

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE SISTEMAS DE BIODEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA A ESCALA PILOTO PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS CON BIFENILOS POLICLORADOS (PCB'S)

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

MISHEL MELISA IZQUIERDO CONDOY
mishel.izquierdoc@gmail.com

ELIANA LIZETH PEÑA PONTÓN
eli.penap@gmail.com

DIRECTOR: ING. ANDRÉS GABRIEL CHICO PROAÑO, MSc.
andres.chico@epn.edu.ec

Quito, agosto 2016

© Escuela Politécnica Nacional (2016)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Nosotros, Eliana Lizeth Peña Pontón y Mishel Melisa Izquierdo Condoy declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Eliana Lizeth Peña Pontón

Mishel Melisa Izquierdo Condoy

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por, Mishel Melisa Izquierdo Condoy y Eliana Lizeth Peña Pontón bajo mi supervisión.

Ing. Andrés Gabriel Chico Proaño, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DEDICATORIA

A Dios,
la evidencia de lo invisible.

AGRADECIMIENTO

A **Luci Montenegro**, por habernos apoyado en el inicio y desarrollo de esta investigación. A **Andrés Chico**, por su ayuda y guía en la culminación de este proyecto.

A mis padres, **Orlando y Luci**, por su apoyo, confianza, amor, fe y motivación incondicional en el desarrollo de este proyecto y durante toda mi vida, por ser el tesoro más valioso.

A mi **papito querido**, por toda la ternura y el amor más grande.

A mis hermanos, **Santi, Juanse y Nathy**, por acompañarme siempre, los llevo en mi corazón cada día. Porque siempre estaremos juntos, por más duros que sean los vientos.

A mi **Cris**, por ser la sonrisa en mi rostro, por llenar mi corazón y mi vida de amor, por todo lo que viene.

A mi mejor amiga, por todas las risas, los momentos difíciles y tristes, por los éxitos, por haber cumplido un sueño más juntas, gracias por tu amistad incondicional **Eli**.

A todos los buenos compañeros, profesores y amigos, por haber formado parte de una etapa de mi vida, *Mishel*.

A mis padres, **Colón y Olga** por el apoyo y amor incondicional, sus consejos, su guía en todas las etapas de mi vida. Gracias por caminar conmigo de la mano en todo momento.

A mis hermanos, **Cris y Willy** que aún a la distancia, siempre estuvieron pendientes y preocupados por mí, su ejemplo es mi mayor motivación. A mi ñaña, **Gigi** gracias por compartir nuestros días juntas y enseñarme a ser mejor hermana. Ñaños, los quiero mucho.

A **Mishel**, mi compañera de batallas, mi mejor amiga, con quien trabajamos arduamente para que este proyecto culmine satisfactoriamente.

A mi amado esposo **Frank**, por tu ayuda, tus palabras de aliento en momentos de debilidad, por aquellos días que perdí la fe y estuviste junto a mí para devolverme las fuerzas, por ser mi compañero incondicional y sacarme una sonrisa por más triste que parezca el día, gracias por llenar mi vida de felicidad con tu amor. Siempre recuerda que te amo.

Mis palabras no bastan para decirles cuanto les agradezco por formar parte de mí y por todo lo que me han brindado, *Elú*.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	xvii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Aceites dieléctricos y bifenilos policlorados (PCB's)	1
1.1.1. Aceites dieléctricos	1
1.1.2. Bifenilos policlorados PCB's	2
1.1.2.1. Propiedades físicas de los PCB's	3
1.1.2.2. Propiedades químicas de los PCB's	4
1.1.2.3. Usos de los PCB's	6
1.1.3. Impacto ambiental	7
1.1.4. Consecuencias a la salud humana	9
1.2. Procesos tecnológicos para la destrucción de aceites dieléctricos contaminados con PCB's.	10
1.2.1. Procesos biológicos	11
1.2.2. Procesos físicos y químicos	16
1.2.2.1. Incineración de PCB's	16
1.2.2.2. Decloración química de PCB's	17
1.2.2.3. Oxidación súper crítica de PCB's	17
1.2.3. Diseño de biorreactores	18
1.2.3.1. Criterios iniciales de diseño de un biorreactor	18
1.2.3.2. Criterios de escalado	19
1.2.4. Clasificación de biorreactores	19
2. PARTE EXPERIMENTAL	23
2.1. Caracterización del aceite dieléctrico contaminado con PCB's.	23
2.1.1. Muestreo del aceite dieléctrico	23
2.1.2. Determinación de la concentración de las muestras iniciales de los aceites dieléctricos	23
2.1.3. Análisis de las muestras de aceites iniciales por cromatografía de gases	24
2.1.4. Determinación de las propiedades físicas iniciales de las muestras de aceites dieléctricos	25
2.1.4.1. Densidad gravimétrica y peso específico de las concentraciones de las muestras iniciales de aceites dieléctricos	26
2.1.4.2. Potencial hidrógeno de las concentraciones de las muestras de aceites dieléctricos iniciales	27

2.2.	Diseño del proceso de biodegradación aerobia y anaerobia para la reducción de la concentración de PCB's	28
2.2.1.	Caracterización de las bacterias biodegradadoras aerobias y anaerobias	28
2.2.2.	Activación bacteriana y preparación del pre inóculo bacteriano	29
2.2.3.	Curva de crecimiento bacteriano	32
2.2.4.	Reproducción de microorganismos	34
2.2.5.	Biodegradación de aceite dieléctrico en reactores aerobios	35
2.2.6.	Biodegradación de aceite dieléctrico en reactores anaerobios	37
2.2.7.	Determinación de las concentraciones de las muestras intermedias y finales mediante cromatografía de gases	41
2.2.7.1.	Preparación y análisis de las muestras	43
2.2.7.2.	Análisis de datos obtenidos por cromatografía de gases	44
2.2.8.	Diseño del reactor en el proceso de biodegradación de aceite dieléctrico con PCB's	44
2.2.8.1.	Dimensiones del reactor agitado	44
2.2.8.2.	Potencia del agitador	46
2.2.8.3.	Densidad de la mezcla	47
2.2.8.4.	Viscosidad de la mezcla	47
2.2.8.5.	Temperaturas de operación y diseño	48
2.2.8.6.	Presiones de operación y diseño	50
2.3.	Optimización de las condiciones de degradación aerobia y anaerobia de aceites dieléctricos contaminados con PCB's en un período de 15 y 20 semanas	51
2.4.	Evaluación económica de los sistemas de biodegradación aerobia y anaerobia	52
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
3.1.	Caracterización del aceite dieléctrico contaminado con PCB's	54
3.1.1.	Determinación de la concentración de las muestras iniciales de aceites dieléctricos por cromatografía de gases	54
3.1.2.	Determinación de las propiedades físicas iniciales de las muestras de aceites dieléctricos	57
3.1.2.1.	Análisis de densidad gravimétrica y peso específico de las muestras de aceites iniciales	57
3.1.2.2.	Análisis de potencial hidrógeno de las muestras de aceites iniciales	58
3.2.	Diseño del proceso de biodegradación aerobia y anaerobia para la reducción de la concentración de PCB's	59
3.2.1.	Caracterización de las bacterias biodegradadoras aerobias y anaerobias	59
3.2.2.	Determinación de las concentraciones de las muestras	

intermedias mediante cromatografía de gases	64
3.2.2.1. Curva de calibración para cromatografía de gases	64
3.2.2.2. Análisis de la descomposición de las muestras intermedias y finales de los biorreactores aerobios y anaerobios	66
3.2.2.3. Tablas de resultados de la disminución en las concentraciones de PCB's en los sistemas de degradación aerobio y anaerobio	75
3.2.2.4. Análisis de gráficos del proceso de biodegradación aerobia y anaerobia en cada sistema	81
3.2.3. Diseño del biorreactor con mayor porcentaje de biodegradación de aceite dieléctrico con PCB's	86
3.2.3.1. Dimensiones del reactor agitador	86
3.2.3.2. Potencia del Agitador	87
3.2.3.3. Temperaturas de operación y diseño	88
3.2.3.4. Presiones de operación y diseño	89
3.2.3.5. Diseño de tanques para la biodegradación de aceite dieléctrico con PCB's	89
3.3. Mejores condiciones para la degradación aerobia y anaerobia de aceites dieléctricos contaminados con PCB's en un período de 15 y 20 semanas	94
3.3.1. Análisis de la reducción de PCB's en la biodegradación aerobia	94
3.3.2. Análisis de la reducción de PCB's en la biodegradación anaerobia	95
3.3.3. Comparación entre el mejor sistema aerobio y anaerobio	97
3.4. Evaluación económica de los sistemas de biodegradación aerobia y anaerobia.	98
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
4.1. Conclusiones	105
4.2. Recomendaciones	106
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	114

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Diferentes nomenclaturas para PCB's	6
Tabla 2.1.	Componentes utilizados en la preparación del pre inóculo bacteriano aerobio	30
Tabla 2.2.	Componentes utilizados en la preparación del pre inóculo bacteriano anaerobio	30
Tabla 2.3.	Condiciones de estabilización de los pre inóculos aerobio y anaerobio	31
Tabla 2.4.	Activación del inóculo bacteriano aerobio y anaerobio	34
Tabla 2.5.	Condiciones de masificación de bacterias en los reactores de biodegradación aerobia a temperatura ambiente (T=22 ± 2 °C)	36
Tabla 2.6.	Componentes empleados en los biorreactores anaerobios	39
Tabla 2.7.	Condiciones de masificación de bacterias en los reactores de biodegradación anaerobia a temperatura ambiente (T=22 ± 2 °C)	40
Tabla 2.8.	Condiciones de operación del cromatógrafo de gases de acuerdo a la norma ASTM D 4059-00	41
Tabla 2.9.	Condiciones de operación del cromatógrafo de gases de acuerdo al método desarrollado a partir de la norma ASTM D 4059-00	42
Tabla 2.10.	Comparación entre las condiciones de los sistemas aerobios	51
Tabla 2.11.	Comparación entre las condiciones de los sistemas anaerobios	51
Tabla 3.1.	Concentraciones del congénere 1254 presente en las muestras iniciales de aceites dieléctricos obtenidas por EEQ S.A. y las analizadas por el MEER	54
Tabla 3.2.	Tiempo de retención de los estándares de PCB's del aceite de 702 y 1 918 ppm respecto al tipo de Aroclor 1254	57

Tabla 3.3.	Densidades gravimétricas y pesos específicos de las muestras iniciales de aceites dieléctricos de 702 y 1 918 ppm	58
Tabla 3.4.	Resultados de aceites dieléctricos de 702 y 1 918 ppm en ensayos de pH	59
Tabla 3.5.	Recuento bacteriano aerobio para la determinación de #celulas/mL de solución	60
Tabla 3.6.	Recuento bacteriano anaerobio para la determinación de #celulas/mL de solución	60
Tabla 3.7.	Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor aerobio 1	76
Tabla 3.8.	Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor aerobio 2	76
Tabla 3.9.	Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor aerobio 3	77
Tabla 3.10.	Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor anaerobio 1	78
Tabla 3.11.	Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor anaerobio 2	78
Tabla 3.12.	Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor anaerobio 3	79
Tabla 3.13.	Porcentajes de descontaminación de PCB's en las muestras iniciales y finales de los sistemas de biodegradación aerobio y anaerobio	80
Tabla 3.14.	Características y parámetros considerados para el diseño del reactor agitado	87
Tabla 3.15.	Temperaturas evaluadas a lo largo del proceso de biodegradación aerobia y anaerobia	88
Tabla 3.16.	Características de los reactores a escala de laboratorio y a escala piloto, con sus respectivos criterios de cálculo y escalado	90
Tabla 3.17.	Comparación de resultados de remoción de los biorreactores aerobios	94
Tabla 3.18.	Comparación de resultados de remoción de los biorreactores anaerobios	95

Tabla 3.19.	Mejor sistema de biodegradación de PCB's	98
Tabla 3.20.	Costo de equipos y maquinaria	100
Tabla 3.21.	Activos del proyecto	100
Tabla 3.22.	Inversión total	100
Tabla 3.23.	Materiales directos	101
Tabla 3.24.	Materiales indirectos	101
Tabla 3.25.	Nómina laboral	102
Tabla 3.26.	Depreciación de los activos	102
Tabla 3.27.	Consumo energético de los equipos	102
Tabla 3.28.	Suministros del proyecto	103
Tabla 3.29.	Costos seguros	103
Tabla 3.30.	Costo unitario de degradación	103
Tabla AI. 1.	Datos de las variables tomadas en laboratorio para determinar la densidad del aceite dieléctrico con mayor concentración	116
Tabla AI. 2.	Datos de las variables tomadas en laboratorio para determinar la densidad del aceite dieléctrico con menor concentración	116
Tabla AVII.1.	Datos obtenidos para la curva de calibración del aceite con concentración 700 ppm	160
Tabla AVII.2.	Parámetros obtenidos para la curva de calibración del aceite con concentración 700 ppm	161
Tabla AVII.3.	Datos obtenidos para la curva de calibración del aceite con concentración de 1 918 ppm	161
Tabla AVII.4.	Parámetros obtenidos para la curva de calibración del aceite con concentración 2 000 ppm	162
Tabla AIX.1.	Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1	171
Tabla AIX.2.	Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2	180
Tabla AIX.3.	Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3	190

