Kumar, P., & Rauch, W. (2024). Effect of turbulent diffusion in modeling anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 393. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130068>
- Yusof, M. A. B. M., Chan, Y. J., Chong, D. J. S., & Chong, C. H. (2024). In-ground lagoon anaerobic digester in the treatment of palm oil mill effluent (POME): Effects of process parameters and optimisation analysis. *Fuel*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129916>

## ANEXOS

**Anexo 1. Matriz de operacionalización de variables**

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Independiente (X): Aplicación del software Matlab – Polymath	Se define como la utilización de herramientas para modelado, simulación y análisis de procesos relacionados con el diseño y operación de biorreactores para el tratamiento aeróbico de materia orgánica en residuos sólidos urbanos	La aplicación del software Matlab y Polymath se mide por la implementación de estos programas en el desarrollo de modelos matemáticos, simulaciones de procesos y análisis de datos relacionados con el diseño y operación del biorreactor	Modelo matemático	Precisión del modelo	Razón
			Simulación	Tiempo de simulación	Razón
			Análisis de datos	Capacidad de análisis	Ordinal
Variable dependiente (Y): Diseño y operación de biorreactor por lotes	Se define como la gestión del biorreactor en un proceso por lotes para el tratamiento de materia orgánica, donde incluye la selección de parámetros operativos, la estructura del biorreactor y los procedimientos para su operación	Se mide a través de parámetros específicos del biorreactor, como el tiempo de retención, la carga orgánica, la tasa de aireación y la eficiencia en la eliminación de contaminantes.	Diseño del biorreactor	Tiempo de retención	Razón
			Parámetros operativos	Carga orgánica	Razón
			Eficiencia de tratamiento	Eficiencia de eliminación	Razón

*Anexo 2. Matriz de consistencia*

Problema	Variables	Objetivos	Hipótesis	Metodología
¿Cómo influye la aplicación de un software en el diseño y operación de un biorreactor discontinuo para el tratamiento aeróbico de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote?	Independiente (X): Aplicación del software Matlab – Polymath	<b>Objetivo general:</b> Explicar la influencia de la aplicación de un software en el diseño y operación de un biorreactor discontinuo para el tratamiento aeróbico de la materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote	La aplicación de un software en el diseño y operación de un biorreactor discontinuo para el tratamiento aeróbico de la materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote permite optimizar la evaluación de parámetros, variables y conversión biológica durante su funcionamiento	<b>Tipo de investigación:</b> Según su finalidad Aplicada Según su alcance Explicativa  <b>Diseño de investigación:</b> Experimental  <b>Población y muestra:</b> La población estuvo conformada por los residuos sólidos municipales de 2000 kg aproximadamente La muestra fue de 10 kg  <b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos:</b> Las técnicas fueron la simulación, análisis documental, optimización y observación.
	Dependiente (Y): Diseño y operación de biorreactor por lotes	<b>Objetivos específicos:</b> Caracterizar los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote. Analizar los distintos parámetros y variables de diseño de un biorreactor discontinuo. Procesar la información del diseño, mediante la aplicación del software. Evaluar el diseño del biorreactor con el volumen de carga del material orgánico biodegradable en condiciones aeróbicas. Evaluar el funcionamiento del biorreactor a partir del monitoreo de un biorreactor tipo banco con escalamiento de laboratorio. Determinar el grado de influencia de la aplicación del software en la conversión biológica de materia orgánica biodegradables en condiciones aeróbicas		

### Anexo 3. Caracterización física de los residuos sólidos de Nuevo Chimbote

- Base: 10 kg de residuos húmedos de recolección.
- Construcción de la tabla 10, de la referencia, tabla 1:

Tabla 10

Residuos Sólidos Municipales de Nuevo Chimbote			
Componente	Peso (kg)		Humedad (%)
	Peso húmedo	Peso seco (a)	
Residuos de comida	5,6	1,680	70
Papel y cartón	1,9	1,786	6
Plásticos	0,8	0,784	2
Vidrio	0,7	0,686	2
Textiles	-	-	-
Goma y cuero	-	-	-
Residuos de jardín y madera	-	-	-
Metales y otros	1,0	0,970	3
<b>TOTAL</b>	<b>10,0</b>	<b>5,906</b>	<b>83</b>

- El contenido de humedad se calculó de acuerdo a:

$$H = \left( \frac{w - w_d}{w} \right) \times 100 \quad ; \quad H : \text{humedad (\%)} \\ w : \text{peso inicial de muestra entregado (kg)} \\ w_d : \text{peso de la muestra despues de secado (kg)}$$

- Por ejemplo: Se secó los 5,6 kg húmedos de residuos de comida en una estufa a 105 °C. Se obtuvo 1,68 kg de peso seco y la humedad correspondiente a:

$$H_1 = \left( \frac{5,6 - 1,68}{5,6} \right) \times 100 = 70 \%, \text{ y así sucesivamente para los demas componentes}$$

**Anexo 4. Caracterización química de los residuos sólidos de Nuevo Chimbote**

- En base a la tabla 2 del informe, se construye la tabla 11, solo para componentes biodegradables de los residuos sólidos (comida, cartón y plásticos)
- Se calcula el peso (kg) de: C, H, O, N, S y ceniza.
- *Por ejemplo*, para los residuos de comida (r.c) se tiene el peso en kg de:

$$C : 1,68 \times 0,48 = 0,8064$$

$$H : 1,68 \times 0,064 = 0,1075$$

$$O : 1,68 \times 0,376 = 0,6317$$

$$N : 1,68 \times 0,026 = 0,0437$$

$$S : 1,68 \times 0,004 = 0,0067$$

$$\text{Ceniza: } 1,68 \times 0,05 = 0,084$$

Y así sucesivamente se calcula el peso de C, H, O, N, S y ceniza para los demás componentes biodegradables (papel-cartón y plásticos como aparece en la tabla 11:

*Tabla 11.*

Componente	Peso Húmedo (kg.)	Peso Seco (kg.)	Composición (kg.)					Ceniza
			C	H	O	N	S	
Residuos de Comida	5,600	1,680	0,806	0,1075	0,6317	0,0437	0,0067	0,0840
Papel y Cartón	1,900	1,786	0,786	0,1072	0,7860	0,0054	0,0036	0,1072
Plásticos	0,800	0,784	0,470	0,0564	0,1788	-	-	0,0784
<b>TOTAL</b>	<b>8,30</b>	<b>4,250</b>	<b>2,062</b>	<b>0,2711</b>	<b>1,5965</b>	<b>0,0491</b>	<b>0,0103</b>	<b>0,2696</b>

- Con las distribuciones de peso húmedo de los componentes que aparecen en la tabla 11, se construye la tabla 12 para la composición molar del residuo sin considerar las cenizas:

*Tabla 12*

Componente	Peso húmedo (kg)	Mol (g/mol)	Nº moles	Relación molar (S = 1)
------------	------------------	-------------	----------	------------------------

C	2.062	12.01	0.1718/0.0003 =	573.00
H	0.7211 (a)	1.01	0.7140/id =	2380.00
O	5.1965 (b)	16.00	0.3248/id =	1083.00
N	0.0491	14.01	0.0035/id =	12.00
S	0.0103	32.07	0.0003/id =	1.00

De la tabla se deduce la fórmula química de la fracción orgánica de los residuos:



- (a) Se adiciona el hidrógeno presente en el agua (humedad) que contiene el residuo:

$$H \text{ en el agua del residuo} = \frac{2}{18}(8.3 - 4.25) = 0.45 \text{ kg}$$

$$\Rightarrow \text{Total H} = 0.2711 + 0.45 = 0.7211 \text{ kg}$$

- (b) Se adiciona el oxígeno presente en el agua contenido en el residuo:

$$O \text{ en el agua del residuo} = \frac{16}{18}(8.3 - 4.25) = 3.60 \text{ kg}$$

$$\Rightarrow \text{Total O} = 1.5965 + 3.60 = 5.1965 \text{ kg}$$

- **Fórmula útil:** Es aquella de la fracción orgánica de los residuos sólidos con los componentes biológicamente degradables (C, H, O y N) en base seca. Se construye la tabla 13 con la información de la tabla 12 para los componentes biodegradables:

Tabla 13

Componente	Peso seco (kg)	Mol (g/mol)	Moles	Relación mol (N = 1)
C	2,062 (c)	12.01	0,1717	49.1
H	0,2711 (d)	1.01	0,2684	76.7
O	1,5965 (e)	16.00	0,0998	28.5
N	0,0491 (f)	14.01	0,0035	1

Componentes en los residuos de comida + papel-cartón + plásticos

(c) C:  $0,806 + 0,786 + 0,470 = 2,062 \text{ kg}$

(d) H:  $0,1075 + 0,1072 + 0,0564 = 0,2711 \text{ kg}$

(e) O:  $0,6317 + 0,7860 + 0,1788 = 1,5965$  kg

(f) N:  $0,0437 + 0,0054 + \text{----} = 0,0491$  kg

$\Rightarrow$  *Fórmula biodegradable* :  $C_{49.1}H_{76.7}O_{28.5}N_1$

- En base a las tablas 3 y 10 del informe, se construye la tabla 14 para la conversión fraccional biodegradable de la muestra:

*Tabla 14*

COMPONENTE	Peso húmedo (kg.)	(SV/ ST) (%)	% SV	BF	Conversión fraccional (X)
Residuos de comida.	5,6	11(g)	0.4	0.820	0.09
Papel cartón	1,9	95(h)	17.4(i)	0.343(j)	0.33
Plásticos	0,8	-	-	-	-
TOTAL	8,3				0,42

(g) Relación porcentual promedio SV/ST para los residuos de comida:  $(7 + 15)/2 = 11$  %

(h) Relación porcentual promedio SV/ST para papel-cartón:  $(94 + 96)/2 = 95$  %

(i) Promedio porcentual SV, papel-cartón:  $(21.9 + 12.9)/2 = 17.4$  %

(j) Fracción biodegradable promedio BF, papel-cartón:  $(0.22 + 0.47)/2 = 0.343$

(k) Conversión fraccional total de la muestra de los residuos (X), basado en el porcentaje de sólidos volátiles y su fracción biodegradable de los componentes:

$X = 0.11 (0.820) + 0.95 (0.343) = 0.42$

**Anexo 5. Caracterización biológica de la materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos de Nuevo Chimbote**