Tabla AIX.4.	Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1	200
Tabla AIX.5.	Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2	213
Tabla AIX.6.	Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3	225

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Estructuras moleculares de los aceites dieléctricos	1
Figura 1.2.	Estructura molecular del compuesto bifenilo policlorado (PCB)	3
Figura 1.3.	Posibles orientaciones de los átomo de cloro en la molécula de (PCB)	3
Figura 1.4.	Reacción de cloración del bifenilo	5
Figura 1.5.	Proceso de biodegradación aerobio de PCB's	13
Figura 1.6.	Proceso de biodegradación anaerobia de PCB's	15
Figura 1.7.	Esquema del tipo de reactor aerobio a ser empleado en la biodegradación	21
Figura 1.8.	Esquema del funcionamiento (movimiento de flujo dentro del tanque) del reactor anaerobio a ser utilizado en la biodegradación	22
Figura 2.1.	Activación de cepa bacteriana empleada en la biodegradación aerobia	31
Figura 2.2.	Esquema del proceso de la puesta en marcha del sistema de biodegradación aerobia.	35
Figura 2.3.	Esquema de la puesta en marcha del reactor aerobio	37
Figura 2.4.	Esquema del proceso a la puesta en marcha del sistema de biodegradación anaerobia	38
Figura 2.5.	Esquema de la puesta en marcha de los reactores anaerobios	40
Figura 2.6.	Medidas de un agitador de turbina	45
Figura 2.7.	Número de Reynolds con relación al número de potencia	48
Figura 3.1.	Cromatogramas reportados por los laboratorios del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) de la muestra de aceite contaminado	

	con PCB's con concentración de a) 702 ppm y b) 1 918 ppm	56
Figura 3.2.	Curva de crecimiento bacteriano [# células/mL] de pre inóculo aerobio respecto al tiempo	61
Figura 3.3.	Curva de crecimiento bacteriano [# células/mL] de pre inóculo anaerobio respecto al tiempo	62
Figura 3.4.	Curva de calibración para el proceso de biodegradación aerobio	65
Figura 3.5.	Curva de calibración para el proceso de biodegradación anaerobio	65
Figura 3.6.	a) Cromatograma de la degradación del aceite dieléctrico correspondiente al reactor aerobio 1 a la semana 3, con su paralelo b)	67
Figura 3.7.	a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor aerobio 1	69
Figura 3.8.	a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor aerobio 2	70
Figura 3.9.	a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor aerobio 3	71
Figura 3.10.	a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor anaerobio 1	72
Figura 3.11.	a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor anaerobio 2	73
Figura 3.12.	a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor anaerobio 3	74
Figura 3.13.	Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor aerobio 1	81
Figura 3.14.	Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor aerobio 2	82

Figura 3.15.	Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor aerobio 3	83
Figura 3.16.	Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor anaerobio 1	84
Figura 3.17.	Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor anaerobio 2	85
Figura 3.18.	Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor anaerobio 3	86
Figura 3.19.	Diagrama PFD del sistema de biodegradación aerobia	91
Figura 3.20.	Diagrama PFD de los reactores en la biodegradación anaerobia	92
Figura 3.21.	Porcentaje de remoción de contaminantes de PCB's de los sistemas de degradación de los biorreactores aerobios y anaerobios	97
Figura AII.1.	Hoja de especificación de las bacterias empleadas en la biodegradación aerobia y anaerobia	118
Figura AVI.1.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 3	126
Figura AVI.2.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 3 paralelo	126
Figura AVI.3.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 6	127
Figura AVI.4.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 6 paralelo	127
Figura AVI.5.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 9	128
Figura AVI.6.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 9 paralelo	128
Figura AVI.7.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 12	129
Figura AVI.8.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 12 paralelo	129
Figura AVI.9.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 15	130
Figura AVI.10.	Cromatograma reactor aerobio 1, semana 15 paralelo	130
Figura AVI.11.	Cromatograma reactor aerobio 2, semana 3	131
Figura AVI.12.	Cromatograma reactor aerobio 2, semana 3 paralelo	131
Figura AVI.13.	Cromatograma reactor aerobio 2, semana 6	132

Figura AVI.14. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 6 paralelo	132
Figura AVI.15. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 9	133
Figura AVI.16. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 9 paralelo	133
Figura AVI.17. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 12	134
Figura AVI.18. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 12 paralelo	134
Figura AVI.19. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 15	135
Figura AVI.20. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 15 paralelo	135
Figura AVI.21. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 3	136
Figura AVI.22. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 3 paralelo	136
Figura AVI.23. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 6	137
Figura AVI.24. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 6 paralelo	137
Figura AVI.25. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 9	138
Figura AVI.26. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 9 paralelo	138
Figura AVI.27. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 12	139
Figura AVI.28. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 12 paralelo	139
Figura AVI.29. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 15	140
Figura AVI.30. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 15 paralelo	140
Figura AVI.31. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 3	141
Figura AVI.32. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 3 paralelo	141
Figura AVI.33. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 6	142
Figura AVI.34. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 6 paralelo	142
Figura AVI.35. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 9	143
Figura AVI.36. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 9 paralelo	143
Figura AVI.37. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 12	144
Figura AVI.38. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 12 paralelo	144

Figura AVI.39. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 15	145
Figura AVI.40. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 15 paralelo	145
Figura AVI.41. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 20	146
Figura AVI.42. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 20 paralelo	146
Figura AVI.43. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 3	147
Figura AVI.44. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 3 paralelo	147
Figura AVI.45. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 6	148
Figura AVI.46. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 6 paralelo	148
Figura AVI.47. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 9	149
Figura AVI.48. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 9 paralelo	149
Figura AVI.49. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 12	150
Figura AVI.50. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 12 paralelo	150
Figura AVI.51. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 15	151
Figura AVI.52. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 15 paralelo	151
Figura AVI.53. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 20	152
Figura AVI.54. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 20 paralelo	152
Figura AVI.55. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 3	153
Figura AVI.56. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 3 paralelo	153
Figura AVI.57. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 6	154
Figura AVI.58. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 6 paralelo	154
Figura AVI.59. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 9	155
Figura AVI.60. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 9 paralelo	155
Figura AVI.61. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 12	156
Figura AVI.62. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 12 paralelo	156
Figura AVI.63. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 15	157

Figura AVI.64. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 15 paralelo	157
Figura AVI.65. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 20	158
Figura AVI.66. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 20 paralelo	158
Figura AXII.1. Espacios recomendados para plantas químicas	247

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Cálculos para determinar la densidad gravimétrica y peso específico de las muestras de aceites dieléctricos iniciales	115
ANEXO II Catálogo de bacterias comerciales B350 de AWT S.A.	118
ANEXO III Cálculos para la caracterización de las bacterias degradadoras aerobias y anaerobias	119
ANEXO IV Cálculos realizados para obtener las constantes cinéticas de crecimiento de las bacterias	119
ANEXO V Cálculos realizados para obtener las constantes cinéticas de crecimiento de las bacterias	121
ANEXO VI Cromatogramas de muestras intermedias de los biorreactores aerobios y anaerobios con sus paralelas	126
ANEXO VII Cálculos de las concentraciones obtenidas para los reactores aerobios y anaerobios a partir de los cromatogramas	159
ANEXO VIII Diseño de los tanques de los reactores de biodegradación de aceite dieléctrico con PCB's	163
ANEXO IX Tablas de pH y temperatura de los biorreactores aerobios y anaerobios	171
ANEXO X Balance de masa de los reactores aerobios y anaerobios	239
ANEXO XI Hoja de especificaciones del tanque para el proceso de biodegradación	245
ANEXO XII Cálculos y criterios empleados en la evaluación económica de los sistemas de biodegradación	246

RESUMEN

La producción industrial de bifenilos policlorados o PCB's comenzó alrededor del año 1930, al ser sustancias muy estables, fueron utilizados principalmente en el sector eléctrico (en transformadores) y tuvieron varias aplicaciones en la industria petroquímica; sin embargo, debido a varios incidentes, en 1983 se detuvo su producción y se restringió su importación. Actualmente cerca de 102 000 toneladas (inventarios) de aceites dieléctricos con PCB's se encuentran almacenados en varios países alrededor del mundo, y continua siendo un reto su adecuada gestión ambiental (PNUMA, 2010, p. 75).

La biodegradación de bifenilos policlorados, PCB's, representa a nivel mundial una de las alternativas a uno de los pasivos ambientales más grandes de la historia. En los países en vías de desarrollo, no se tiene una tecnología adecuada para la gestión de aceites dieléctricos contaminados de PCB's (PNUMA, 2010, p. 83), en este contexto, el presente proyecto de titulación buscó desarrollar alternativas viables para el tratamiento y descontaminación de aceites dieléctricos con altas concentraciones de PCB's, que puedan ser llevadas a escala industrial.

En laboratorios nacionales se buscaron cepas de microorganismos capaces de degradar compuestos órgano clorados, y una de las bacterias que reunió las características más adecuadas fue la B350. Inicialmente se realizó un inoculo bacteriano con el fin de verificar la idoneidad de estos microorganismos frente a dos concentraciones de PCB's en aceites dieléctricos (702 ppm y 1 918 ppm), se elaboró la curva de crecimiento y se desarrolló la etapa de reproducción.

Fueron construidos 6 tipos de biorreactores, 3 aerobios y 3 anaerobios; cada uno con diferentes parámetros de operación o funcionamiento (pH, tasa de carga de sustrato, aireación). Se evaluó el desempeño de cada uno de los biorreactores como alternativa para el tratamiento de PCB's al término de 15 y 20 semanas, y se determinó el mejor sistema de biodegradación.

Para cuantificar la degradación de PCB's se realizaron pruebas periódicas por el

método de cromatografía de gases (cada 3 semanas), con el que se determinó la reducción de PCB's, se compararon los resultados y se verificó las condiciones de operación más adecuadas para llevar los procesos a escala industrial. En el caso del tratamiento aerobio el más adecuado es el reactor aerobio 2, con 15% de degradación, que operó a mayores condiciones de pH y aireación. Respecto a los sistemas anaerobios, el óptimo es el reactor anaerobio 1, con 8% de degradación, el cual operó a menores condiciones de pH y carga de metanol (20 g/L/día).

Sobre la base de lo expuesto, fueron escalados y diseñados los biorreactores que presentaron mayor biodegradación y se realizó la evaluación económica del proceso de degradación de PCB's. Finalmente se compararon los precios de tratamiento para la descontaminación de aceites dieléctricos con PCB's entre los procesos: Goodyear, Extracción con fluidos supercríticos y biodegradación, siendo el más económico este último con 23,76 \$/m³, en comparación al Proceso Goodyear y Extracción con fluidos supercríticos, los precios de 727 \$/m³ y 220 - 270 \$/m³, respectivamente según Lopera (2006). Se concluyó que los procesos aerobios se desarrollan de mejor manera a pH=6,8, este fue el pH más alto, con una aireación de 70 cm³/min y sin agitación. El mejor proceso anaerobio fue el que se realizó a condiciones de pH=6,2 y tasa de carga de metanol de 20 g/L/día, es decir el que operó a menor pH y menor carga diaria de metanol.

Los procesos de tratamiento de PCB's estudiados en el presente trabajo, no alcanzaron los porcentajes de reducción de PCB's según lo especificado en Liu (2004), lo que podría explicarse a que los microorganismos utilizados no presentan total afinidad con los PCB's. Sin embargo, sí se produjo una reducción de contaminantes con los tratamientos estudiados especialmente en el sistema aerobio con el 15% de reducción de PCB's en 15 semanas.

INTRODUCCIÓN

El Convenio de Estocolmo es uno de los acuerdos internacionales más importantes en temas de tratamiento de los Compuestos Orgánicos Persistentes (COP's) (PNUMA, 2010, p. 3), mismo que es auspiciado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Actualmente 127 países han ratificado el mencionado convenio y se han comprometido a regular el tratamiento de doce compuestos orgánico persistentes. Ecuador ratificó este convenio el 7 de junio de 2004, año en el que adquirió el compromiso de dar una disposición final adecuada a todos los COP's que se generan en su territorio, así como restringir su uso e importación (Andino, 2013, p. 25).

La presente investigación se centró específicamente en uno de los doce compuestos orgánicos persistentes, el bifenil policlorado, conocido también como PCB. Estos fueron descubiertos a inicios del siglo XX; debido a sus características físicas y químicas tuvieron diversas aplicaciones industriales, principalmente como fluido para transformadores en el sector eléctrico (Liu, 2004, p. 6). Sin embargo, a finales de 1960 se descubrieron casos de contaminación al medio ambiente y posterior envenenamiento a personas expuestas a PCB's, lo cual representó una gran amenaza a nivel mundial. Como resultado, se detuvo la producción de bifenilos policlorados (PNUMA, 2010, p. 10).

Se estima que a escala mundial la producción total de PCB's fue de aproximadamente 1 500 000 toneladas desde 1929 hasta 1989 (PNUMA, 2010, p. 22). Los países productores más importantes fueron: Estados Unidos, Alemania y Francia. Actualmente se tiene cantidades considerables de aceites dieléctricos usados y contaminados que aún no han sido tratados y/o dispuestos adecuadamente (Andino, 2013, p. 38). Ecuador realizó el Plan de Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo a partir del año 2006 (Conelec, 2012). En el último inventario de aceites dieléctricos contaminados con PCB's realizado en el año 2009, se determinó que Ecuador tiene aproximadamente 7 041,50 toneladas de aceites dieléctricos contaminados, los

mismos que están almacenados temporalmente hasta que se les dé una disposición final (PNUMA, 2010, p. 34).

Ecuador no cuenta con la tecnología apropiada para dar tratamiento y disposición final a los aceites dieléctricos con PCB's (CONELEC, 2012). La Normativa EPA de los Estados Unidos es muy exigente y al no contar con un método de tratamiento adecuado, estas sustancias prácticamente se convierten en pasivos ambientales. En este contexto, el propósito de este proyecto es buscar una alternativa viable y amigable con el medio ambiente para el tratamiento de aceites dieléctricos con PCB's, que pueda utilizarse en el Ecuador. Un punto muy importante a consideración es que el Convenio de Estocolmo fijó como plazo máximo hasta el año 2028 la destrucción y eliminación total de PCB's (PNUMA, 2010, p. 44).

Por lo expuesto, a través de la presente investigación se buscó diseñar sistemas de biodegradación aerobia y anaerobia para descontaminar los aceites dieléctricos que contenían PCB's; para esto se emplearon muestras de aceite dieléctrico con diferente grado de contaminación de PCB's, provenientes de la Empresa Eléctrica Quito. Los aceites dieléctricos con mayor concentración fueron biodegradados por el método anaerobio, mientras que las de menor concentración aerobiamente. Después de 20 y 15 semanas de degradación para los sistemas anaerobio y aerobio respectivamente, se determinó el método más adecuado para el tratamiento de PCB's se verificó la factibilidad económica del proyecto a escala industrial.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. ACEITES DIELECTRICOS Y BIFENILOS POLICLORADOS (PCB'S)

1.1.1. ACEITES DIELECTRICOS

Los aceites dieléctricos de origen mineral se obtienen a partir de un derivado secundario del petróleo, y por lo tanto tienen en su composición carbono e hidrógeno. Son una mezcla de: hidrocarburos nafténicos, hidrocarburos aromáticos, e hidrocarburos isoparafínicos, cada uno de estos tiene diferentes características.

Todos los aceites para transformador contienen como mínimo un benceno. La composición de los aceites varía en función del tipo de crudo destilado y del método de refinación empleado (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2014). La Figura 1.1. presenta las estructuras moleculares que pueden presentar los aceites dieléctricos.

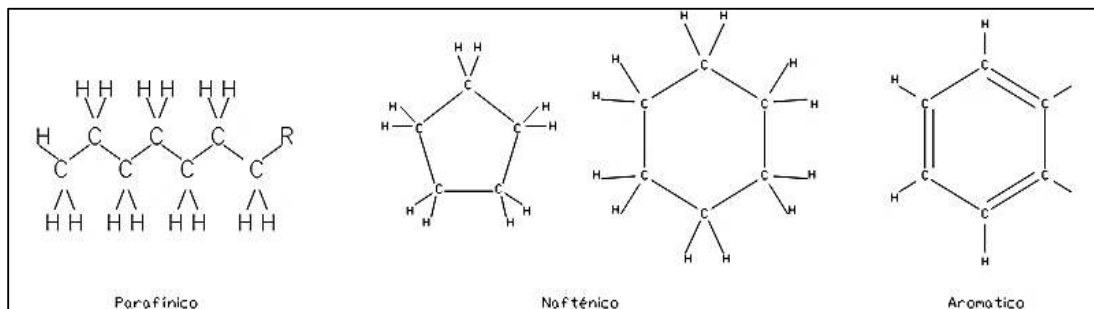


Figura 1.1. Estructuras moleculares de los aceites dieléctricos
(Comisión Federal de Electricidad, 2008, p. 2)

Los bifenilos policlorados presentan propiedades: alta resistencia a la oxidación, alta estabilidad química, buena capacidad de refrigeración, baja viscosidad, buen aislamiento térmico, libre de contaminantes, entre otras, que les permite resistir un gradiente de potencial eléctrico. La calidad de los aceites dieléctricos depende de

la destilación y de los aditivos aplicados. Su uso principal es en transformadores eléctricos.

1.1.2. BIFENILOS POLICLORADOS PCB's

La producción mundial total de los PCB's fue de 1 700 000 de toneladas de aceite desde 1929 hasta 1989. La aplicación principal de estos compuestos fue en el sector eléctrico (López, Díez, Ordoñez, 2001, p. 3; PNUMA, 2010, p. 54).

Los principales países productores de PCB's fueron: Estados Unidos, Alemania, Francia, Italia, España, la Unión Soviética y Japón (Gutiérrez y González, 2012, p. 27; PNUMA, 2010, p. 10). Los PCB's fueron comercializados y utilizados libremente en muchos países industrializados hasta 1970, año en que se restringió su uso por sus efectos nocivos para la salud.

La prohibición de la fabricación de PCB's inicia con un incidente en Japón en el año 1968, en el cual cerca de 13 000 personas se enfermaron al ingerir arroz contaminado con PCB's procedente de la filtración de un sistema de refrigeración perforado. Los síntomas patológicos que presentó la población se denominaron como la enfermedad de Yusho (Andino, 2013, p. 48).

La USEPA (United States Environmental Protection Agency), realizó varios estudios acerca de las consecuencias de los PCB's tanto en el hombre como en el medio ambiente, los resultados de los mencionados estudios confirman el carácter peligroso contaminante de los PCB's (Gutiérrez y González, 2012, p. 29; Robinson y Len, p. 3). Sin embargo, muchos equipos eléctricos que emplean PCB's alrededor del mundo aún están en servicio (PNUMA, 2010, p. 42).

Los PCB's son moléculas compuestas por átomos de carbono, hidrógeno y cloro de fórmula $C_{12}H_{10-n}Cl_n$, donde n es el número de átomos de cloro en el intervalo de 1 a 10. Comprenden una variedad de 209 compuestos individuales, isómeros y

congéneres, que resultan de las sustituciones posibles del átomo de hidrógeno por el átomo de cloro en la molécula del bifenilo.

La Figura 1.2. presenta la estructura molecular del compuesto Bifenil Policlorado, la “R” corresponde a los átomos de cloro (Cl) unidos al bifenilo, mismos que pueden ir de uno hasta diez.

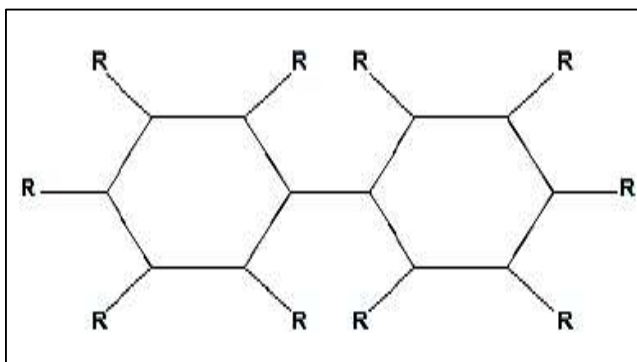


Figura 1.2. Estructura molecular del compuesto bifenilo policlorado (PCB)
(Andino, 2011, p. 42)

La Figura 1.3. muestra las posibles orientaciones de los átomos de cloro en la molécula de PCB (Ruiz, 2005, p. 20, Andino, 2011, p. 42).

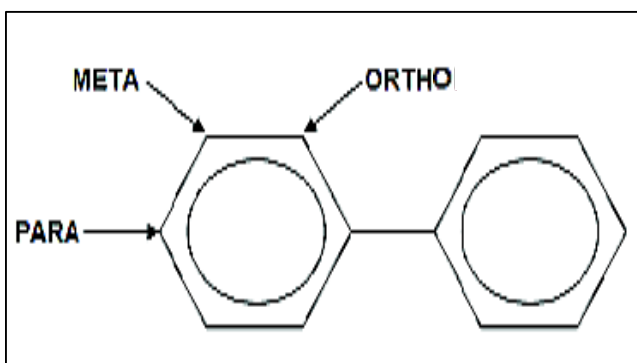


Figura 1.3. Posibles orientaciones de los átomo de cloro en la molécula de (PCB)
(Andino, 2011, p. 42)

1.1.2.1. Propiedades físicas de los PCB's

Las propiedades físicas más importantes de los PCB's se detallan a continuación (Suárez, 2006, p. 4):

- La presión de vapor es inversamente proporcional al contenido de cloro en la molécula de PCB's
- La viscosidad, densidad, punto de ebullición, pérdida por evaporación e inflamabilidad, son directamente proporcionales al grado de cloración
- No son higroscópicos
- No son inflamables, tienen excelente estabilidad térmica
- No conducen la electricidad
- Son sublimables a partir de 130 °C si contienen un 45% del halógeno
- Inodoros, incoloros, resistentes a la oxidación, permanentemente termoplásticos, no corrosivos y poseen constante dieléctrica muy elevada
- Resistentes a los álcalis, ácidos y agua salada
- Son muy solubles en disolventes orgánicos
- Su volatilidad disminuye con el aumento del número de átomos de cloro
- Son solubles en grasas, lo cual explica su capacidad de acumulación en tejidos adiposos. La solubilidad en grasas disminuye con el aumento de número de átomos de cloro.

Existen teóricamente 209 compuestos bifenilos policlorados posibles (PNUMA, 2010, p. 68) y su diferencia radica tanto en el número de cloros, como en su posición y cadena de hidrocarburo (López *et al*, 2001, p. 199). Los PCB's pueden tener sustituciones de cloro en la posición para, meta y orto, como se presentó previamente en la Figura 1.3.

1.1.2.2. Propiedades químicas de los PCB's

Los compuestos Bifenilos policlorados son sustancias químicas muy estables. El compuesto bifenilo policlorado se obtienen mediante una reacción de sustitución. La reacción de sustitución se dá sobre un bifenilo, en presencia de un catalizador adecuado (FeCl_3 , cloruro de hierro III).

El esquema del compuesto bifenilo policlorado se muestra en la Figura 1.4.

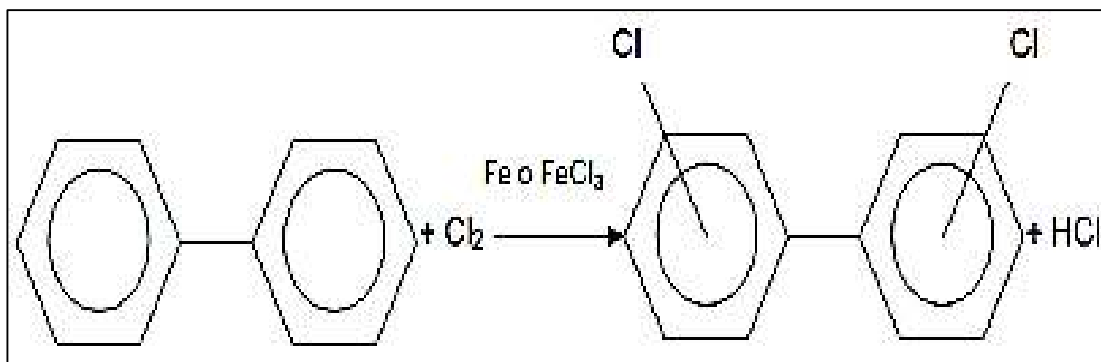


Figura 1.4. Reacción de cloración del bifenilo
(Andino, 2011, p. 42)

La estequiometría del proceso mostrado en la Figura 1.4. se describe mediante la ecuación 1.1.



Los PCB's se obtienen mediante la cloración de grupos bifenilos con cloro gas sobre un catalizador de cloruro metálico (López *et al*, 2001, p. 199). Pueden sustituirse entre 1 y 10 átomos de cloro, para formar desde bifenilo monoclorados hasta el bifenilo decaclorados.

Las propiedades físicas de los compuestos bifenilos policlorados varían según la cloración del bifenilo y la posición del átomo de cloro (Gutiérrez y González, 2012, p. 26).

Los nombres de los PCB's están clasificados según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) en tres tipos: homólogos, congéneres y mezclas. Los homólogos se refieren al nombre general de los PCB's dependiendo el número de cloros que este posea, los nombres de los congéneres indica la posición de cada cloruro dentro de la molécula, las mezclas describen a nombres comerciales (Suárez, 2006, p.3).