**(a) Tratamiento de las Muestras:**

- Volumen de Biorreactor (control – Bc) : 2 500 mL (2,5 L)  
(experimental – Be) : 7 000 mL (7 L)
- Prueba de Carga:
  - Be : 2 100 mL – agua de dilución (q.p)
  - Be : 2 100 mL [material orgánico (m.o) + cultivo + H<sub>2</sub>O q.p]
  - Dilución (15 %) = 2 100 x 0,15 = 315 mL
  - m.o (80 %) = 315 x 0,80 = 252 mL
  - Cultivo (rumen)(20 %) = 315 x 0,20 = 63 mL
- Carga al Be = 252 mL m.o + 63 mL rumen + 1 785 mL H<sub>2</sub>O q.p = 2 100 mL

**(b) Protocolo para la Determinación de la DBO de las muestras:**

- *Método:* Winkler con botellas de 300 mL y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> N/40
- Extracción de muestra del Be = 300 mL (14,3 %)
- Volumen de muestra para las botellas de 300 mL
  - Si en Be V<sub>e</sub> = 2 100 mL hay 315 mL (m.o. + rumen + H<sub>2</sub>O)
  - m.o = 0,80 x 315 = 252 mL
  - 252 mL de m.o. contenida en 315 mL de muestra
  - X mL de m.o. contenida en 300 mL (bot. Winkler) } X = 240 mL de m.o
- Por consiguiente: V<sub>b</sub> = 300 mL (agua de dilución para el Bc)  
V<sub>s</sub> = 240 mL (m.o. biodegradable para Be)
- Ecuación para el oxígeno disuelto (OD) en el agua de dilución y en la muestra de m.o.
 
$$OD(mg/L) = \frac{v \cdot N_{(1/40)} \cdot 8\,000}{V_s \cdot \frac{V_{fcoDBO} - 2}{V_{fcoDBO}}}$$
  - v : volumen de tiosulfato gastado (mL)
  - N : normalidad de tiosulfato
  - V<sub>s</sub> : volumen de muestra titulada (mL)
  - V<sub>fcoDBO</sub> = 300 mL
- Ecuación para la DBO para todos los casos de efluentes residuales:

$$DBO(mg/L) = \left[ \left( OD_b - OD_s^f \right) \frac{V_b}{V_s} \right] - \left( OD_b - OD_s^i \right)$$

$OD_b$  : oxígeno disuelto del blanco (control), al final del período de incubación

$OD_s^f$  : oxígeno disuelto en la dilución de muestra, al final del período de incubación

$OD_s^i$  : oxígeno disuelto presente en la muestra no diluida al inicio

$V_b$  : volumen control

$V_s$  : volumen muestra

**(c) Pruebas y corridas:**

- **Corrida 1.** Determinación del oxígeno disuelto a 5 días ( $OD_c^5$ ) del agua de dilución en el biorreactor control:

$v = 11,73$  mL gasto de tiosulfato

$N = 0,0254$  (1/40)

$V_s = V_{fcoDBO} = 300$  mL

$$OD_c^5 = \frac{11,73 \times 0,0254}{300 \times \frac{300-2}{300}} \times 8\,000 = 8 \text{ mg/L}$$

- Las pruebas para el oxígeno disuelto de las muestras en los biorreactores: Control (Bc) y experimental (Be) se realizaron con las ecuaciones:

$$OD_i = \frac{V_{\text{tiosulfato gastado}} \times N_{\text{tiosulfato}}}{V_{\text{muestra titulada}}} * 8\,000 \text{ (mg } O_2 \text{ /L)}$$

$$OD_f = \frac{V_{\text{tiosulfato gastado}} \times N_{\text{tiosulfato}}}{V_{\text{muestra titulada}}} * 8\,000 \text{ (mg } O_2 \text{ /L)}$$

- **Prueba 1Bc.** Aplicando el protocolo del rango para la DBO de 120 – 420, con diluciones de muestra de 5 mL.

- Si  $DBO_c^5 = 450$  fuera del rango;  $OD_c = 8$ ;  $V_c = 300$  y  $V_s = 5$  mL

$$DBO_c^5 = \left[ (OD_c - OD_f^5) \frac{V_c}{V_s} \right] - (OD_c - OD_i^5)$$

$$450 = \left[ (8 - OD_f^5) \frac{300}{5} \right] - (8 - OD_i^5) \quad ; \quad OD_i^5 = x$$

$$450 = [(8 - y)60] - (8 - x) \quad OD_f^5 = y$$

$$450 = (8 - y)60 - 8 + x$$

$$x - 60y = -22$$

$$\text{Si } x = 2 \rightarrow 60y = 24 \rightarrow y = 24/60 = 0,40$$

$$x = 3 \rightarrow 60y = 25 \rightarrow y = 25/60 = 0,42 \quad ?$$

$$x = 5 \rightarrow 60y = 27 \rightarrow y = 27/60 = 0,45$$

- Si  $DBO^5_c = 420$  dentro del rango para el mismo protocolo, se tiene:

$$x - 60y = - 52 \Rightarrow \text{Si } x = 2 \rightarrow y = 0,900$$

$$= 3 \rightarrow y = 0,916$$

$$= 5 \rightarrow y = 0,950 \text{ ¿? Se busca un mejor ajuste}$$

- **Prueba 2Bc.** Aplicando el protocolo para el rango DBO de 300 – 1050 con diluciones de muestra de 2 mL

Si  $DBO = 472$  dentro del rango a 5 días;  $OD_c = 8$ ;  $V_c = 300$  y  $V_s = 3$  mL

$$\Rightarrow 472 = \left[ (8 - y) \frac{300}{3} \right] - (8 - x)$$

$$472 = 800 - 100y - 8 + x$$

$$x - 100y = - 320$$

$$\text{Si } x = 2 \rightarrow y = \frac{322}{100} = 3,22$$

$$= 3 \rightarrow y = \frac{323}{100} = 3,23$$

$$= 4 \rightarrow y = \frac{324}{100} = 3,24$$

$$= 5 \rightarrow y = \frac{325}{100} = 3,25$$

Mejor ajuste

Entonces:

$$OD_i^5 = \frac{V_{tío} \times N_{tío}}{V_m} * 8\ 000 \quad ; \quad OD_f^5 = \frac{V_{tío} \times N_{tío}}{V_m} * 8\ 000$$

$$OD_i^5 = 2 \quad ; \quad OD_f^5 = 3,22 \quad ; \quad N_{tío} = 0,0254 \quad ; \quad V_m = 300$$

$$\frac{V_i \times 0,0254}{300} * 8\ 000 = 2,00 \quad \longrightarrow \quad V_i = \frac{2}{0,6773} = 2,953 \text{ mL tiosulfato (inicio)}$$

$$\frac{V_f \times 0,0254}{300} * 8\ 000 = 3,22 \quad \longrightarrow \quad V_f = \frac{3,22}{0,6773} = 4,754 \text{ mL tiosulfato (final)}$$

Con la referencia del mejor ajuste para el protocolo de la DBO en el intervalo 300 – 1050, con diluciones de 3 mL calculamos la DBO a (0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30) días:

▪ **Corrida 2: Biorreactor Control (Bc)**

- **A 0 días:** 
$$OD_i^c = \frac{V_i \times 0,0254}{300} \times 8\ 000$$

$$= V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$OD_f^c = V_f \times 0,6773 = 4,553 \times 0,6773 = 3,084\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$\Rightarrow DBO_c^0 = \left[ (OD_c - OD_f^c) \frac{V_c}{V_s} \right] - (OD_c - OD_i^c)$$

$$= \left[ (8 - 3,084) \frac{300}{3} \right] - (8 - 2) = (8 - 3,084)100 - 8 + 2 = 485,6\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

- **A 5 días:** 
$$OD_i^c = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$OD_f^c = V_f \times 0,6773 = 4,754 \times 0,6773 = 3,22\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$\Rightarrow DBO_c^5 = (8 - 3,22)100 - 8 + 2 = 472\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

- **A 10 días:** 
$$OD_i^c = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$OD_f^c = V_f \times 0,6773 = 4,931 \times 0,6773 = 3,34\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$\Rightarrow DBO_c^{10} = (8 - 3,34)100 - 8 + 2 = 460\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

- **A 15 días:** 
$$OD_i^c = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$OD_f^c = V_f \times 0,6773 = 5,064 \times 0,6773 = 3,43\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$\Rightarrow DBO_c^{15} = (8 - 3,43)100 - 8 + 2 = 451\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

- **A 20 días:** 
$$OD_i^c = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$OD_f^c = V_f \times 0,6773 = 5,212 \times 0,6773 = 3,53\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$\Rightarrow DBO_c^{20} = (8 - 3,53)100 - 8 + 2 = 441\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

- **A 25 días:** 
$$OD_i^c = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$OD_f^c = V_f \times 0,6773 = 5,36 \times 0,6773 = 3,63\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$\Rightarrow DBO_c^{25} = (8 - 3,63)100 - 8 + 2 = 431\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

- **A 30 días:** 
$$OD_i^c = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$OD_f^c = V_f \times 0,6773 = 5,507 \times 0,6773 = 3,73\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

$$\Rightarrow DBO_c^{30} = (8 - 3,73)100 - 8 + 2 = 421\ \text{mg O}_2/\text{L}$$

- **Corrida 2:** Biorreactor Experimental (Be).  $OD_c = 8$  ;  $V_c = 300$  ;  $V_s = 3$

- **A 0 días:**  $OD_i^e = V_i \times 0,6773 = 3,174 \times 0,6773 = 2,15 \text{ mg } O_2/L$   
 $OD_f^e = V_f \times 0,6773 = 4,872 \times 0,6773 = 3,3 \text{ mg } O_2/L$   
 $\Rightarrow DBO_e^0 = (8 - 3,3)100 - 8 + 2,15 = 464,15 \text{ mg } O_2/L$
- **A 5 días:**  $OD_i^e = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2,0 \text{ mg } O_2/L$   
 $OD_f^e = V_f \times 0,6773 = 5,166 \times 0,6773 = 3,5 \text{ mg } O_2/L$   
 $\Rightarrow DBO_e^5 = (8 - 3,5)100 - 8 + 2 = 444 \text{ mg } O_2/L$
- **A 10 días:**  $OD_i^e = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2,0 \text{ mg } O_2/L$   
 $OD_f^e = V_f \times 0,6773 = 5,479 \times 0,6773 = 3,711 \text{ mg } O_2/L$   
 $\Rightarrow DBO_e^{10} = (8 - 3,711)100 - 8 + 2 = 422,89 \text{ mg } O_2/L$
- **A 15 días:**  $OD_i^e = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2,0 \text{ mg } O_2/L$   
 $OD_f^e = V_f \times 0,6773 = 5,788 \times 0,6773 = 3,920 \text{ mg } O_2/L$   
 $\Rightarrow DBO_e^{15} = (8 - 3,920)100 - 8 + 2 = 402,05 \text{ mg } O_2/L$
- **A 20 días:**  $OD_i^e = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2,0 \text{ mg } O_2/L$   
 $OD_f^e = V_f \times 0,6773 = 6,090 \times 0,6773 = 4,125 \text{ mg } O_2/L$   
 $\Rightarrow DBO_e^{20} = (8 - 4,125)100 - 8 + 2 = 381,55 \text{ mg } O_2/L$
- **A 25 días:**  $OD_i^e = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2,0 \text{ mg } O_2/L$   
 $OD_f^e = V_f \times 0,6773 = 6,393 \times 0,6773 = 4,33 \text{ mg } O_2/L$   
 $\Rightarrow DBO_e^{25} = (8 - 4,33)100 - 8 + 2 = 361 \text{ mg } O_2/L$
- **A 30 días:**  $OD_i^e = V_i \times 0,6773 = 2,953 \times 0,6773 = 2,0 \text{ mg } O_2/L$   
 $OD_f^e = V_f \times 0,6773 = 6,685 \times 0,6773 = 4,528 \text{ mg } O_2/L$   
 $\Rightarrow DBO_e^{30} = (8 - 4,528)100 - 8 + 2 = 341,15 \text{ mg } O_2/L$

- Se construye las tablas 15 y 18 para el oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de la materia orgánica biodegradable (mob) de los

residuos urbanos de Nuevo Chimbote en los biorreactores: Control (Bc) y experimental (Be) de 0 a 30 días.