En la Tabla 1.1. se muestran los nombres de homólogos y algunos congéneres de PCB's (Lopera *et al*, 2006, p. 76).

Tabla 1.1. Diferentes nomenclaturas para PCB's

Nombre	Tipo	Nombre	Tipo
Monocloro bifenilo	Homólogo	2,2',3',4,4',5,6' Octaclorobifenil	Congénere
Tetracloro bifenilo	Homólogo	Aroclor 1254	Mezcla
2-Cloro bifenilo	Congénere	Aroclor 1260	Mezcla

(Lopera *et al.*, 2006, p. 76)**1.1.2.3. Usos de los PCB's**

Los PCB's tienen varias aplicaciones, y en función de su uso, existe un mayor o menor riesgo de exposición a estas sustancias. A continuación se describen varios sistemas de acuerdo su salida al medio ambiente:

- **Sistemas abiertos**

Los PCB's se encuentran en contacto con el ser humano y el medio ambiente, pero no directamente como aceite, sino como constituyentes de otros productos.

Ejemplos de sistemas abiertos son: tintas, materiales aislantes, lubricantes, adhesivos, pinturas, pesticidas, cera, plastificantes, entre otros (Andino, 2013, pp. 52-53; Gutiérrez y González, 2012, p. 27).

- **Sistemas cerrados**

Los PCB's deben mantenerse dentro de equipos o unidades selladas, de manera que los usuarios no se encuentran expuestos directamente. Solamente cuando el equipo sufre daños o está sometido a mantenimiento pueden ocurrir emisiones y exposiciones a los PCB's. Algunos ejemplos de estos sistemas son: condensadores, transformadores, motores eléctricos, balastos de equipos de iluminación (Andino, 2013, pp.51-52; Gutiérrez y González, 2012, p. 29).

- **Sistemas parcialmente cerrados**

En estos sistemas los PCB's están confinados en equipos y no existe exposición directa al medio ambiente, pero pueden liberarse periódicamente durante la operación de equipos, tales como: intercambiadores de calor, sistemas hidráulicos, bombas de vacío, interruptores (generación de electricidad), reguladores de voltaje, cables eléctricos rellenos con líquido (Andino, 2013, p.51-52; Gutiérrez y González, 2012, p. 28).

1.1.3. IMPACTO AMBIENTAL

El bifenil policlorado es denominado como "contaminante orgánico persistente" ya que puede existir en el medio ambiente por largos periodos de tiempo, una vez que los PCB's entran al ser humano permanecen en los tejidos grasos entre 15 y 75 años. Los PCB's se depositan en el tejido adiposo debido a su solubilidad en las grasas. Consta en la lista de los doce compuestos más peligrosos del mundo ("docena sucia") (Suárez, 2006, p. 4).

Las propiedades físicas y químicas que hicieron de los PCB's sustancias valiosas, también los convierten en un problema cuando se liberan al ambiente.

Los PCB's pueden migrar al suelo, al agua subterránea y al aire, abarcando grandes distancias, contaminando tanto el medio ambiente local, como el global. Si son encontrados en ríos, tarde o temprano llegarán a los océanos, acumulándose en peces y aves y posteriormente en mamíferos que se alimentan de ellos.

Estos contaminantes pueden viajar largas distancias en el aire, incluso por especies migratorias a través de las fronteras internacionales. Se ha encontrado PCB's en la lluvia, en la carne vacuna, productos lácteos, en el esperma del ser humano, en la leche materna, en pingüinos de la Antártida y en poblaciones

nativas del Ártico (Suárez, 2006, p. 4).

En el caso de derrames sucede lo mismo, los cultivos contaminados han sido el medio para que el ser humano los ingiera y se contamine (Ruiz, 2005, p. 21; Liu, 2004, p. 9; PNUMA, 2010, p. 5; Suárez, 2006, p. 4).

El tiempo de vida de los PCB's depende del grado de cloración del compuesto así como de la sustitución isomérica que la molécula presente (Gutiérrez y González, 2012, p.48).

En el aire, el tiempo de vida media de los PCB's en función del número de átomos cloro es: 5 a 11 días en monoclora bifenilos, 8 a 17 días para dicloro bifenilos, 14 a 30 días en tricloro bifenilos, 25 a 60 días para tetracloro bifenilos, 60 – 120 días en pentacloro bifenilos y en octacloro bifenilos hasta 477 días.

En el agua la degradación de PCB's es más lenta, puede darse en condiciones aerobias y anaerobias, el tiempo de vida media de compuestos monoclora bifenilos a tetraclorobifenilos varía de 17 a 210 días. El tiempo de vida media de PCB's en el suelo depende de varios factores, como el tipo de microorganismos presentes, nutrientes disponibles y la temperatura; este puede tomar en dicloro bifenilos de 210 a 330 días, en tricloro bifenilos de 150 a 510 días y en octacloro bifenilos hasta más de 5 años (Faroon *et al*, 2003; Gutiérrez y González, 2012, p. 32).

En la actualidad, las fuentes potenciales de contaminación ambiental puede darse por liberaciones directas o accidentales de equipos eléctricos operativos y almacenados que contienen PCB's. Muchos de los lugares de almacenamiento son inapropiados o ilegales (PNUMA, 2010, p. 54).

Los efectos de la contaminación con PCB's al medio ambiente, motiva el desarrollo de tecnologías más efectivas, rápidas y ecológicas. Los procesos biológicos son una alternativa para el tratamiento de bifenilos policlorados *in situ* y *ex sit* (Liu, 2004, p. 16).

1.1.4. CONSECUENCIAS A LA SALUD HUMANA

Los compuestos polibifenilos clorados, presentan la característica de bioacumulación; es decir se acumulan en los tejidos adiposos y en los órganos del cuerpo (el hígado y el cerebro son los órganos del cuerpo humano en los que se ha evidenciado mayor concentración) (Gutiérrez y González, 2012, p. 32).

Los síntomas que presentan las personas expuestas a altas concentraciones de PCB's son: irritación de la piel y ojos, síntomas severos de acné, problemas neurológicos, afecciones al sistema inmunológico y reproductor, causados por absorción accidental de dosis de 800 - 1 000 partes por millón (López *et al*, 2001, p. 2; Andino, 2011, p. 48).

En el año 1970, se descubrieron varias evidencias de las propiedades cancerígenas de los PCB's (PNUMA, 2010, p. 60). Estudios realizados en trabajadores expuestos a PCB's reportan un incremento de diferentes tipos de cáncer, como los de hígado, vesícula, tracto biliar, gastrointestinal, piel, entre otros (Miller, C., Sánchez, E., Mucio, S., Mendoza, J., León, M., 2009).

Debido a que los PCB's resisten la descomposición biológica, no pueden excretarse o secretarse en el ser humano (Gutiérrez y González, 2012, p. 32). Por esta razón, representan un gran peligro para los seres vivos que estén expuestos, ya sea por inhalación de vapores, contacto con la piel o ingestión de alimentos que tengan restos de estos contaminantes (Golden *et al*, 2010).

La ingestión es la principal forma de exposición humana, especialmente durante el consumo de animales contaminados con PCB's. De la misma manera, el agua proveniente de ríos contaminados con PCB's resulta un peligro para los sistemas de riego en sembríos, y por consiguiente para la salud humana (López *et al*, 2001, p. 200).

Las primeras evidencias de bioacumulación de bifenilos policlorados se

conocieron por estudios suecos publicados en 1966 por la Universidad de Estocolmo (Suárez, 2006, p. 5).

A finales de los años setenta, se encontraron numerosos casos de personas intoxicadas por ingerir alimentos y carne animal contaminados con PCB's, estos incidentes fueron originados por derrames de equipos eléctricos en funcionamiento con aceites dieléctricos contaminados (2 000 ppm) (PNUMA, 2000, p. 5; Andino, 2001, p. 48).

La toxicidad aguda de PCB's o dosis letal mediana (DL 50) es 4g/kg de peso corporal (López *et al*, 2001, p. 201). Es importante mencionar que los bifenilos policlorados con mayor cantidad de cloros son más resistentes, por ende se adsorben al suelo u otro sedimento con mayor fuerza y tiene mayor tendencia a bioacumularse (Arbeli, 2009, p. 62).

1.2. PROCESOS TECNOLÓGICOS PARA LA DESTRUCCIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS CONTAMINADOS CON PCB's.

Debido a la contaminación mundial y a las malas prácticas industriales, se ha visto la necesidad de implementar planes de manejo ambiental que contribuyan a la descontaminación y a la preservación del medio ambiente.

El uso de los bifenilos policlorados benefició al sector industrial; sin embargo, generó un grave problema de contaminación. Por su toxicidad los PCB's, son considerados dentro de los doce COP's, por lo que se ha procurado el desarrollo e alternativas que mitigan los riesgos derivados del uso de PCB's en transformadores eléctricos y aceites dieléctricos (PNUMA, 2000, pp. 8-9).

Los tratamientos de descontaminación de aceites dieléctricos dependen del grado de concentración de los PBC's, y en la actualidad se conocen algunos procesos biológicos, físicos y químicos para la purificación de estos aceites. Actualmente las técnicas más usadas son: incineración y/o disposición final en rellenos de

seguridad, evitando su dispersión y contacto con organismos vivos (Arbeli, 2009, p. 59-60).

1.2.1. PROCESOS BIOLÓGICOS

1.2.1.1. Biodegradación de PCB's

La biodegradación representa una buena alternativa para el tratamiento de los PCB's en comparación a otros métodos como el Goodyear y Declaración que son más costosos que la remediación ambiental.

Los microorganismos como *Pseudomonas sp* y *Burkholderia Xenovorans LB400* (cepa), tienen la capacidad de utilizar las cadenas de compuestos peligrosos como fuente de carbono; estos compuestos incluyen: plaguicidas, hidrocarburos y PCB's (Liu, 2004, p. 25; Arbeli, 2009, p. 63).

Las primeras investigaciones respecto a la biodegradación de PCB's fueron realizadas en el año 1973 por Ahmed y Focht, quienes en sus publicaciones hacen referencia a bacterias gram negativas y positivas capaces de sobrevivir y degradar una gran variedad de congéneres de bifenilos policlorados (Arbeli, 2009, p. 60).

Estudios posteriores de Furuwaka concluyeron que la degradación disminuye mientras el número de cloros incrementa, obteniendo resultados similares (Arbeli, 2009, p. 61).

La biodegradación se da con enzimas específicas que tienen como fin aprovechar las moléculas del contaminante como fuente de nutriente y/o energía que aportan al crecimiento de los microorganismos. Sin embargo, se ha demostrado que la degradación de PCB's se da a través de un co-metabolismo, en el cual se requiere un co-sustrato o una fuente adicional de carbono para el crecimiento microbiano y actividad de degradación (Liu, 2004, p. 17).

Entre los factores más importantes que estimulan la degradación de un contaminante se puede encontrar: 1) el papel del contaminante en la reacción, si actúa como fuente de carbono, donador de electrones, aceptor final de electrones, en co-metabolismo; 2) sustratos adicionales en la reacción (oxígeno, metanol) y 3) condiciones óptimas de crecimiento de los microorganismos (temperatura, pH, etc) (Arbeli, 2009, p. 60-61).

En base a los estudios iniciales se empezó a analizar esta nueva alternativa de remoción de bifenilos policlorados en aceites dieléctricos. De esta manera se determinaron varias especies capaces de degradar PCB's bajo ciertas condiciones de: temperatura, humedad, pH, etc. Estas condiciones dependen del tipo de mecanismo que se aplique, estos son: biodegradación aerobia y biodegradación anaerobia (Liu, 2004, p. 14).

La biodegradación aerobia de PCB's se da por dos medios: a) deshalogenación oxidativa, donde la fuente de oxígeno es molecular (O_2), y b) deshalogenación hidrolítica, en la cual el oxígeno se obtiene de la molécula del agua.

Este proceso consiste en la destrucción de las moléculas de PCB's, dando como resultado: dióxido de carbono, agua, cloruro, y la biomasa. Este método ha sido ampliamente conocido y estudiado, se ha determinado que los compuestos con menor número de cloros son más susceptibles a la degradación aeróbica (Aráoz y Viale, 2004, p. 2; Arbeli, 2009, p. 61).

La ruta metabólica de la degradación de Bifenil ha sido estudiada ampliamente. Dicha degradación se lleva a cabo por una serie de enzimas, si la primera enzima no puede metabolizar un congénere, la degradación puede no obtenerse. El proceso está catalizado por enzimas especializadas en la degradación de bifenil policlorado, estas son la: BphA, BphB, BphC y BphD. La primera enzima, BphA, tiene mayor influencia debido a la especificidad para la dioxigenación, es decir, influye en la eficacia de la catálisis de las demás enzimas en la ruta (Arbeli, 2009, p. 69).