*Tabla 18*

Tiempo de residencia (días)	Volumen Muestra Vs (mL)	Biorreactor control (Bc)		Biorreactor experimental (Be)	
		OD <sub>c</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>c</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	OD <sub>e</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>e</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)
0	300	2,000	485,60	3,300	464,15
5	300	3,220	472,00	3,500	444,00
10	300	3,340	460,00	3,711	422,89
15	300	3,430	451,00	3,920	402,05
20	300	3,530	441,00	4,125	381,55
25	300	3,630	431,00	4,330	361,00
30	300	3,730	421,00	4,528	341,15

Oxígeno disuelto en volumen control (300 mL) OD<sub>c</sub> = 8 mg O<sub>2</sub>/L

**Anexo 6. Caracterización cinética de la materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos de Nuevo Chimbote**

- Aplicación del programa Matlab para determinar el orden de reacción: DBO (mg O<sub>2</sub>/L) vs t (días)
- Datos para las pruebas cinéticas del biorreactor experimental (Be) DBO vs t.

<i>t (días)</i>	<i>0</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>20</i>	<i>25</i>	<i>30</i>
<i>DBO (mg O<sub>2</sub>/L)</i>	<i>DB<sub>o</sub> = 464,15</i>	<i>444</i>	<i>422,89</i>	<i>402,05</i>	<i>381,55</i>	<i>361</i>	<i>341,15</i>

- Prueba cinética para un orden de reacción CERO. Los resultados arrojan una recta con tendencia (–) para la constante de velocidad (k)
- Prueba cinética para una reacción de PRIMER ORDEN. Los resultados arrojan una recta con tendencia (+) para la constante de velocidad (k).
- Siendo una reacción de primer orden con los datos del biorreactor, se realiza un reajuste en el programa para determinar el valor cuantitativo de k. Resultando  $k = 0,0105 \text{ d}^{-1}$ .

clc, clear all

disp('Tesis Doctorado 2023')

disp('Cinética: Primer orden ajustado')

disp('M.Sc. Saúl Eusebio Lara')

So=464.15

t=[5 10 15 20 25 30]; % tiempo (d)

DBO=[444.00 422.89 402.05 381.55 361.00 341.15]; % Carga orgánica (DBO mg/L)

% Prueba para cinética de primer orden (ecuación 14)

X=t;

Y=log(So./DBO);

plot(X,Y,'o-k')

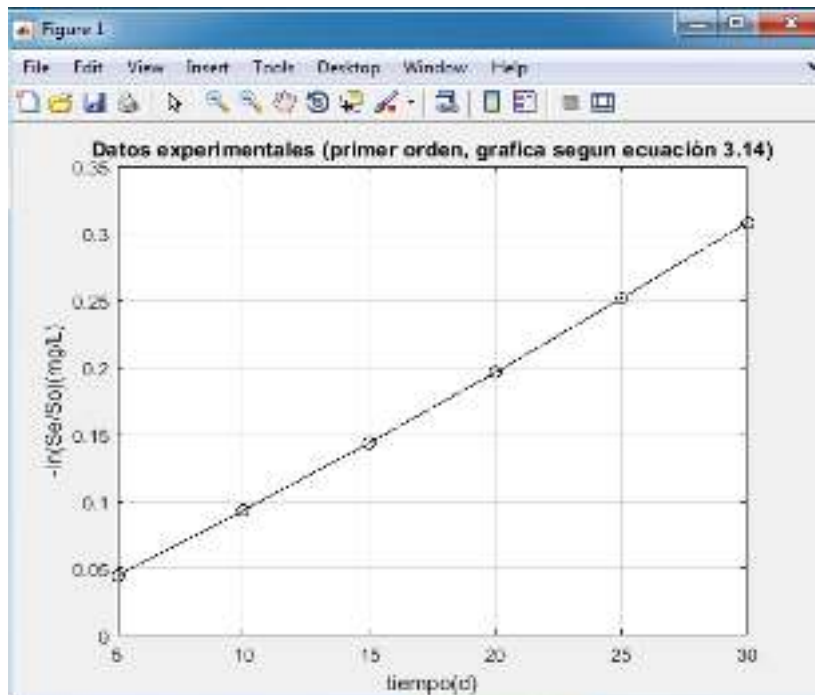
title('Datos experimentales (primer orden, grafica según ecuación 3.14)')

xlabel('tiempo(d)')

ylabel('-ln(S<sub>e</sub>/S<sub>o</sub>)(mg/L)')

grid

pause



% Obtención de la recta que se ajusta mejor a los datos experimentales

A=polyfit(X,Y,1);

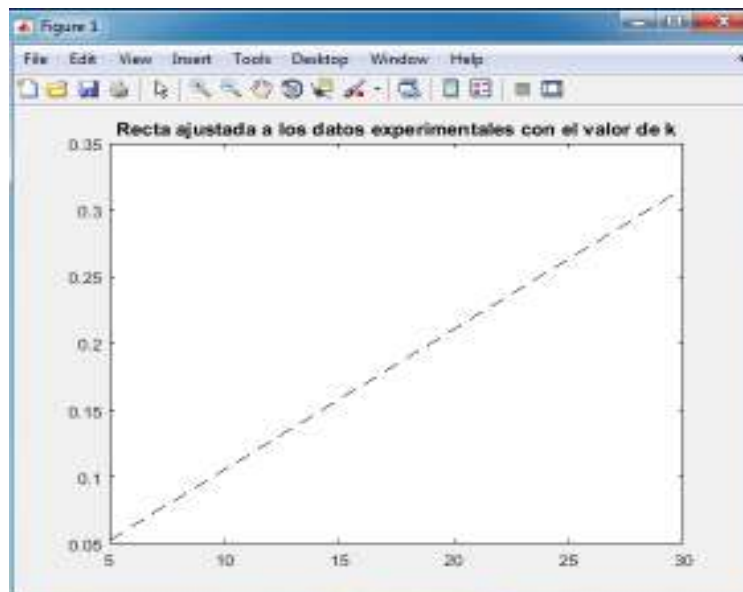
k=A(1)% pendiente k

% Gráfica de la recta que se ajusta a los datos experimentales

recta=X.\*k;

plot(X,recta,'--k')

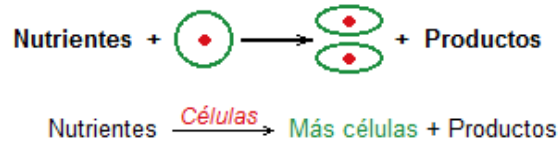
title('Recta ajustada a los datos experimentales con el valor de k')



$$k = 0.0105 \text{ (d}^{-1}\text{)}$$

**Anexo 7. Selección del sistema de digestión aeróbica para los RSU de Nuevo Chimbote**

- *Biorreactor por Lotes* (discontinuo) con cultivos en suspensión para el crecimiento de bacterias en la biodegradación.
- *Modelo de operación:*



- *Ecuaciones a desarrollarse en el biorreactor:*

(1) Balance de masa:

$$\text{Células: } V \frac{dC_c}{dt} = (r_g - r_d)V$$

$$\text{Sustrato: } V \frac{dC_s}{dt} = Y_{s/c}(-r_g)V - r_{sm}V$$

$$\text{Producto: } V \frac{dC_p}{dt} = Y_{p/c}(r_g)V$$

(2) Leyes de velocidad:

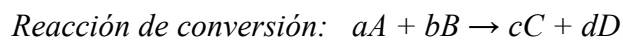
$$r_g = \mu_{max} \left( 1 - \frac{C_p}{C_p^*} \right)^{0,50} \frac{C_c C_s}{K_s + C_s}$$

$$r_d = k_d C_c$$

$$r_{sm} = m C_c$$

(3) Estequiometría:  $r_p = Y_{p/c} r_g$

(4) Ecuaciones para la conversión:



*Balance molar:*  $\frac{dX_A}{dt} = \frac{(-r_A)V}{N_{Ao}} = \frac{(-r_A)}{C_{Ao}}$

*Ley y orden de velocidad:*  $-r_A = k \cdot C_A^x \cdot C_B^y$

*Estequiometría:*  $C_A = C_{Ao}(1 - X)$

$$C_B = C_{Ao} \left( \theta_B - \frac{b}{a} X \right) \quad \theta_B = \frac{C_{Bo}}{C_{Ao}}$$

(5) Incorporando el programa Polymath para resolver las ecuaciones.