En la Figura 1.5. se observa la ruta de degradación aerobia. Esta ruta metabólica inicia con el ataque de las bacterias, la enzima bifenil dioxigenasa (BphA) con la adición de O_2 produce el bifenil dihidrodiol (B), seguido a esto actúa la enzima deshidrogenasa (BphB) produce una deshidrogenación a fenil catecol (C), el cual con la enzima dioxigenasa (BphC) y la incorporación de O_2 produce el 2-hidroxi-6-oxo-6-fenilhexa-2,4-ácidodienoico (D); finalmente la enzima (BphD) se hidroliza a benzoato y clorobenzoato (Ruiz, 2005, p. 22; Arbeli, 2009, p. 68).

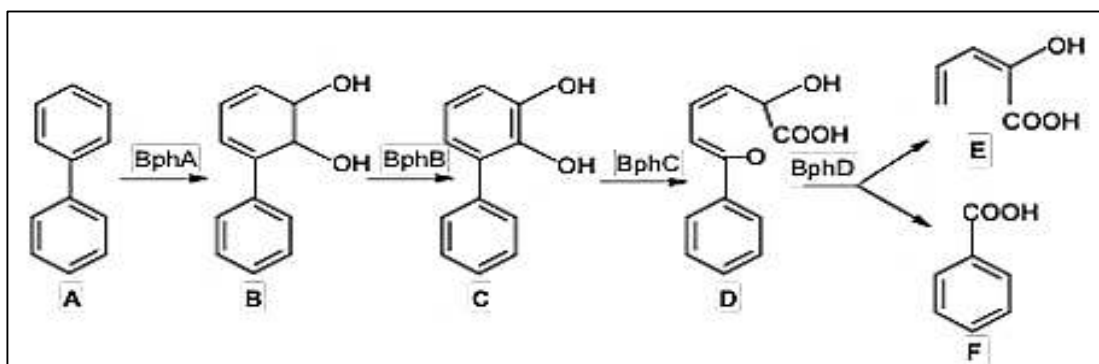


Figura 1.5. Proceso de biodegradación aerobia de PCB's
(Arbeli, 2009, p. 68)

Debido a que el sustrato natural de las enzimas es el bifenil, la tasa de degradación en algunos casos es menor, puede formar productos no completos de degradación o ser tóxicos para los microorganismos.

Por otro lado la biodegradación anaerobia, consiste en la eliminación de los átomos de cloro de la molécula de PCB's y la sustitución por átomos de hidrógeno. Los microorganismos anaerobios utilizan el cloro como un aceptor final de electrones, involucrando la adición del electrón en el enlace carbono-cloro, seguido por la pérdida del cloro y la subsiguiente pérdida del hidrógeno (Ruiz, 2005, p. 24).

En general, este proceso microbiano afecta preferencialmente la eliminación de meta y para cloros, convirtiendo así los congéneres de PCB altamente clorados para bajar clorados, orto - sustituido congéneres.

Estudios han revelado una disminución de un 70 % de la concentración de PCB's

en los aceites dieléctricos, empleando bacterias específicas para tal biodegradación (De Giorgis, Schwarz, Chamy, Schiappacasse, 2003, p. 1).

Los PCB's no se hidrolizan fácilmente, es decir, no pueden proporcionar por sí solos los electrones y la energía suficiente para que los microorganismos crezcan y las enzimas actúen. Por lo tanto, se requiere de una fuente de energía adicional que impida que los procesos metabólicos se detengan, a esto se le llama co-metabolismo.

Los procesos de biodegradación anaerobia utilizan metanol, tolueno, propano y butano para apoyar al co-metabolismo, a estos se los llama sustratos adicionales, que proporcionarán la energía necesaria para promover la eliminación de PCB's (Ruiz, 2005, pp. 100-102).

Por otro lado, estudios han demostrado que la baja biodisponibilidad de los PCB's influye en la tasa de degradación, este es uno de los factores por los que los procedimientos de laboratorio no funcionan en campo. Se ha implementado experimentalmente la aplicación de surfactantes para incrementar la biodisponibilidad en los compuestos organoclorados, algunos resultados han determinado que varios surfactantes pueden inhibir la degradación e incluso cambiar la composición de la comunidad microbiana (Arbeli, 2009, pp. 63-64).

Sin embargo, experimentalmente se ha demostrado que los surfactantes de la familia "Tween" (o polisorbato es un éster del polioxietilen sorbitano) son menos tóxicos, y que los surfactantes Tween 60, 61 y 65 pueden servir incluso como fuente de carbono y donadores de electrones en la deshalogenación reductiva, y que específicamente el Tween 80 estimula la degradación anaerobia (Arbeli, 2009, pp. 63-64).

Se ha propuesto varias estrategias para estimular la degradación anaerobia, estas son: a) adición de fuente de carbono y donador de electrones; b) adición de surfactante; c) adición de otro compuesto halogenado; d) adición de FeSO₄ (incremento del consorcio bacteriano) y e) adición de un consorcio microbiano con

capacidad específica de deshalogenación reductiva de PCB's (Arbeli, 2009, p. 65).

La diferencia principal entre los métodos de biodegradación aerobia y anaerobia es la presencia de oxígeno, pero en el contexto de la biodegradación de PCB's, la selección del método depende de la concentración de PCB's en el aceite dieléctrico, es decir, se aplicará biodegradación anaerobia a aceites dieléctricos con mayor concentración de PCB's. La Figura 1.6. muestra el proceso de biodegradación anaerobio.

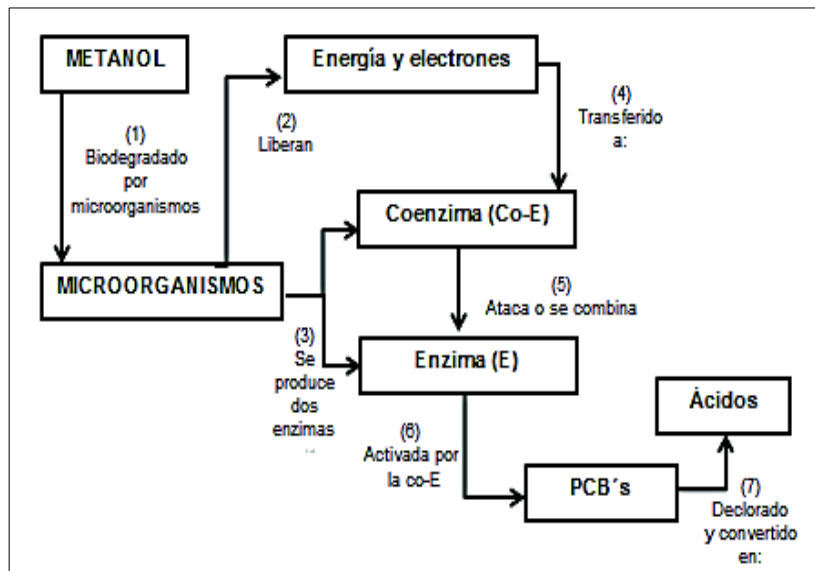


Figura 1.6. Proceso de biodegradación anaerobia de PCB's
(Liu, 2004, p. 103)

En la Figura 1.6. en el co-metabolismo de la ruta metabólica de la degradación anaerobia, el sustrato adicional (en este caso metanol), es fácilmente degradado para adquirir la energía y electrones por los microorganismos; esta energía y electrones se combinan con la coenzima (Co-E), y es transferida a la enzima (E), que tendrá la función de romper el enlace carbono cloro de los PCB's después de activarse.

Para esta activación, la coenzima (Co-E) con electrones y energía suficiente ataca o se une a la enzima (E) y cambia su forma. La enzima activada (E), es capaz de

biodegradar los PCB's, se completa la dechloración y convierte a los PCB's en ácidos correspondientes (Liu, 2004, p. 102).

Se ha propuesto la combinación de los procesos: aerobios y anaerobio para una degradación más eficiente. Este tratamiento inicia con la biodegradación anaerobia que transforma los compuestos de PCB's altamente clorados en menos clorados, y para completar la degradación se utiliza microorganismos aerobios que son más selectivos a compuestos de menor cloración.

Según estudios realizados, la mayoría de bacterias aerobias capaces de degradar compuestos tóxicos pertenecen a los géneros de la pseudomonas, alcaligenes, acinetobacter (Arbeli, 2009, p. 62).

La determinación y cuantificación de PCB's en los aceites dieléctricos se realiza por el método de cromatografía de gases (Liu, 2004, p. 56).

1.2.2. PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS

1.2.2.1. Incineración de PCB's

El proceso de incineración es realizado principalmente en hornos rotatorios, de inyección líquida o también llamados de cámara estática; las temperaturas de operación en este proceso se encuentran entre los 1 200 a 1 600 °C para evitar la formación de dibenzofuranos, el tiempo de residencia es de 2,0 a 1,5 segundos con un 3% y 2% de oxígeno en exceso respectivamente. Este proceso logra la destrucción de todos los contaminantes orgánicos, con una eficiencia de destrucción de PCB's de hasta el 99,9% (Lopera y Aguirre, 2006, p. 79).

Los principales productos de la incineración son: dióxido de carbono, agua, ceniza orgánica, demás gases de combustión (dioxinas y furanos cuyas concentraciones se dan en partes por trillón), óxidos metálicos y partículas; para controlar estos

productos, el sistema cuenta con líneas de tratamiento y equipos de control de la contaminación atmosférica con el fin de reducir al mínimo los efectos ambientales.

1.2.2.2. Decloración química de PCB's

La decloración química no requiere de temperaturas elevadas para que la reacción de oxidación ocurra, este proceso se lleva a cabo debido al potencial de los compuestos químicos para reaccionar. Específicamente, se utilizan reactivos químicos para remover los átomos de cloro en la molécula de PCB disminuyendo su estabilidad (López *et al*, 2001, p. 202).

Generalmente se utiliza sodio para separar los átomos de cloro, y como resultado existe la formación de otros compuestos químicos como: cloruro de sodio y polifenilos no halogenados, mismos que son inofensivos y pueden disponerse de manera segura por filtración o centrifugación (Lopera y Aguirre, 2006, p. 79).

Las reacciones químicas se dan en atmósfera inerte y en ausencia de agua, son llevadas a cabo dentro de un transformador y duran hasta una semana. Al ser un sistema cerrado, el volumen de emisiones gaseosas es bajo si se lo compara con procesos de combustión (Andino, 2011, p. 74).

1.2.2.3. Oxidación súper crítica de PCB's

La oxidación super crítica es un proceso que utiliza un agente oxidante como oxígeno o peróxido de hidrógeno para destruir compuestos tóxicos en condiciones de presión y temperaturas elevadas, los productos generados son dióxido de carbono, agua, sales y ácidos inorgánicos (Gutiérrez y González, 2012, p. 103; Andino, 2011, p. 76). La eficiencia de este proceso es alta, descompone totalmente las moléculas de PCB's, pero puede formar co-productos tóxicos, además de corrosión en los equipos y precipitación de sales (López *et al*, 2001, p. 205).

El procedimiento se aplica a PCB's extraídos de suelos o sedimentos. Opera a temperaturas y presiones superiores a las del punto crítico del agua (373,2 °C y 221 bar), de esta manera el agua súper crítica toma el comportamiento de un solvente apolar, lo que le da la característica de miscibilidad total en cualquier sustancia orgánica.

En los últimos años, el proceso de oxidación super crítica ha demostrado ser aplicable para la destrucción de contaminantes orgánicos persistentes que no pueden tratarse con procesos y tecnologías convencionales (Gutiérrez y González, 2012, p. 103).

1.2.3. DISEÑO DE BIORREACTORES

Un biorreactor es un sistema que mantiene las condiciones adecuadas para el crecimiento biológico, y puede ser aerobio o anaerobio según exista o no presencia de oxígeno. El sistema está conformado por organismos y sustancias químicas que actúan como sustrato. La forma de los biorreactores generalmente es cilíndrica y son fabricados en acero inoxidable (Rivera y Suárez, 2010, p. 28).

1.2.3.1. Criterios iniciales de diseño de un biorreactor

Para el diseño de un biorreactor se considera (Ruíz, H., Rodríguez, R., Rodríguez, M., Contreras, J., Aguilar, C., 2007, p. 34):

- La cinética de crecimiento bacteriano
- La estabilidad y supervivencia de los microorganismos
- Los parámetros de control de condiciones ambientales (temperatura, presión, pH, etc)
- La construcción y modo de operación

- El empleo de material no tóxico en la construcción y operación, que no afecte el crecimiento de los microorganismos

1.2.3.2. Criterios de escalado

Para proceder con el escalado de un biorreactor se requieren algunos criterios como presión, volumen, agitación, tiempo de residencia y constantes de números adimensionales como el número de Reynolds (N_{Re}), estos criterios son de importancia ya que logra maximizar el proceso de escala de laboratorio a escala piloto y a escala industrial (Fundación Universitaria Tecnológico de Copenalco, 2014).