*PASOS DE ALGORITMO*

*ECUACIONES POLYMATH*

*Balance de masa:*

$$d(Cc)/d(t) = -D * Cc + (r_g - r_d)$$

$$d(Cs)/(dt) = D * (Cso - Cs) - Ysc * r_g - m * Cc$$

$$d(Cp)/(dt) = -D * Cp + Ypc * r_g$$

$$d(X)/d(t) = -r_A / C_{Ao}$$

*Leyes de velocidad:*  $r_g = ((1 - (Cp/Cpstar))^{0.5}) * \mu_{max} * (Cs / (Ks + Cs)) * Cc$

$$r_d = k_d * Cc$$

$$r_{sm} = m * Cc$$

$$r_A = -k * C_A * C_B$$

*Estequiometría:*  $r_p = Y_{pc} * r_g$

$$C_A = C_{Ao} * (1 - X)$$

$$C_B = C_{Ao} * (\text{teta}B - 53 * X)$$

(6) Parámetros de evaluación.

$$C^*p \text{ (g/dm}^3\text{)}$$

$$Yc/s \text{ (g/g)}$$

$$n \text{ (0.50)}$$

$$Yp/s \text{ (g/g)}$$

$$\mu_{max} \text{ (h}^{-1}\text{)}$$

$$Yp/c \text{ (g/g)}$$

$$Ks \text{ (g/dm}^3\text{)}$$

$$k_d \text{ (h}^{-1}\text{)}$$

$$m \text{ (g sustrato/(g células.h))}$$

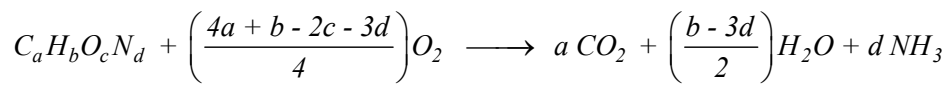
$$k \text{ (d}^{-1}\text{)}$$

*Valores iniciales:*  $t(0)(h); \quad Cc(0)(g/L); \quad Cp(0)(g/L)$

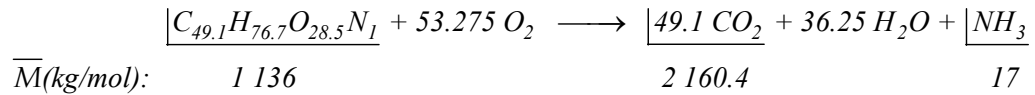
*Valores finales:*  $t(f)(h); \quad Cs(0)(g/L); \quad X(0)(\%)$

**Anexo 8. Diseño y construcción del biorreactor para el tratamiento de la materia orgánica biodegradable**

- Residuos recolectados: 10 kg
- Material orgánico: 8,3 kg (incluye humedad)
- Residuos orgánicos degradables (base seca):  $4,25 \times 0,95 (*) = 4,0375 \text{ kg} (*)$   
Suponiendo que el 5 % del material degradado se queda como cenizas.
- Para una conversión completa (en condiciones aeróbicas) de la fracción orgánica biodegradable se tiene la ecuación:



Resolviendo los coeficientes (a, b, c, d) de la ecuación se tiene:



- En condiciones aeróbicas a 35 °C, el material resultante de la reacción es: Residuo + agua líquida (dilución) + mezcla de gases (CO<sub>2</sub> + NH<sub>3</sub>). Para diseñar el volumen del biorreactor se evalúa la producción de gases:

$$- \text{Dioxido de carbono (CO}_2) = \frac{2160.4}{1136} \times 4.0375 = 7.678 \text{ kg}$$

$$- \text{Amoniac gaseoso (NH}_3) = \frac{17}{1136} \times 4.0375 = 0.060 \text{ kg}$$

- Volumen de gases, se obtiene con las densidades:  $d(\text{CO}_2 \text{ a } 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 1.7522 \text{ kg/m}^3$ ;  
 $d(\text{NH}_3 \text{ a } 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 0.6832 \text{ kg/m}^3$

$$V_{CO_2} = \frac{7.678 \text{ kg}}{1.7522 \text{ kg/m}^3} = 4.382 \text{ m}^3 \Rightarrow \% CO_2 = \left( \frac{4.382}{4.382 + 0.089} \right) \times 100 = 98 \%$$

$$V_{NH_3} = \frac{0.060 \text{ kg}}{0.6832 \text{ kg/m}^3} = 0.089 \text{ m}^3 \Rightarrow \% NH_3 = 100 - 98 = 2 \%$$

- Cantidad total de gas generado por peso unitario de residuo sólido:

$$* \text{ Basado en el peso seco de material orgánico} = \frac{4.382 \text{ m}^3 CO_2 + 0.089 \text{ m}^3 NH_3}{4.0375 \text{ kg m.o.biodeg.}}$$

$$= 1.1074 \text{ m}^3 / \text{kg m.o.biodeg.} = 1.1074 \text{ L/g S.V.B}$$

$$* \text{Basado en 10 kg de residuos s\u00f3lidos org\u00e1nicos} = \frac{4.382 \text{ m}^3 \text{CO}_2 + 0.089 \text{ m}^3 \text{NH}_3}{10 \text{ kg r.s.o.}}$$

$$= 0.4471 \text{ m}^3 / \text{kg r.s.o.} = 0.4471 \text{ L/g r.s.o.}$$

h. Carga molar de gas generado por peso unitario de residuo s\u00f3lido biodegradable en base seca:

* Composici\u00f3n del gas :	$\frac{CO_2}{}$	$\frac{NH_3}{}$
$d(\text{g/L a } 35^\circ\text{C}) :$	1.7522	0.6832
$\bar{M}(\text{g/mol}) :$	44	17

$$* \text{Densidad del gas} = \frac{1.7522(44) + 0.6832(17)}{44 + 17} = 1.4543 \text{ g/L}$$

$$* \text{Peso molecular del gas} = 0.98(44) + 0.02(17) = 43.46 \text{ g/mol}$$

$$* \text{Masa de gas por peso seco de material org\u00e1nico} = 1.4543 \frac{\text{g}}{\text{L}} \times 1.1074 \frac{\text{L}}{\text{g S.V.B}}$$

$$= 1.6105 \frac{\text{g gas}}{\text{g S.V.B}}$$

$$* \text{Mol de gas por peso seco de material org\u00e1nico} = \frac{1.6105 \text{ g gas/g S.V.B}}{43.46 \text{ g gas/mol gas}}$$

$$= 0.0371 \frac{\text{mol gas}}{\text{g S.V.B}}$$

$$* \text{Moles de gas estequiom\u00e9trico de la reacci\u00f3n: } \frac{CO_2}{} + \frac{NH_3}{}$$

$$49.1(0.98) + 1(0.02)$$

$$= 48.138 \text{ mol}$$

i. La carga molar del sustrato ( $S_o$ ) para una conversi\u00f3n eficaz del  $0.95 \times 0.42 = 0,399$  (39,9 %) y una producci\u00f3n de 0.0371 mol gas/g S.V.B es:

$$S_o = 0.0371 \frac{\text{mol gas}}{\text{g S.V.B}} \times \frac{\text{mol } S_o}{48.138 \text{ mol gas}} \times \frac{1}{0.399} = 1.9316 \times 10^{-3} \frac{\text{mol } S_o}{\text{g S.V.B}}$$

j. C\u00e1lculo del tiempo medio de residencia del sustrato ( $S_o$ ):

\* Ley de velocidad de biodegradaci\u00f3n: Reacci\u00f3n de primer orden (ref. Matlab)

$$-r_s = k.C_s ;$$

$$\text{donde: } k = 0,0105 \text{ d}^{-1}$$

$$C_s = \text{concentraci\u00f3n del sustrato (mol)}$$

\* *Conversión fraccional de sólidos biodegradables (S.B): En base a la determinación de sólidos volátiles (S.V) de la fracción orgánica, se tiene una conversión del 42 % ( $X = 0.42$ )*

\* *En un biorreactor por lotes, para el tiempo de residencia se tiene:*

$$t = C_{so} \int_0^X \frac{dX}{-r_s} \quad ; \quad \text{donde: } -r_s = k \cdot C_s = k \cdot C_{so}(1 - X)$$

$$\Rightarrow t = C_{so} \int_0^X \frac{dX}{k \cdot C_{so}(1 - X)} = \frac{C_{so}}{k \cdot C_{so}} \int_0^X \frac{dX}{1 - X} = -\frac{1}{k} \ln(1 - X)$$

*Para:  $k = 0.0105 \text{ d}^{-1}$  y  $X = 0.95 \times 0.42 = 0.399$  se tiene:*

$$t = -\frac{1}{0.0105} \ln(1 - 0.399) = -\frac{1}{0.0105} \ln(0.601) = 48.5 \text{ d}$$

k. El peso total del material orgánico es 10 kg, de los cuales 8.3 kg es el material biodegradable. Por lo tanto, la carga orgánica diluida sometida a tratamiento por día de operación es:

$$8.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} = 8.3 \frac{\text{g}}{\text{L} \cdot \text{d}}$$

\* *La referencia bibliográfica, recomienda concentrar los R.S.V.B de 8 a 12 % en procesos aerobios. Se tomó una dilución de 15 % de concentración.*

\* *Eficiencia de conversión de S.V.B = 95 %*

\* *Grado de conversión de S.V.B = 42 %*

\* *Tiempo de residencia del sustrato en el biorreactor = 48.5 d*

\* *Se tiene una carga orgánica real de tratamiento para una concentración de S.V.B ( $C_{so}$ ):*

$$C_{so} = 8.3 \frac{\text{g S.V.B}}{\text{L} \cdot \text{d}} \times 48.5 \text{ d} \times 0.95 \times 0.42 \times 0.15 = 24.1 \frac{\text{g S.V.B}}{\text{L}}$$

$$= 24.1 \frac{\text{g S.V.B}}{\text{L}} \times \frac{1}{1136 \frac{\text{g S.V.B}}{\text{mol } S_o}} = 0.0212 \frac{\text{mol } S_o}{\text{L}}$$

- l. La cantidad total de gas generado por peso unitario de los S.V.B en base húmeda es:

$$\frac{4.382 \text{ m}^3 \text{CO}_2 + 0.089 \text{ m}^3 \text{NH}_3}{8.3 \text{ kg S.V.B}} = 0.5387 \frac{\text{m}^3 \text{gas}}{\text{kg S.V.B}} = 0.5387 \frac{\text{L gas}}{\text{g S.V.B}}$$

- m. Cada gramo de S.V.B representa un consumo de  $1.9316 \times 10^{-3}$  mol de sustrato o residuo húmedo ( $S_o$ ) y para 0.0212 mol  $S_o =$

$$\frac{0.0212 \text{ mol } S_o}{1.9316 \times 10^{-3} \text{ mol } S_o} \times \text{g S.V.B} = 11 \text{ g S.V.B}$$

- n. En base húmeda cada gramo de S.V.B del residuo genera 0.5387 L de gas. La cantidad de gas en volumen de 11 g S.V.B del sustrato ( $S_o$ ) genera un volumen (V) de gas:

$$V = 0.5387 \frac{\text{L gas}}{\text{g S.V.B}} \times 11 \text{ g S.V.B} = 5.93 \text{ L}$$

- o. El volumen del biorreactor está referido al volumen del gas ( $\text{CO}_2 + \text{NH}_3$ ) que se produce por cada g S.V.B que se convierte del residuo. Por consiguiente, el volumen del **biorreactor será** aquel, necesario para contener un volumen teórico de 5.93 L de gas:  $V_{BR} = 5.93 \text{ L}$