1.2.4. CLASIFICACIÓN DE BIORREACTORES

Los biorreactores se clasifican en algunos grupos, mismos que se describen en los próximos párrafos.

1.2.4.1. Agitación mecánica

Son los biorreactores más utilizados, se emplean en sistemas cuyas necesidades de oxígeno no son muy grandes y requiere de equipos mecánicos, específicamente agitación continua e inyección de aire por la parte inferior (Fundación Universitaria Tecnológico de Copenalco, 2014).

1.2.4.2. Agitación neumática

La elevación del costo energético de la transferencia de oxígeno en el reactor conduce al diseño de biorreactores con agitadores neumáticos. En este tipo de

bioreactor la agitación es inducida por medio de gas a presión (Fundación Universitaria Tecnológico de Copenalco, 2014).

La clasificación de biorreactores de acuerdo a fases se especifica como sistemas homogéneos y heterogéneos, que se describen a continuación:

1.2.4.3. Homogéneos

El medio de cultivo permanece en suspensión, un ejemplo es el reactor de lecho fijo (Fundación Universitaria Tecnológico de Copenalco, 2014).

1.2.4.4. Heterogéneos

El medio de cultivo permanece en contacto con el resto de fluido; ejemplos: biorreactor de lecho fluidizado, biorreactor de tanque agitado (Fundación Universitaria Tecnológico de Copenalco, 2014).

El diseño de los biorreactores se realiza con el criterio de optimizar la eficiencia de los microorganismos capaces de realizar la biodegradación. Las condiciones ambientales del biorreactor como la presión, temperatura, pH, oxígeno disuelto y velocidad de agitación deben ser controladas (Rivera y Suárez, 2010, p. 29).

Los biorreactores se clasifican en función del tipo de operación con lo que se definen los parámetros y características de operación de todo el proceso productivo del sistema (Fundación Universitaria Tecnológico de Copenalco, 2014).

1.2.4.5. Continuo

El tipo de operación y producción de los biorreactores es continua, para lo cual se tiene una línea de alimentación y una línea por donde sale el producto final,

dándose una transformación perpétua dentro del sistema (Cassanello, 2011, p. 55).

1.2.4.6. Semicontinuo

En este tipo de biorreactor la producción es por lotes alimentados, para lo cual se carga por completo existiendo una línea de entrada para aumentar la productividad del proceso (Cassanello, 2011, p. 55).

1.2.4.7. Batch o discontinuo

En este tipo de operación la producción es por lotes, para lo cual se carga por completo el biorreactor, y se espera el tiempo que tome el proceso que es denominado tiempo de retención (Cassanello, 2011, p. 55). Para los procesos de biodegradación aerobios se emplean reactores batch ó discontinuos homogéneos con agitación mecánica y aireación, como se muestra en la Figura 1.7.

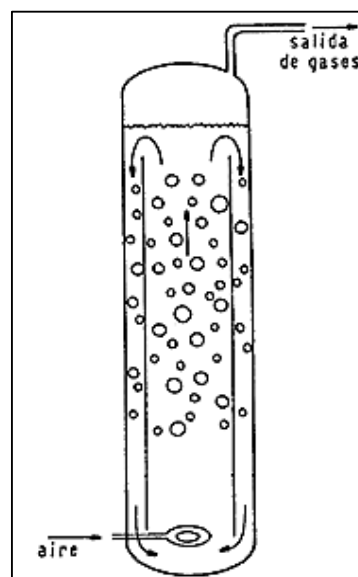


Figura 1.7. Esquema del tipo de reactor aerobio a ser empleado en la biodegradación (Cuellas, 2007, p. 13)

En la Figura 1.7, el aire inyectado promueve el movimiento y agitación dentro del biorreactor, de tal manera que se genera un movimiento del líquido.

Para los procesos de biodegradación anaerobios se emplea reactores semi-continuos homogéneos con agitación mecánica sin aireación, como se muestra en la Figura 1.8. En la operación de estos biorreactores se agregan los componentes necesarios y se espera el tiempo establecido para este proceso (Rivera y Suárez, 2010, p. 28).

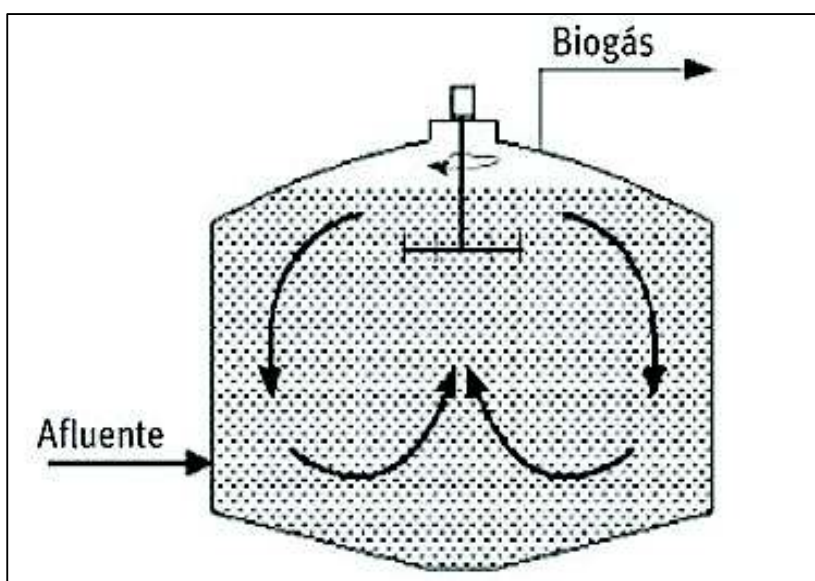


Figura 1.8. Esquema del funcionamiento (movimiento de flujo dentro del tanque) del reactor anaerobio a ser utilizado en la biodegradación
(Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (2016), <http://www.idae.es>)

En esta investigación, para el procedimiento aerobio los biorreactores son: batch, cilindricos, abiertos, de vidrio, con y sin agitación y con sistema de aireación.

Las características de los biorreactores anaerobios son: cilindricos, semi-continuos, cerrados, de vidrio y con agitación intermitente (cada siete horas). En estos biorreactores se agregan los componentes iniciales y se tiene una tasa de carga de alimentación diaria durante su proceso de degradación establecido (Cassanello, 2011, p. 57). En este proyecto, los tipos biorreactores utilizados para el proceso aerobio y anaerobio fueron batch y semi-discontinuo en función de las características y su modo de operación.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DIELECTRICO CONTAMINADO CON PCB'S.

Las muestras de aceite dieléctrico que fueron empleadas en el presente proyecto de titulación en la biodegradación aerobia y anaerobia, fueron obtenidas a partir de dos muestras iniciales de aceite residual de los transformadores eléctricos usados por la Empresa Eléctrica Quito S.A. (EEQ S.A.), mismos que se encontraban almacenados formando parte del inventario como pasivos ambientales sin disposición final (COALDES, 2003).

2.1.1. MUESTREO DEL ACEITE DIELECTRICO

Para la realización de la experimentación y en función de la disponibilidad de aceite dieléctrico contaminado con PCB's, la (E.E.Q. S.A.) proporcionó dos muestras de 700 ppm y 2 000 ppm de concentración de PCB's cada una en un volumen de 3 litros y procedentes del año 2009. Se consideró este año, ya que a partir del mismo los transformadores eléctricos con aceites dieléctricos fueron reemplazados por transformadores que usan aceites con otros componentes que excluyen contaminantes como los PCB's.

2.1.2. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS MUESTRAS INICIALES DE LOS ACEITES DIELECTRICOS

Las dos muestras iniciales de aceite dieléctrico se analizaron en los Laboratorios del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), mediante cromatografía de gases, estos análisis se realizaron en un laboratorio externo debido a la falta y dificultad de conseguir los estándares para PCB's. Se obtuvieron cromatogramas cuantitativos y cualitativos de cada muestra en los que

se determinó la concentración de PCB's de los aceites contaminados.

Esta información fue imprescindible en los análisis de cada una de las muestras referentes a los biorreactores aerobios y anaerobios tomadas en el transcurso de la biodegradación, ya que las muestras analizadas fueron obtenidas a partir de las dos iniciales de las que se conocieron sus concentraciones y durante el proceso de degradación en los reactores de 15 semanas para los sistemas aerobios y 20 semanas para los sistemas anaerobios se obtuvieron 5 y 7 muestras respectivamente de cada biorreactor con lo que se logró comparar las concentraciones iniciales con las finales e intermedias de cada reactor aerobio y anaerobio.

Todos los análisis posteriores a los iniciales (5 para cada reactor aerobio y 7 para cada reactor anaerobio con su paralelo) se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D 4059-00, "Método estándar de prueba para el análisis de los bifenilos policlorados en aislantes líquidos por cromatografía de gases", en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional.

2.1.3. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE ACEITES INICIALES POR CROMATOGRAFÍA DE GASES

Las concentraciones iniciales de los aceites dieléctricos con PCB's se emplearon como punto de partida para los procesos de biodegradación. El análisis cromatográfico permitió identificar la muestra de aceite con mayor concentración de PCB's, que posteriormente fue empleado para el tratamiento anaerobio. De igual manera se identificó la muestra con menor contenido de PCB's, misma que fue utilizada en el proceso aerobio.

Según la norma, el método inició con la dilución del aceite dieléctrico en solvente (hexano grado pesticida); la solución resultante fue inyectada en el cromatógrafo de gases que tiene incorporado una columna de sílice fundida, los componentes

fueron transportados por el gas portador (hidrógeno) y separados con el paso del tiempo. El detector empleado en la cromatografía fue de ionización a la llama (FID), y como resultado final el equipo desarrolló cromatogramas que describieron la separación de la mezcla inyectada, con ayuda del estandar (Aroclor 1254), se comparan los tiempos de retención.

2.1.4. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS INICIALES DE LAS MUESTRAS DE ACEITES DIELECTRICOS

Se realizaron análisis de pH, densidad gravimétrica y peso específico para la determinación de las propiedades físicas iniciales de los aceites dieléctricos, se efectuaron tres análisis simultáneos para cada propiedad analizada ya que tanto las densidades como los pH's y los pesos específicos son propiedades inherentes y propias de cada sustancia y sus componentes.

No se realizaron pruebas de determinación de turbidez de los aceites dieléctricos, debido a la falta de información de normas que describan el procedimiento de análisis, y del blanco requerido para este estudio.

En función de que la turbidez no es una propiedad de los aceites dieléctricos que se relacione con la presencia de PCB's, se descartó de los ensayos iniciales de caracterización de los aceites (Suárez, 2006, p. 4).

Los ensayos físicos de densidad gravimétrica y peso específico se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D 1480-12 "Método estándar de prueba para la densidad y densidad relativa (Gravedad específica) de materiales viscosos", y los ensayos de pH fueron efectuados siguiendo la norma APHA 4500 H-B "Métodos estándar para el análisis de aguas y aguas residuales". Tanto la densidad gravimétrica como el peso específico son propiedades que caracterizan un aceite dieléctrico y se relacionan directamente con el contenido de PCB's (Murillo y Marchena, 2006, p. 16).

Los cálculos empleados para determinar las propiedades físicas de los aceites dieléctricos en estudio se muestran en el Anexo I.

2.1.4.1. Densidad gravimétrica y peso específico de las concentraciones de las muestras iniciales de aceites dieléctricos

Los ensayos de densidad gravimétrica y peso específico se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D 1480-12, procedimiento para el cual se empleó un picnómetro (volumen: 25 mL), balanza (marca: ADAMM, precisión: 0,0001 g). Para determinar la densidad de un líquido con el método tomado de la norma antes citada, se procedió a operar como describe a continuación.

- Inicialmente se limpió el picnómetro, procedimiento que consistió en el lavado con agua destilada, secado y pesado en la balanza analítica.
- El picnómetro fue llenado completamente con agua, enrasándolo con el líquido para que el capilar rebose de fluido y evitando la formación de burbujas, paso seguido se pesó del picnómetro lleno, y el instrumento fue vaciado por completo.
- Luego para trabajar con el líquido de ensayo (aceite dieléctrico) el picnómetro estuvo lleno con aceite dieléctrico siguiendo el paso anterior en el que se empleo agua y se llevó a pesar el instrumento.
- El procedimiento fue realizado 3 veces para cada concentración de aceite dieléctrico.