- p. Será necesario un espacio adicional de volumen para la carga bacteriana = 18 %. Por lo tanto, el volumen del biorreactor (V) es:

$$V = (1.18) V_{BR} = 1.18 \times 5.93 = 7 \text{ L}$$

- q. **Dimensiones del Biorreactor:** Con las recomendaciones de nomenclatura de la referencia bibliográfica, se tiene las siguientes dimensiones:

$$V = \frac{V_{BR}}{0.82} = \frac{5.93}{0.82} = 7 \text{ L} \quad ; \quad \frac{H}{D} = 1.5$$

$$D_T = [(4 \times 7 \text{ 000}) / (3.1416 \times 1.5)]^{1/3} = 18 \text{ cm}$$

$$H_T = 18 \times 1.5 = 27 \text{ cm}$$

$$D_A = 18/3 = 6 \text{ cm}$$

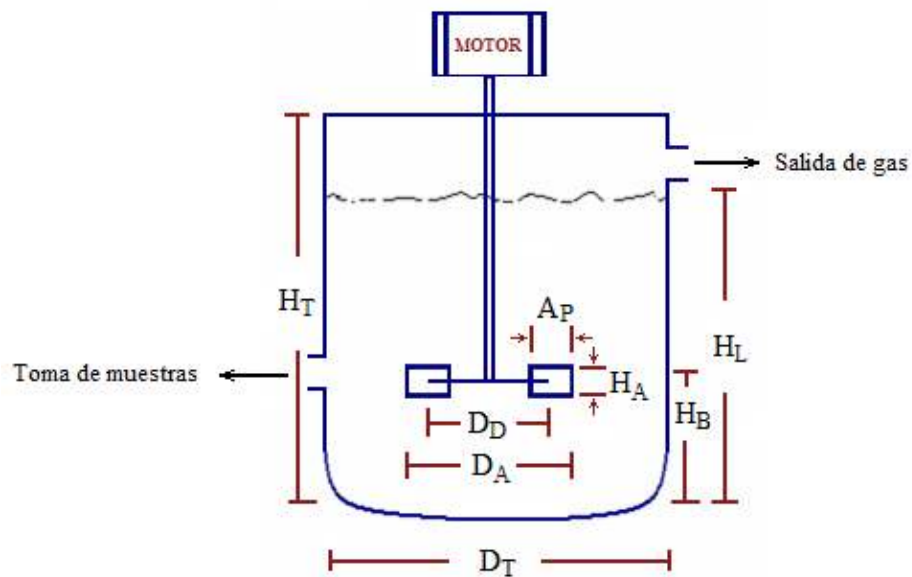
$$D_D = 6 \times 2/3 = 4 \text{ cm}$$

$$A_P = 18/10 = 1.8 \text{ cm}$$

$$H_A = 18/12 = 1.5 \text{ cm}$$

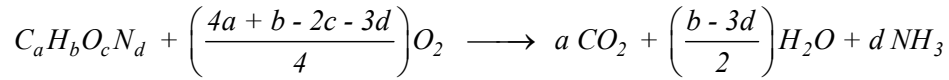
$$H_B = 1.2 \times 6 = 7.2 \text{ cm}$$

$$H_L = (4 \times 5.93) / (3.1416 \times 18^2) = 23.3 \text{ cm}$$

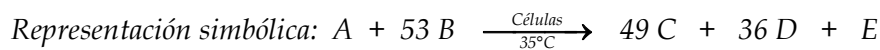
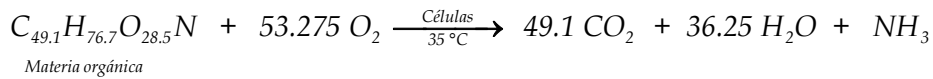


**Anexo 9. Evaluación de parámetros y variables de la mob de los RSM en Nuevo Chimbote**

(1) Reacción general de oxidación de la materia orgánica:



(2) Reacción específica de oxidación:



(3) Cinética y orden de velocidad:  $-r_A = k \cdot C_A \cdot C_B \rightarrow$  primer orden,  $k = 0,0105 d^{-1}$

(4) Volumen de carga inicial de reactivos al biorreactor: 2 100 mL de reactivos A y B

(5) Concentraciones iniciales de los reactivos: *Sustrato*,  $C_{so} = 24.1 \text{ g/L}$

*Nutrientes (rumen)*,  $C_{co} = 0,46 \text{ g/L}$

\* *La concentración de células (nutrientes + rumen) es proporcional al oxígeno para un día de operación del biorreactor. Es decir, proporcional a la DBO de un día en el proceso:*

=> 464.15 mg O<sub>2</sub>/L a 0 días

444.00 mg O<sub>2</sub>/L a 5 días

*Interpolando para 01 día se tiene:* 0 d ----- 464.15

1 d ----- ? mg O<sub>2</sub>/L

5 d ----- 444

$$\frac{444 - 464.15}{5 - 0} = \frac{\text{mg O}_2/\text{L} - 464.15}{1 - 0}$$

$$\text{mg O}_2/\text{L} = 464.15 - 4.03 = 460.12$$

$$\Rightarrow C_{co} = 460.12 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{g}}{1000 \text{mg}} = 0.46 \text{ g/L}$$

(6) Temperatura de la mezcla de reactivos: 35 °C

(7) Datos de parámetros adicionales de operación en el biorreactor:

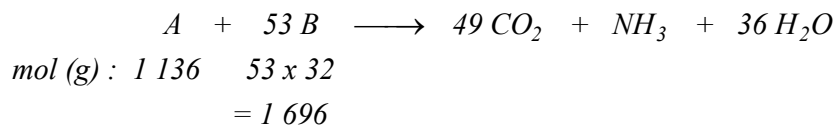
$$* m = \frac{\text{Masa de sustrato consumido para mantenimiento}}{\text{Masa de células} \cdot \text{tiempo}}$$

$$\text{Valor típico: } m = 0.05 \frac{\text{g sustrato}}{\text{peso seco (g)} \cdot \text{h}} = 0.05 \text{ h}^{-1}$$

$$* Y_{c/s} = \frac{\text{Masa de nuevas células formadas}}{\text{Masa de sustrato consumido a nuevas células producidas}}$$

- Masa de sustrato consumido:  $C_s = 24.1 \text{ g/L}$

- Masa de nuevas células formadas,  $C_c$ : Es equivalente al oxígeno consumido en la reacción estequiométrica:



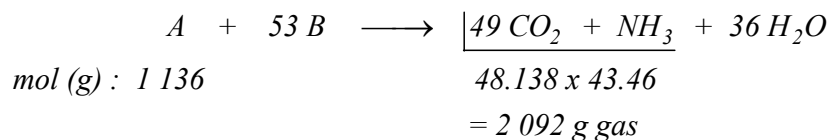
$$24.1 \text{ g s} \times \frac{1 \ 696 \text{ g O}_2}{1 \ 136 \text{ g s}} = 36 \text{ O}_2/\text{L}$$

$\Rightarrow C_c = 36 \text{ g O}_2/\text{L} = 36 \text{ g cel.formadas/L}$  ; por lo tanto:

$$Y_{c/s} = \frac{C_c}{C_s} = \frac{36 \text{ g/L}}{24.1 \text{ g/L}} = 1.49 \text{ g/g}$$

$$* Y_{p/s} = \frac{\text{Masa de producto formado}}{\text{Masa de sustrato consumido a producto formado}}$$

- Masa de producto formado,  $C_p$ : Es equivalente a la mezcla de gases ( $\text{CO}_2 + \text{NH}_3$ ) producido según, la reacción estequiométrica:



$$24.1 \text{ g s} \times \frac{2 \ 092 \text{ g gas}}{1 \ 136 \text{ g s}} = 44.4 \text{ g gas/L}$$

$$Y_{p/c} = \frac{\text{Masa de producto formado}}{\text{Masa de nuevas células formadas}}$$

$$\Rightarrow Y_{p/c} = \frac{C_p}{C_c} = \frac{44.4 \text{ g/L}}{36 \text{ g/L}} = 1.23 \text{ g/g}$$

$\Rightarrow C_p = 44.4 \text{ g gas/L} = 44.4 \text{ g prod. formado/L}$  ; por lo tanto:

$$Y_{p/s} = \frac{C_p}{C_s} = \frac{44.4 \text{ g/L}}{24.1 \text{ g/L}} = 1.84 \text{ g/g}$$

- \*  $K_s$  : Constante de Monod (g/L)
- \*  $\mu_{max} = mumax$  : Velocidad de crecimiento específico máxima ( $h^{-1}$ )
- \*  $C_p^* = Cpstar$  : Concentración del producto a la cual cesa todo el metabolismo (g/L)
- \*  $D = \frac{v_o}{V}$  : Tasa de dilución (común a todos los biorreactores)
- \*  $k_d$  : Coeficiente de descomposición endógena ( $h^{-1}$ )

(8) Pruebas y corridas con el programa Polymath:

▪ **PRUEBA 1. Con parámetros para la fermentación de glucosa a etanol:**

$$C_p^* = Cpstar = 93 \text{ g/L}$$

$$Y_{c/s} = 1.49 \text{ g/g}$$

$$n = 0.50$$

$$Y_{p/s} = 1.84 \text{ g/g}$$

$$K_s = 1.7 \text{ g/L}$$

$$Y_{p/c} = 1.23 \text{ g/g}$$

$$\mu_{max} = mumax = 0.33 \frac{1}{h} \times 24 \frac{h}{d} = 8 \text{ d}^{-1}$$

$$k_d = 0.01 \frac{1}{h} \times 24 \frac{h}{d} = 0.24 \text{ d}^{-1}$$

$$m = 0.05 \frac{1}{h} \times 24 \frac{h}{d} = 1.2 \text{ d}^{-1}$$

Valores iniciales y finales:  $t(0) = 0$

$t(f) = 30 \text{ d}$

$C_c(0) = 0.46 \text{ g/L}$

$C_s(0) = 24.1 \text{ g/L}$

$C_p(0) = 0$

**Corrida 1.** Al ingresar la información al programa, se requiere ajustar,  $C_p^*$ ,  $\mu_{max}$ ,  $K_s$ ,  $k_d$ , con valores típicos de otros residuos.

▪ **PRUEBA 2. Con parámetros para aguas residuales de refinería de petróleo:**

$$C_p^* = Cpstar = 100 \text{ g/L}$$

$$Y_{c/s} = 1.49 \text{ g/g}$$

$$n = 0.50$$

$$Y_{p/s} = 1.84 \text{ g/g}$$

$$K_s = 0.115 \text{ g/L}$$

$$Y_{p/c} = 1.23 \text{ g/g}$$

$$\mu_{max} = mumax = 1.905 \text{ d}^{-1}$$

$$k_d = 0.0988 \text{ d}^{-1}$$

$$m = 1.2 \text{ d}^{-1}$$

Valores iniciales y finales:  $t(0) = 0$

$t(f) = 30 \text{ d}$

$C_c(0) = 0.46 \text{ g/L}$

$C_s(0) = 24.1 \text{ g/L}$

$C_p(0) = 0$

**Corrida 2.** El programa, requiere reajustar las gráficas con nuevos parámetros de,  $C_p^*$ ,  $\mu_{max}$ ,  $K_s$ ,  $k_d$ , eligiendo otro tipo de residuos.

- **PRUEBA 3.** Con parámetros para aguas **residuales domésticas**:

$$C_p^* = C_{pstar} = 100 \text{ g/L}$$

$$Y_{c/s} = 1.49 \text{ g/g}$$

$$n = 0.50$$

$$Y_{p/s} = 1.84 \text{ g/g}$$

$$K_s = 0.060 \text{ g/L}$$

$$Y_{p/c} = 1.23 \text{ g/g}$$

$$\mu_{max} = \mu_{max} = 5 \text{ d}^{-1}$$

$$k_d = 0.06 \text{ d}^{-1}$$

$$m = 1.2 \text{ d}^{-1}$$

Valores iniciales y finales:  $t(0) = 0$   $t(f) = 30 \text{ d}$

$$C_c(0) = 0.46 \text{ g/L}$$

$$C_s(0) = 24.1 \text{ g/L}$$

$$C_p(0) = 0$$

**Corrida 3.** El programa, requiere reajustar las gráficas con nuevos parámetros de,  $\mu_{max}$ ,  $K_s$ ,  $k_d$ , eligiendo otro tipo de residuos.

- **PRUEBA 4.** Con parámetros de efluentes de **una industria láctea en biodegradación aerobia**:

$$C_p^* = C_{pstar} = 100 \text{ g/L}$$

$$Y_{c/s} = 1.49 \text{ g/g}$$

$$n = 0.50$$

$$Y_{p/s} = 1.84 \text{ g/g}$$

$$K_s = 11.87 \text{ g/L}$$

$$Y_{p/c} = 1.23 \text{ g/g}$$

$$\mu_{max} = \mu_{max} = 6 \text{ d}^{-1}$$

$$k_d = 250.8 \text{ d}^{-1}$$

$$m = 1.2 \text{ d}^{-1}$$

Valores iniciales y finales:  $t(0) = 0$   $t(f) = 30 \text{ d}$

$$C_c(0) = 0.46 \text{ g/L}$$

$$C_s(0) = 24.1 \text{ g/L}$$

$$C_p(0) = 0$$

**Corrida 4.** El programa, requiere reajustar el coeficiente de descomposición endógena ( $k_a$ ) su valor de efluente es incompatible con los parámetros de las muestras en tratamiento de la materia orgánica de los residuos.

- **PRUEBA 5.** Con parámetros en la depuración de **aguas negras mediante lodos activos en períodos cortos:**

$$C_p^* = C_{pstar} = 100 \text{ g/L}$$

$$Y_{c/s} = 1.49 \text{ g/g}$$

$$n = 0.50$$

$$Y_{p/s} = 1.84 \text{ g/g}$$

$$K_s = 0.1 \text{ g/L}$$

$$Y_{p/c} = 1.23 \text{ g/g}$$

$$\mu_{max} = m_{umax} = 0.12 \text{ h}^{-1}$$

$$k_d = 0.003 \text{ h}^{-1}$$

$$m = 0.05 \text{ h}^{-1}$$

Valores iniciales y finales:  $t(0) = 0$   $t(f) = 50 \text{ h}$

$$C_c(0) = 0.46 \text{ g/L}$$

$$C_s(0) = 24.1 \text{ g/L}$$

$$C_p(0) = 0$$

**Corrida 5.** El programa responde con tendencia a mejorar los resultados con estos parámetros, compatibles con los parámetros de las muestras ( $Y_{c/s}$ ,  $Y_{p/s}$  y  $Y_{p/c}$ ) con períodos de prueba (horas) cortos de tratamiento.

- **PRUEBA 6.** Con parámetros en la depuración de **aguas negras mediante lodos**, compatibles con la **tasa de dilución (D)** de las muestras en tratamiento:

$$C_p^* = C_{pstar} = 100 \text{ g/L}$$

$$Y_{c/s} = 1.49 \text{ g/g}$$

$$n = 0.50$$

$$Y_{p/s} = 1.84 \text{ g/g}$$

$$K_s = 0.1 \text{ g/L}$$

$$Y_{p/c} = 1.23 \text{ g/g}$$

$$\mu_{max} = m_{umax} = 0.12 \text{ h}^{-1}$$

$$k_d = 0.003 \text{ h}^{-1}$$

$$m = 0.05 \text{ h}^{-1}$$

$$D = \frac{315 \text{ mL}}{2 \cdot 100 \text{ mL}} = 0.15$$

Valores iniciales y finales:  $t(0) = 0$   $t(f) = 50 \text{ h}$

$$C_c(0) = 0.46 \text{ g/L}$$

$$C_s(0) = 24.1 \text{ g/L}$$

$$C_p(0) = 0$$

**Corrida 6.** Se obtiene un mejor ajuste de los resultados en el programa al incluir la tasa de dilución  $D$ , y los parámetros  $K_s$ ,  $u_{max}$ ,  $m$ , y  $k_d$  de aguas negras, compatibles con los parámetros de las muestras ( $Y_{c/s}$ ,  $Y_{p/s}$  y  $Y_{p/c}$ ).

- **PRUEBA 7.** Es la prueba definitiva con el reajuste ideal de todos los parámetros de **aguas negras y la tasa D** a ser evaluados en el programa, su respuesta y resultados en el tratamiento de las muestras.

$$\begin{array}{ll}
 C_p^* = C_{pstar} = 100 \text{ g/L} & Y_{c/s} = 1.49 \text{ g/g} \\
 n = 0.50 & Y_{p/s} = 1.84 \text{ g/g} \\
 K_s = 0.1 \text{ g/L} & Y_{p/c} = 1.23 \text{ g/g} \\
 \mu_{max} = \mu_{max} = 0.12 \text{ h}^{-1} & k_d = 0.003 \text{ h}^{-1} \\
 m = 0.05 \text{ h}^{-1} & D = 0.15
 \end{array}$$

Parámetros para la conversión del sustrato (So):

$$-r_A = k \cdot C_{Ao}^2 (1 - X)(\theta_B - 53X) ; \quad \theta_B = \frac{C_{Bo}}{C_{Ao}}$$

$$C_{Ao} = C_{So} = 24.1 \frac{\text{g}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol So}}{1136 \text{ g}} = 0,0212 \text{ mol Ao/L}$$

$$C_{Bo} = 36 \text{ g O}_2/\text{L} \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{32 \text{ g O}_2} = 1.125 \text{ mol Bo/L} , \quad (B_o: \text{ Oxígeno consumido en la reacción, equivalente a las nuevas células formadas})$$

$$\theta_B = \frac{C_{Bo}}{C_{Ao}} = \frac{1,125}{0,0212} = 53,1 \quad , \quad k = 0,0105 \text{ h}^{-1}$$

Valores iniciales y finales:

$$\begin{array}{ll}
 t(0) = 0 & t(f) = 50 \text{ h} \\
 C_c(0) = 0.46 \text{ g/L} & C_s(0) = 24.1 \text{ g/L} \\
 C_p(0) = 0 & X(0) = 0
 \end{array}$$

**Corrida 7.** Al correr esta prueba en el programa con los parámetros reajustados, se obtiene óptimos resultados con un periodo de prueba de 50 horas en el tratamiento de las muestras dentro el biorreactor.

- Pasos de algoritmo de las ecuaciones en el programa Polymath:

Balance de masa:

$$\begin{array}{l}
 d(C_c)/d(t) = -D \cdot C_c + (r_g - r_d) \\
 d(C_s)/d(t) = D \cdot (C_{so} - C_s) - Y_{sc} \cdot r_g - m \cdot C_c \\
 d(C_p)/d(t) = -D \cdot C_p + Y_{pc} \cdot r_g \\
 d(X)/d(t) = -r_A/C_{Ao}
 \end{array}$$



Calculated values of DEQ variables

	Variable	Initial value	Minimal value	Maximal value	Final value
1	CA	0.0212	0.0133222	0.0212	0.0133222
2	CAo	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212
3	CB	1.12572	0.7081952	1.12572	0.7081952
4	Cc	0.46	0.0856408	0.46	0.0856408
5	Cp	0	0	0.2922739	0.1077317
6	Cpstar	100.	100.	100.	100.
7	Cs	24.1	23.84125	24.1	24.00464
8	Cso	24.1	24.1	24.1	24.1
9	D	0.15	0.15	0.15	0.15
10	k	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
11	kd	0.003	0.003	0.003	0.003
12	Ks	0.1	0.1	0.1	0.1
13	m	0.05	0.05	0.05	0.05
14	mumax	0.12	0.12	0.12	0.12
15	rA	-0.0002506	-0.0002506	-9.906E-05	-9.906E-05
16	rd	0.00138	0.0002569	0.00138	0.0002569
17	rg	0.0549719	0.0102287	0.0549719	0.0102287
18	rp	0.0676154	0.0125814	0.0676154	0.0125814
19	rsm	0.023	0.004282	0.023	0.004282
20	t	0	0	50.	50.
21	tetaB	53.1	53.1	53.1	53.1
22	X	0	0	0.3715956	0.3715956
23	Ypc	1.23	1.23	1.23	1.23
24	Ysc	0.67	0.67	0.67	0.67