La densidad de las dos muestras de aceite se determinó a partir de la Ecuación 2.1. y se desarrolló obteniendo la Ecuación 2.2.

$$\delta_a = \frac{M_T - M_P}{V_P} \quad [2.1]$$

$$\delta_w = \frac{M_w}{V_w} + \frac{M_w}{V_P} \quad [2.2]$$

Donde:

M_T : Masa del picnómetro + masa de la muestra [kg]

M_p : Masa del picnómetro [kg]

V_p : Volumen del picnómetro [m³]

δ_a : Densidad del aceite [kg/m³]

δ_w : Densidad del agua [kg/m³]

M_w : Masa del agua [kg]

V_w : Volumen del agua [m³]

V_p : Volumen del picnómetro [m³]

El volumen de agua V_w contenida en el instrumento fue igual al volumen del picnómetro V_p , con lo que se determinó V_p a partir de la Ecuación 2.3.

$$V_p = \frac{M_w}{\delta_w} = \frac{M_{p+w} - M_p}{\delta_w} \quad [2.3]$$

La densidad del aceite se calculó al sustituir la Ecuación 2.2 y 2.3 en 2.1 y se obtuvo la Ecuación 2.4.

$$\delta_a = \frac{M_{p+d} - M_p}{M_{p+w} - M_p} \times \delta_w \quad [2.4]$$

La norma ASTM D 1480-12 no especifica reportar una desviación referente a las medidas realizadas del volumen, densidad y peso específico junto con sus valores promedio. En base a estas directrices se ha reportado el valor de la densidad de los aceites de ambas concentraciones sin desviación. A continuación se realizará el análisis del potencial hidrógeno de las muestras iniciales de aceite dieléctrico.

2.1.4.2. Potencial hidrógeno de las concentraciones de las muestras de aceites dieléctricos iniciales

Se realizaron los ensayos de pH de acuerdo a la norma APHA 4500 H-B, mencionada anteriormente para analizar la basicidad y acides de las muestras. Se empleó un pH metro marca: Hanna, modelo: pHep4-HI 98127, resolución 0,1 y

presición $\pm 0,1$ pH y $\pm 0,5$ °C. Para la toma de valores de pH se siguieron los pasos descritos continuación:

- El pH metro fue calibrado con soluciones buffer de pH 4,01; 7,00 y 10,01 de la misma marca que el equipo (Hanna).
- Una vez calibrado el equipo, los electrodos fueron enjuagados con agua destilada, sumergiéndolo durante 1 minuto, para que se encuentre sin residuos de soluciones buffer.
- Paso seguido se llenó un vaso de precipitación donde se vertieron 50 mL de las muestras de aceite dieléctrico logrando determinar el pH inicial de cada aceite dieléctrico.

2.2. DISEÑO DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PCB'S

2.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS BACTERIAS BIODEGRADORAS AEROBIAS Y ANAEROBIAS

La biodegradación aerobia y anaerobia inició con la preparación del inóculo bacteriano y el aislamiento de la cepa B₃₅₀ en estado liofilizado, compuesto de microorganismos premezclados con todos los nutrientes necesarios para su uso inmediato en remediación de suelos y tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos y otros elementos orgánicos y formulación bacteriana enriquecida con nutrientes biológicos y estimulantes, comercializada por la casa comercial Andean Water Treatment S.A. (AWT) de tratamiento de aguas. Este tipo de bacterias tiene la capacidad de trabajar tanto aerobia como anaeróticamente (catálogo de productos AWT especificado en el Anexo II) y fueron utilizadas en el proceso a diferentes condiciones de temperatura $22 \pm 2^\circ\text{C}$ y pH de 6 a 9, en función del medio al cual se realizó la biodegradación (Andean Water Treatment S.A., 2015, p. 11).

Los microorganismos empleados conformaron un consorcio bacteriano de 8 cepas que en su composición tuvieron cerca de 7 billones de microorganismos por gramo de consorcio, datos tomados de la hoja de especificación de las bacterias del catálogo de productos AWT del Anexo mencionado en el párrafo anterior. Las bacterias usadas en el tratamiento presentan afinidad con hidrocarburos y elementos orgánicos, como: benceno, tolueno, etil benceno, y xileno (Andean Water Treatment S.A., 2015, p. 11).

2.2.2. ACTIVACIÓN BACTERIANA Y PREPARACIÓN DEL PRE INÓCULO BACTERIANO

La activación bacteriana consistió en 3 etapas:

- Preparación del pre inóculo bacteriano
- Conteo o curva de crecimiento bacteriano
- Reproducción de los microorganismos.

Los dos aceites empleados en este proceso tuvieron diferentes concentraciones de PCB's, como se podrá observar en la Tabla 3.1. el aceite dieléctrico con mayor concentración fue empleado en el proceso de degradación anaerobia, ya que éste asegura un mejor rompimiento de enlaces carbono – cloro de moléculas más grandes, y el de menor concentración fue empleado para la degradación aerobia (Liu, 2004, p. 12).

Las cepas del consorcio bacteriano que se encontraron en estado liofilizado fueron activadas previamente, y se realizó mediante la fermentación en dos matraces distintos, un matraz para el medio aerobio y otro matraz para el medio anaerobio que tuvieron como fuente de carbono el aceite contaminado con bifenilos policlorados.

La pre inoculación se preparó para los medios de cultivo aerobio y anaerobio con criterios según (Reyes y Vásquez, 2002) que tuvieron como componentes: aceite

dieléctrico, bacterias y agua (elemento que actuó como activador de las bacterias liofilizadas que comercialmente fueron adquiridas).

Según Reyes y Vásquez (2002), se emplean en la incubación 1×10^6 microorganismos/mL de medio acuoso. Esta etapa no necesitó de un medio mínimo de sales para realizar la preparación del pre inóculo debido a que el consorcio bacteriano presentaba una mezcla de nutrientes y estimulantes de alta potencia necesarios y específicos para la sobrevivencia de los microorganismos (Andean Water Treatment S.A., 2015, p. 11).

Según Reyes y Vásquez (2002), se calculó la concentración de bacterias para el pre inóculo aerobio y según Liu (2004), para el pre inóculo anaerobio. La concentración de los pre inóculos bacterianos es diferente debido a la concentración de PCB's de los aceites dieléctricos.

Las cantidades de los reactivos y componentes que fueron utilizados para la preparación de los pre inóculos se presentan en la Tabla 2.1. y 2.2. Se emplearon los mismos elementos para cada matraz aerobio y anaerobio con capacidad de 1 litro, los cálculos de las cantidades presentadas en dichas tablas se muestran en el Anexo III.

Tabla 2.1. Componentes utilizados en la preparación del pre inóculo bacteriano aerobio

Componentes	Cantidad
Aceite dieléctrico contaminado	10 mg
Agua (Medio mínimo de sales)	1 000 mL
Bacterias	0,036 g/L

Tabla 2.2. Componentes utilizados en la preparación del pre inóculo bacteriano anaerobio

Componentes	Cantidad
Aceite Dieléctrico contaminado	10 mg
Agua (Medio Mínimo de Sales)	1 000 mL
Bacterias	0,012 g/L

En la Figura 2.1. se presenta como ejemplo la activación de la cepa bacteriana aerobia, empleando agua, aceite, y bacterias enriquecidas.

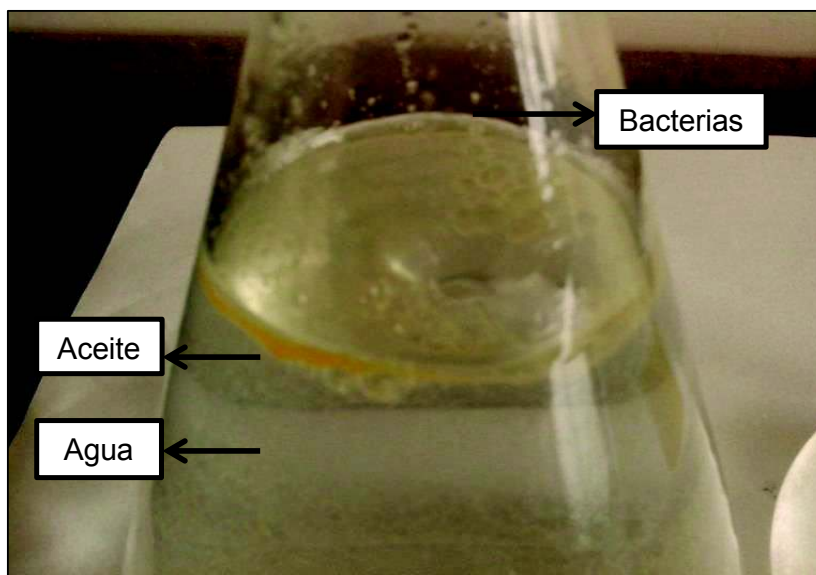


Figura 2.1. Activación de cepa bacteriana empleada en la biodegradación aerobia

La Figura 2.1. muestra el caldo de cultivo de la cepa bacteriana empleada en la biodegradación aerobia realizado en un matraz aforado, que tiene como resultado una solución bifásica de agua, aceite y bacterias enriquecidas. Los componentes fueron agregados a cada matraz y adoptaron las condiciones de estabilización en medio aerobio y anaerobio mostradas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Condiciones de estabilización de los pre inóculos aerobio y anaerobio

Pre inóculo	pH	Aireación [cm ³ /min]
Aerobia	7	60
Anaerobia	7	-

La aireación fue efectuada únicamente en el pre inóculo bacteriano aerobio para aumentar la cantidad de oxígeno en el caldo de cultivo (Reyes y Vásquez , 2002, s/p), mientras que para el pre inóculo anaerobio se mantuvo sellado herméticamente el matraz. El pH de cada preinóculo fue determinado mediante

controles diarios, para que los microorganismos sobrevivan, y se pueda continuar con el proceso de descontaminación. La pre inoculación fue necesaria para activar las bacterias en estado liofilizado y adaptarlas al medio constituido por aceite dieléctrico contaminado con PCB's. El tiempo empleado en el proceso de pre inoculación para los medios de cultivo aerobio y anaerobio tuvo duración de 7 días a temperatura ambiente (Reyes y Vásquez , 2002, s/p).

Luego de los siete días de incubación se continuó la siguiente etapa de activación bacteriana y el esquema del pre inóculo aerobio y anaerobio puede visualizarse en la Figura 2.3. (Reyes y Vásquez , 2002, s/p).

2.2.3. CURVA DE CRECIMIENTO BACTERIANO

Al término de los siete días de incubación de las bacterias se realizó el conteo bacteriano mediante recuento en la cámara de Petroff-Hauser, método directo de medida del número de células, aplicable a cualquier suspensión de partículas microscópicas (Manacorda *et al.*, 2007, p. 3).

Se tomaron muestras de 1 mL de caldo de cultivo tanto del pre inóculo aerobio como del pre inóculo anaerobio y se realizaron diluciones 1:10 desde 1×10^{-1} hasta 1×10^{-10} , cada dilución fue realizada a partir de la anterior colocándose en tubos de ensayo para el conteo bacteriano aerobio y anaerobio respectivo.

Con una pipeta serológica se tomó una gota de la primer dilución 10^{-1} y se colocó dentro de la cámara de recuento de Petroff-Hauser, se tapó la muestra con un portaobjetos cuidando que no existan burbujas que interfieran y a continuación la cámara de Petroff-Hauser fue llevada a un microscopio para el conteo de microorganismos presentes, en el cual se logró observar las células y el conteo microscópico con una resolución del lente de 40x. Los datos del conteo bacteriano fueron tabulados, obteniendo el promedio de #células/mL de solución bacteriana del pre inóculo aerobio y anaerobio, presentados en la sección 3.2.1.

Finalmente se obtuvo la curva de crecimiento bacteriano [#células/mL] vs tiempo y a partir del cálculo de su pendiente se dedujo en fase logarítmica la constante cinética de crecimiento de los cultivos en la etapa de pre inoculación (Romero, 2007, p. 646).

La cinética de crecimiento de la población bacteriana en medio aerobio y anaerobio fue calculada empleando la curva de crecimiento bacteriano transformada de exponencial a logarítmica empleando las variables $\text{Ln}[\text{\#células/mL}]$ vs tiempo y se expresó mediante la Ecuación 2.5, que desarrollada de acuerdo a las variables de interés se formuló de acuerdo a la Ecuación 2.6.

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad [2.5]$$

$$m = \frac{\text{Ln}\left[\frac{\text{\#células}}{\text{mL}}\right]_f - \text{Ln}\left[\frac{\text{\#células}}{\text{mL}}\right]_i}{t_f - t_i} \quad [2.6]$$

Donde:

m : Pendiente de la curva $\text{Ln}\left[\frac{\text{\#células}}{\text{mL}}\right]$ vs tiempo

Δy : Variación de $\text{Ln}\left[\frac{\text{\#células}}{\text{mL}}\right]$

Δx : Variación del tiempo [s]

t_f : Tiempo final [s]

t_i : Tiempo inicial [s]

Para encontrar la constante cinética del crecimiento bacteriano, se empleó la Ecuación que describe el tiempo de generación (g) en que una bacteria tarda en duplicarse y se describe en la Ecuación 2.7 y 2.8 (Romero, 2007, pp. 647, 648).

$$m = \frac{\ln[2N] - \ln[N]}{g} \quad [2.7]$$

$$m = \frac{\ln[2]}{g} \quad [2.8]$$

Donde:

N : Número de células

$2N$: Número de células duplicadas en el tiempo de generación

g : Tiempo de generación [s]

Se definió a k (constante de la velocidad de crecimiento) y la relaciona con g del modo que se expresa en la Ecuación 2.9 según Madigan *et al.* (2004).

$$K = \frac{\ln[2]}{g} \quad [2.9]$$

La curva de crecimiento bacteriano indicó la reproducción de los microorganismos en medio aerobio y anaerobio, y permitió seguir con la etapa de reproducción. Los cálculos realizados para la cinética de crecimiento bacterianos se muestran en el Anexo IV.