Differential equations

1  $d(Cc)/d(t) = -D*Cc + (rg - rd)$

2  $d(Cs)/d(t) = D*(Cso - Cs) - Ysc*rg - m*Cc$

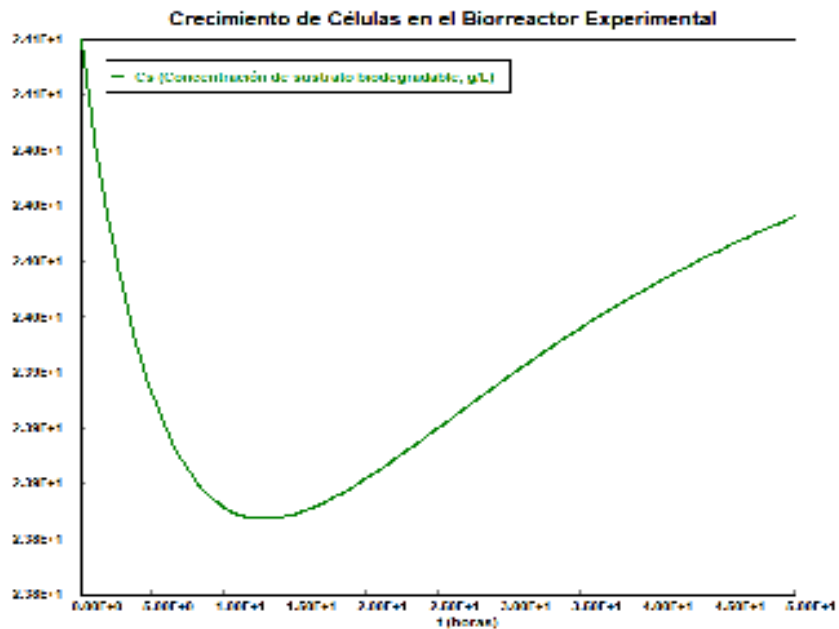
3  $d(Cp)/d(t) = -D*Cp + Ypc*rg$

4  $d(X)/d(t) = -rA/CAo$

Explicit equations

- 1  $\text{tetaB} = 53.1$
- 2  $\text{CAo} = 0.0212$
- 3  $\text{CB} = \text{CAo} * (\text{tetaB} - 53 * X)$
- 4  $\text{CA} = \text{CAo} * (1 - X)$
- 5  $k = 0.0105$
- 6  $rA = -k * \text{CA} * \text{CB}$
- 7  $Ks = 0.1$
- 8  $\text{mumax} = 0.12$
- 9  $m = 0.05$
- 10  $D = 0.15$
- 11  $\text{Cso} = 24.1$
- 12  $\text{Ysc} = 0.67$
- 13  $\text{rsm} = m * \text{Cc}$
- 14  $\text{Ypc} = 1.23$
- 15  $\text{Cpstar} = 100$
- 16  $\text{rg} = ((1 - (\text{Cp}/\text{Cpstar}))^{0.50}) * \text{mumax} * (\text{Cs}/(\text{Ks} + \text{Cs})) * \text{Cc}$
- 17  $\text{rp} = \text{Ypc} * \text{rg}$
- 18  $\text{kd} = 0.003$
- 19  $\text{rd} = \text{kd} * \text{Cc}$

- Cinética de crecimiento celular en el biorreactor



**Figura 9.** Cambio de concentración del sustrato del material biodegradable

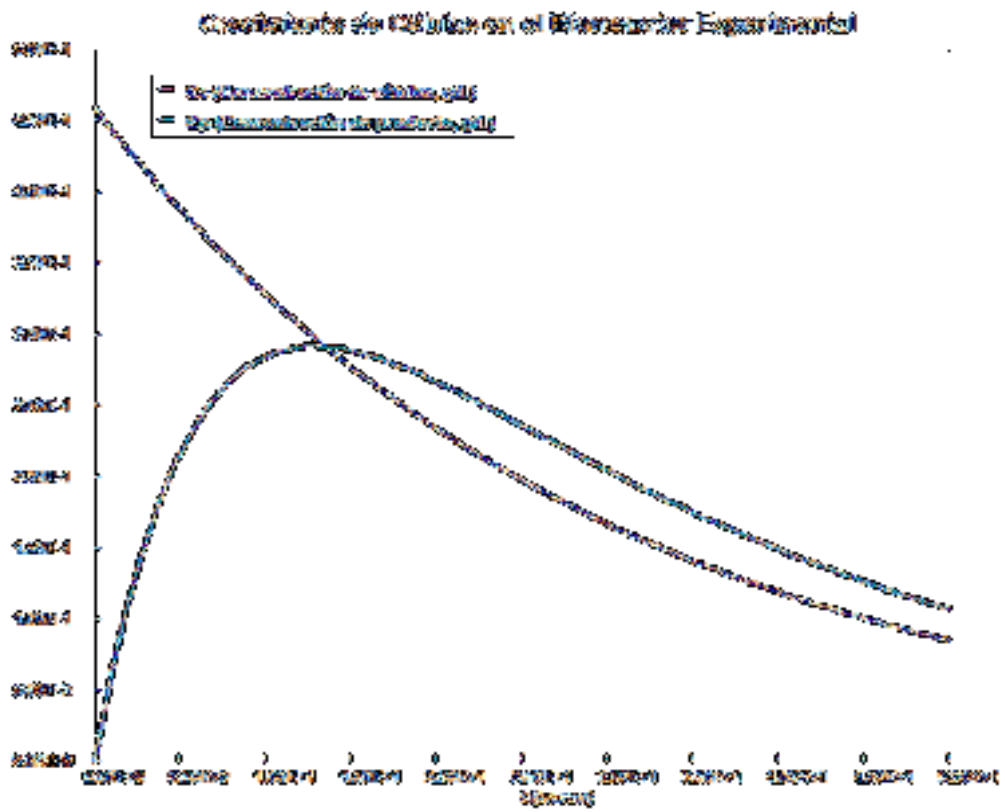


Figura 10. Cambio en la concentración de células y formación de producto

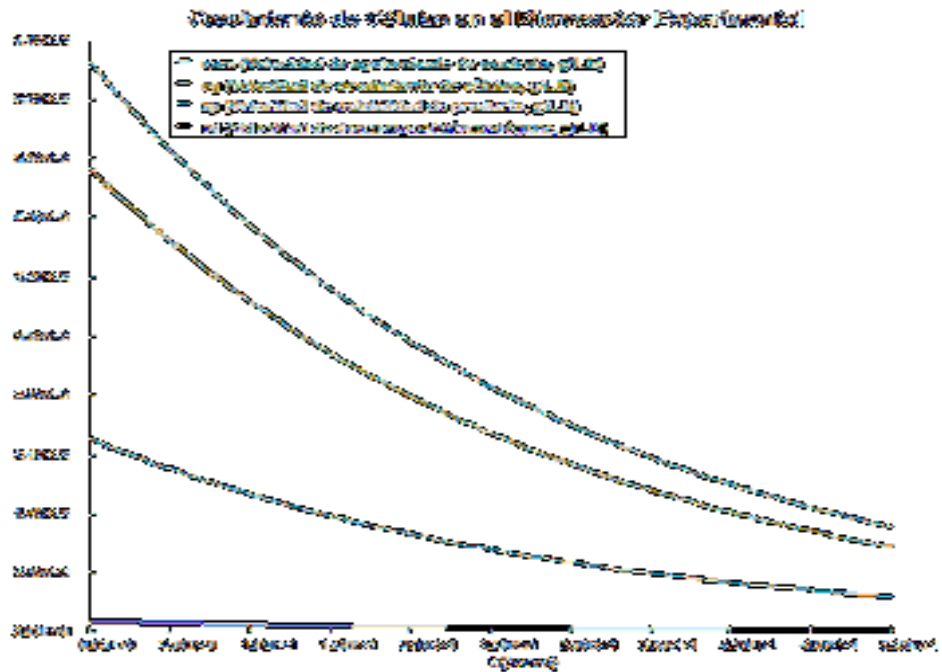
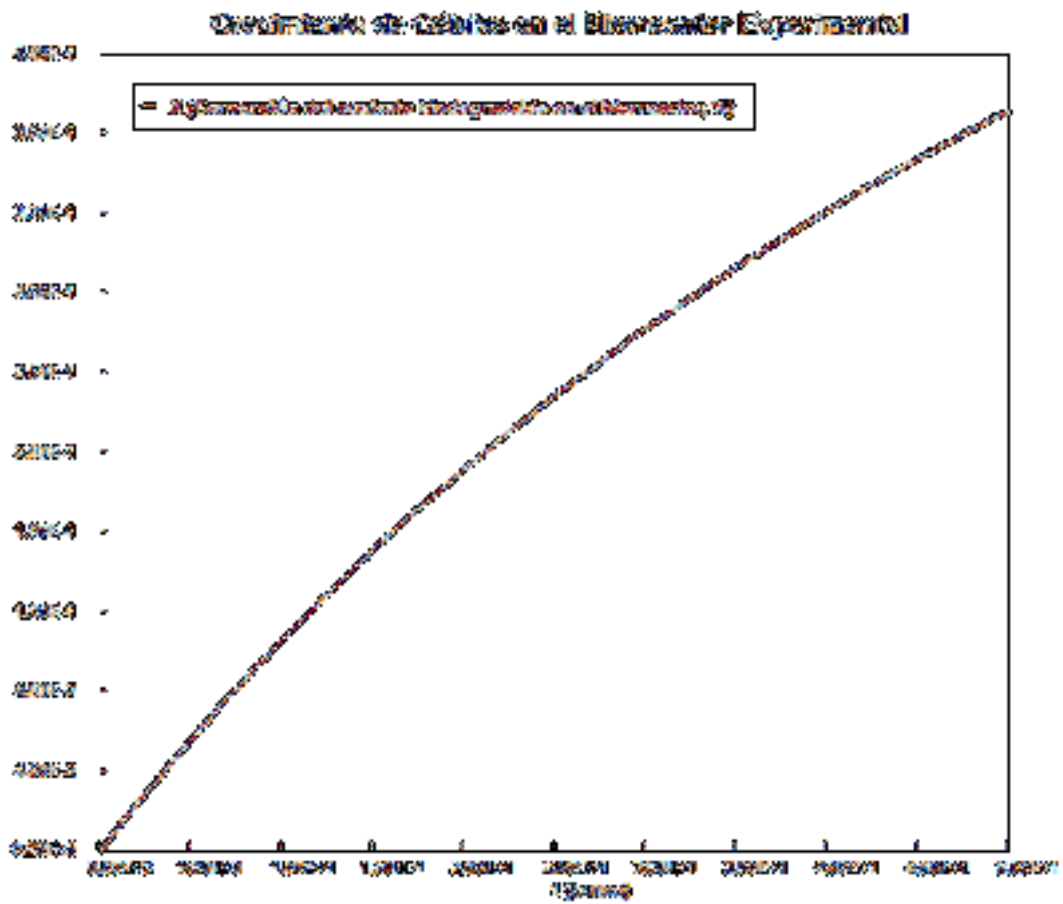


Figura 11. Velocidades de: Agotamiento del sustrato, decaimiento celular, estabilidad del producto y descomposición endógena



*Figura 12. Conversión de materia orgánica biodegradable en el biorreactor*



**REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL**  
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN DE DOCUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

<b>1. Información del Autor</b>			
<i>Eusebio Lara Saúl Marco</i>		<i>32854604</i>	<i>smel1806@hotmail.com</i>
Apellidos y Nombres		DNI	Correo Electrónico
<b>2. Tipo de Documento de Investigación</b>			
<input checked="" type="checkbox"/> Tesis	<input type="checkbox"/> Trabajo de Suficiencia Profesional	<input type="checkbox"/> Trabajo Académico	<input type="checkbox"/> Trabajo de Investigación
<b>3. Grado Académico o Título Profesional <sup>1</sup></b>			
<input type="checkbox"/> Bachiller	<input type="checkbox"/> Título Profesional	<input type="checkbox"/> Título Segunda Especialidad	<input type="checkbox"/> Maestría <input checked="" type="checkbox"/> Doctorado
<b>4. Título del Documento de Investigación</b>			
<i>“Aplicación de software en diseño y operación de biorreactor para tratamiento aeróbico de materia Orgánica de residuos sólidos urbano”</i>			
<b>5. Programa Académico</b>			
<i>Doctorado en Ingeniería Química</i>			
<b>6. Tipo de Acceso al Documento</b>			
<input checked="" type="checkbox"/> Abierto o Público <sup>2</sup> ( <i>info:europa/semantics/openAccess</i> )	<input type="checkbox"/> Acceso restringido <sup>4</sup> ( <i>info:europa/semantics/restrictedAccess</i> ) <sup>(*)</sup>		
(*) En caso de restringido sustentar motivo			

**A. Originalidad del Archivo Digital**

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado Evaluador y forma parte del proceso que conduce a obtener el grado académico o título profesional.

**B. Otorgamiento de una licencia CREATIVE COMMONS <sup>5</sup>**

El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional Digital, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento. <sup>6</sup>

Lugar	Día	Mes	Año
Chimbote	04	de julio	2025



Firma

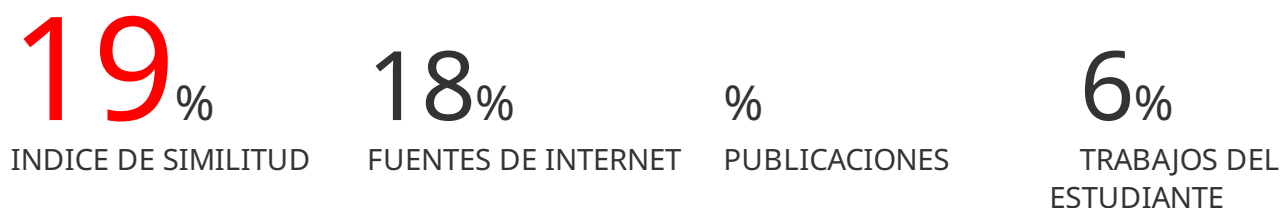
**Importante**

- Según Resolución de Consejo Directivo N° 033-2016-SUNEDU-CD, Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar Grados Académicos y Títulos Profesionales, Art. 8, Inciso 8.2
- Ley N° 30035: Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y D.S. 006-2015-PCM
- Si el autor elige el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad San Pedro una licencia no exclusiva, para que se pueda hacer arreglos de forma en la obra y difundir en el Repositorio Institucional Digital. Respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.
- En caso de que el autor elija la segunda opción, únicamente se publicará los datos del autor y resumen de la obra, de acuerdo a la directiva N° 001-2016-CORCYTEC-DEGC (Numerales 3.2 y 9.7) que norma el funcionamiento del Repositorio Nacional Digital
- Las licencias Creative Commons (CC) es una organización internacional sin fines de lucro que pone a disposición de los autores un conjunto de licencias flexibles y de herramientas tecnológicas que facilitan la difusión de información, recursos educativos, obras artísticas y científicas, entre otras. Estas licencias también garantizan que el autor obtenga el crédito por su obra.
- Según el inciso 12.2, del artículo 12º del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales-RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Repositorio Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".

**Nota:** - En caso de falsedad en los datos, se procederá de acuerdo a ley 27444, art. 32, num. 32.3).

# Aplicación de software en diseño y operación de biorreactor para tratamiento aeróbico de materia orgánica de residuos sólidos urbano

## INFORME DE ORIGINALIDAD



## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://dspace.unitru.edu.pe">dspace.unitru.edu.pe</a> Fuente de Internet	4%
2	<a href="https://cidta.usal.es">cidta.usal.es</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="https://coorsindelca.tripod.com">coorsindelca.tripod.com</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="https://doku.pub">doku.pub</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://idoc.pub">idoc.pub</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://docslide.us">docslide.us</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://oa.upm.es">oa.upm.es</a> Fuente de Internet	1%

9	<a href="https://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %
10	<a href="http://www.engin.umich.edu">www.engin.umich.edu</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://cybertesis.uni.edu.pe">cybertesis.uni.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
12	Submitted to CONACYT Trabajo del estudiante	<1 %
13	<a href="http://oab.ambientebogota.gov.co">oab.ambientebogota.gov.co</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://dx.doi.org">dx.doi.org</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://mdc.ulpgc.es">mdc.ulpgc.es</a> Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to University College London Trabajo del estudiante	<1 %
17	<a href="http://slidetodoc.com">slidetodoc.com</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://bibdigital.epn.edu.ec">bibdigital.epn.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec">repositorio.ucsg.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://www.cecodes.net">www.cecodes.net</a> Fuente de Internet	<1 %

21	<a href="http://vdocumento.com">vdocumento.com</a> Fuente de Internet	<1 %
22	<a href="http://u6194.wordpress.com">u6194.wordpress.com</a> Fuente de Internet	<1 %
23	<a href="http://kupdf.net">kupdf.net</a> Fuente de Internet	<1 %
24	<a href="http://posgrado-mcia.umich.mx">posgrado-mcia.umich.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
25	<a href="http://www.bvsde.paho.org">www.bvsde.paho.org</a> Fuente de Internet	<1 %
26	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Fuente de Internet	<1 %
27	<a href="http://repositorio.usanpedro.edu.pe">repositorio.usanpedro.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
28	<a href="http://issuu.com">issuu.com</a> Fuente de Internet	<1 %
29	Submitted to Universidad Nacional de Colombia Trabajo del estudiante	<1 %
30	<a href="http://kipdf.com">kipdf.com</a> Fuente de Internet	<1 %
31	<a href="http://pdfcookie.com">pdfcookie.com</a> Fuente de Internet	<1 %

32	Submitted to University of Newcastle upon Tyne Trabajo del estudiante	<1 %
33	hydroproweb.zh.ch Fuente de Internet	<1 %
34	repositorio.uax.es Fuente de Internet	<1 %
35	uvadoc.uva.es Fuente de Internet	<1 %
36	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
37	repositorio.ucam.edu Fuente de Internet	<1 %
38	stutzartists.org Fuente de Internet	<1 %
39	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1 %
40	api-saber.ucab.edu.ve Fuente de Internet	<1 %
41	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
42	www.fceqyn.unam.edu.ar Fuente de Internet	<1 %

43	<a href="http://rzserv1-sud.fhnon.de">rzserv1-sud.fhnon.de</a> Fuente de Internet	<1 %
44	<a href="http://worldwidescience.org">worldwidescience.org</a> Fuente de Internet	<1 %
45	<a href="http://dspace.uclv.edu.cu">dspace.uclv.edu.cu</a> Fuente de Internet	<1 %
46	<a href="http://ri.ues.edu.sv">ri.ues.edu.sv</a> Fuente de Internet	<1 %
47	Submitted to University of Leeds Trabajo del estudiante	<1 %
48	<a href="http://vdocuments.mx">vdocuments.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
49	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	<1 %
50	Submitted to Curtin University of Technology Trabajo del estudiante	<1 %
51	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Fuente de Internet	<1 %
52	<a href="http://e-archivo.uc3m.es">e-archivo.uc3m.es</a> Fuente de Internet	<1 %
53	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Ecuador - PUCE Trabajo del estudiante	<1 %
54	<a href="http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080">repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080</a>	

Fuente de Internet

<1 %

55

[rodin.uca.es](http://rodin.uca.es)

Fuente de Internet

<1 %

56

[vsip.info](http://vsip.info)

Fuente de Internet

<1 %

57

Submitted to Universidad Católica de Santa María

Trabajo del estudiante

<1 %

58

[dspace.ups.edu.ec](http://dspace.ups.edu.ec)

Fuente de Internet

<1 %

59

[es.khanacademy.org](http://es.khanacademy.org)

Fuente de Internet

<1 %

60

[fdocuments.es](http://fdocuments.es)

Fuente de Internet

<1 %

61

[repositorio.ucv.edu.pe](http://repositorio.ucv.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

62

[www.jeb.co.in](http://www.jeb.co.in)

Fuente de Internet

<1 %

63

[www.webcolegios.com](http://www.webcolegios.com)

Fuente de Internet

<1 %

64

Submitted to Florida State University

Trabajo del estudiante

<1 %

65

[futur.upc.edu](http://futur.upc.edu)

Fuente de Internet

<1 %

66

Submitted to Universidad Rey Juan Carlos

Trabajo del estudiante

<1 %

67

its-wwwtest.carestreamhealth.com

Fuente de Internet

<1 %

68

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

69

repositorio.utb.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

70

Submitted to Hellenic Open University

Trabajo del estudiante

<1 %

71

austinpublishinggroup.com

Fuente de Internet

<1 %

72

www.ptolomeo.unam.mx:8080

Fuente de Internet

<1 %

73

www.sabiia.cnptia.embrapa.br

Fuente de Internet

<1 %

74

Submitted to Universidad Distrital FJDC

Trabajo del estudiante

<1 %

75

www.clubensayos.com

Fuente de Internet

<1 %

76

repositorio.utn.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

77	<a href="https://researchers.unab.cl">researchers.unab.cl</a> Fuente de Internet	<1 %
78	<a href="https://textbatmart.com">textbatmart.com</a> Fuente de Internet	<1 %
79	<a href="https://www.scielo.cl">www.scielo.cl</a> Fuente de Internet	<1 %
80	<a href="https://2-up.tistory.com">2-up.tistory.com</a> Fuente de Internet	<1 %
81	<a href="https://bdigital.unal.edu.co">bdigital.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
82	<a href="https://cdn.clima.com">cdn.clima.com</a> Fuente de Internet	<1 %
83	<a href="https://covid19.colorado.gov">covid19.colorado.gov</a> Fuente de Internet	<1 %
84	<a href="https://es.slideshare.net">es.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1 %
85	<a href="https://moam.info">moam.info</a> Fuente de Internet	<1 %
86	<a href="https://pt.scribd.com">pt.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %
87	<a href="https://repositorio.fedepalma.org">repositorio.fedepalma.org</a> Fuente de Internet	<1 %
88	<a href="https://repositorio.uandina.edu.pe">repositorio.uandina.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %

89

repositorio.unp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

90

riunet.upv.es

Fuente de Internet

<1 %

91

tangara.uis.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

92

www.goconqr.com

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 10 words

Excluir bibliografía

Activo