2.2.4. REPRODUCCIÓN DE MICROORGANISMOS

Una vez obtenida la curva de crecimiento se procedió a activar el inóculo bacteriano aerobio y anaerobio a partir de cada pre inóculo, para esto los inóculos tuvieron un tiempo de incubación de siete días a temperatura ambiente. A partir de los siete días de incubación de los inóculos bacterianos, se inició el proceso de biodegradación de las bacterias en cada uno de los biorreactores aerobios y anaerobios.

En la Tabla 2.4. se muestran las cantidades y componentes de los inóculos aerobio y anaerobio.

Tabla 2.4. Activación del inóculo bacteriano aerobio y anaerobio

Componentes	Cantidad
Aceite dieléctrico contaminado	10 [mg]
Agua (Medio mínimo de sales)	1 000 [mL]
Bacterias (pre inóculo)	10 [mL]

2.2.5. BIODEGRADACIÓN DE ACEITE DIELECTRICO EN REACTORES AEROBIOS

En la Figura 2.2. se muestra de manera esquemática todo el proceso para la puesta en marcha de un reactor aerobio en un período de 15 semanas.

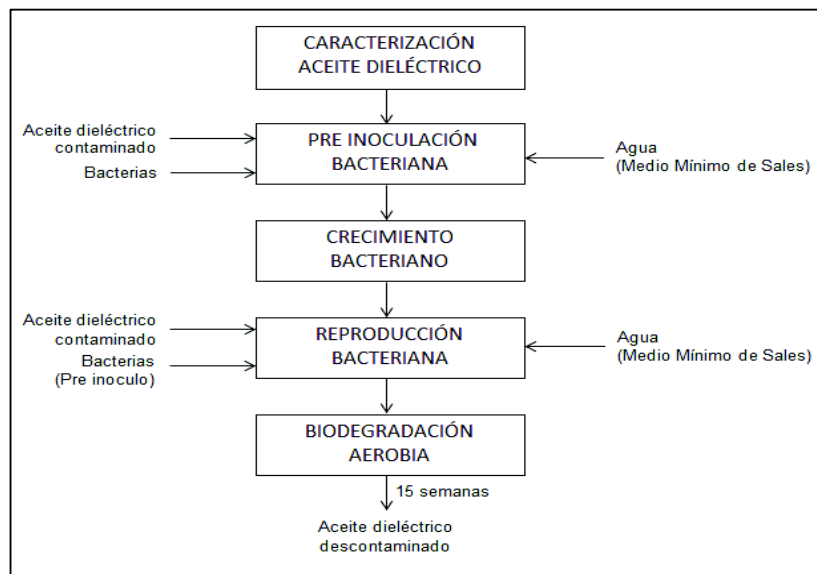


Figura 2.2. Esquema del proceso de la puesta en marcha del sistema de biodegradación aerobia

El diagrama mostrado en la Figura 2.2. representa las etapas que se necesitaron para que los sistemas de biodegradación aerobia llevaran a cabo la biodegradación sobre el aceite contaminado con PCB's.

Se manejó inicialmente la caracterización del aceite dieléctrico de acuerdo a sus propiedades físicas, seguido de la preinoculación realizada en matraces que contenían aceite dieléctrico contaminado, bacterias y agua.

El tiempo de espera de esta etapa fue de siete días donde se logró el crecimiento bacteriano y se realizó el conteo de bacterias sobrevivientes del preinóculo aerobio, posteriormente la reproducción bacteriana del inóculo se formó partir de las bacterias del antes pre inóculo, aceite dieléctrico contaminado y agua. Una vez concluida la tercera fase de activación de los microorganismos, se

procedió a masificar en reactores de vidrio para darles las condiciones de la Tabla 2.5. necesarias y específicas para cada sistema.

Los tres reactores con un volumen de dos litros iniciaron el proceso de biodegradación aerobia de PCB's simultáneamente y en igual relación de componentes que el matraz de incubación original especificados en la Tabla 2.4. y operaron paralelamente durante 15 semanas a una temperatura ambiente de 22 ± 2 °C para salvaguardar la supervivencia de las bacterias (Andean Water Treatment S.A., 2015, p. 11).

En este proceso, los componentes fueron calculados para un volumen de dos litros. De esta manera cada reactor aerobio estuvo compuesto por 20 mg de aceite dieléctrico, 20 mL de inóculo bacteriano y 2 000 mL de agua que es utilizada como medio activador de las bacterias. Las condiciones de pH, agitación y aireación utilizadas se detallan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Condiciones de masificación de bacterias en los reactores de biodegradación aerobia a temperatura ambiente ($T=22 \pm 2$ °C)

Biorreactor Aerobio	pH	Aireación [cm ³ /min]	Agitación
1	6,2	60	NO
2	6,8	70	NO
3	6,2	60	SI

La aireación en los biorreactores aerobios fue proporcionada mediante un compresor, que burbujeó aire a condiciones ambientales durante las 15 semanas de experimentación y la cantidad de aire suministrado fue regulado por un medidor de flujo (rotámetro) de acuerdo a las condiciones de cada sistema.

La Figura 2.3. muestra el esquema para los reactores aerobios que cuentan con un sistema de aireación, en el que se observan como partes del sistema, el biorreactor aerobio y la bomba de vacío para crear un burbujeo mediante un tubo en "L".

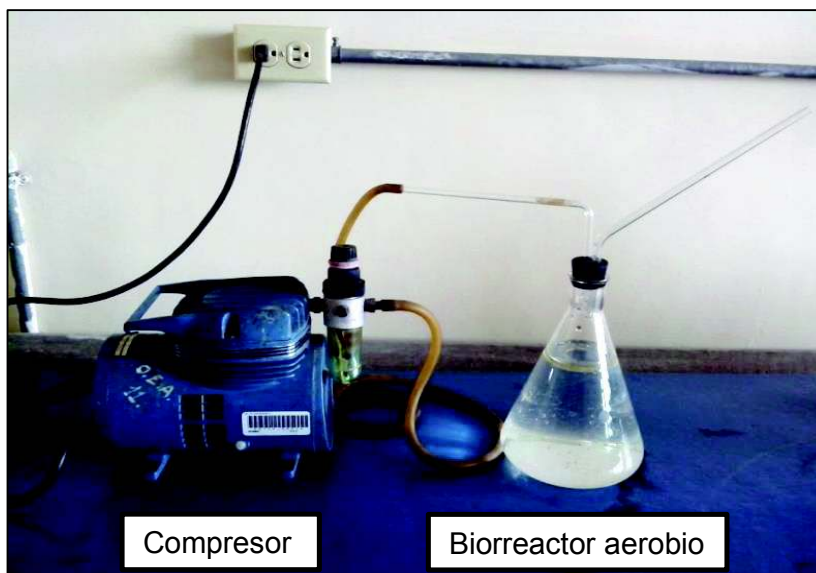


Figura 2.3. Esquema de la puesta en marcha del reactor aerobio

Cada biorreactor se manejó a diferentes condiciones, como se mostró en los datos de la Tabla 2.5. para encontrar el mejor escenario de supervivencia de microorganismos y del proceso de remoción de contaminantes de PCB's, y posteriormente se definieron los mejores parámetros para el proceso de biodegradación aerobia.

Arrancados los procesos de biodegradación de los reactores aerobios se controlaron las condiciones de pH, temperatura, agitación y aireación diariamente tres veces al día durante las 15 semanas, con lo que se aseguraron las condiciones de los biorreactores durante todo el período de biodegradación.

2.2.6. BIODEGRADACIÓN DE ACEITE DIELECTRICO EN REACTORES ANAEROBIOS

La Figura 2.4 muestra de manera esquemática todo el proceso descrito hasta el momento para la puesta en marcha de un reactor anaerobio para la biodegradación de aceite dieléctrico contaminado con PCB's. El aditamento de sustratos adicionales (*Tween 80* y metanol) a los empleados en el inóculo y pre inóculo, se realizó para asegurar una mejor eficiencia de la biodegradación, el

metanol fue añadido como un sustrato que actuó como fuente de carbono para producir las enzimas y coenzimas de los enlaces carbono-cloro correspondientes a las moléculas de PCB's (Liu, 2004, pp. 11-13).

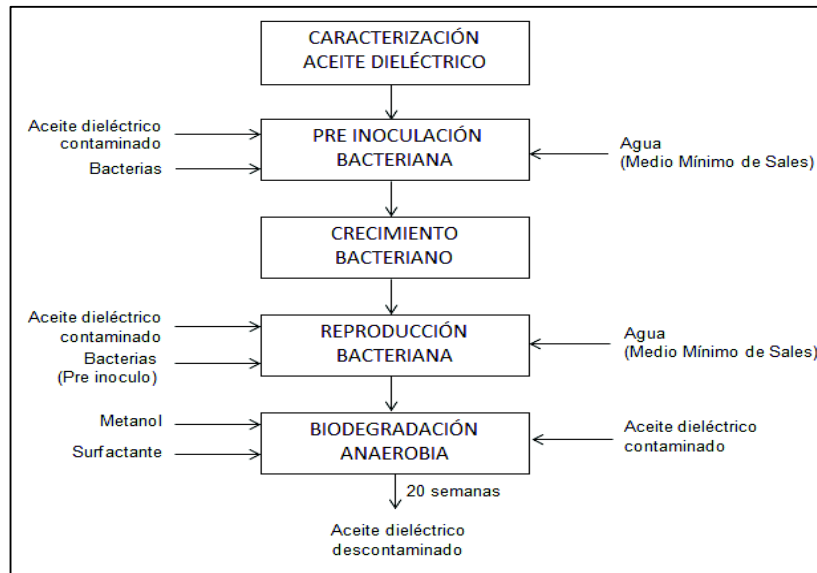


Figura 2.4. Esquema del proceso a la puesta en marcha del sistema de biodegradación anaerobia

El diagrama mostrado en la Figura 2.4. representó las etapas que se necesitaron para que los sistemas de biodegradación anaerobia actúen sobre el aceite contaminado con PCB's, inicialmente se manejó la caracterización del aceite dieléctrico de acuerdo a sus propiedades físicas, seguido de la preinoculación realizada en matraces que contenían aceite dieléctrico contaminado, bacterias y fueron aforados con agua, el tiempo de espera de esta etapa fue de siete días en los que se dió el crecimiento de los microorganismos y a partir del cual se realizó el conteo de bacterias sobrevivientes que actuaron en la reproducción del inóculo formado a partir del preinóculo, aceite dieléctrico contaminado y agua.

De esta manera se inició con la biodegradación anaerobia mediante la reproducción de los microorganismos en reactores de tres litros de capacidad, y un tiempo de residencia de 20 semanas, este proceso se diferenció del aerobio ya que existió una adición de metanol y surfactante (*Tween 80*) que ayudó a la eficiencia del proceso.

Los constituyentes del reactor anaerobio tuvieron una relación de 1:40 de aceite dieléctrico en volumen del reactor, además se empleó como agente tensoactivo surfactante hidrofílico (*Tween 80*) y fue añadido en igual cantidad que el aceite, esta sustancia fue empleada para homogenizar la solución respecto a la viscosidad entre el agua y el aceite dieléctrico, como también para incrementar la biodisponibilidad de las moléculas de los contaminantes orgánicos (Liu, 2004, p. 33).

La Tabla 2.6. muestra las cantidades de los componentes de la alimentación inicial en los biorreactores anaerobios.

Tabla 2.6. Componentes empleados en los biorreactores anaerobios

Componentes	Cantidad [mg/L]
Metanol	1 000
Microorganismo anaerobios	7 000

En la biodegradación anaerobia, se implementa una tasa de carga diaria de 0,25 g/L en base a metanol que contuvo aceite contaminado con PCB's en una concentración de 0,0125 mg/L/día, para la demanda química de oxígeno (DQO), esta alimentación se realizó mediante una bureta que dosificó durante una hora la carga y se empleó un agitador que homogeneizó la solución dentro del reactor. La tasa de carga diaria se efectuó cada siete horas. (Liu, 2004, p 59).

Todo el proceso fue operado en un biorreactor anaeróbico con salida para metano y una tasa de carga diaria alimentada por una bureta y un agitador para mezclar uniformemente la mezcla.

- **Condiciones de trabajo de los reactores anaerobios**

La biodegradación anaerobia de los 3 biorreactores empezó simultáneamente y se operaron de la misma forma que los biorreactores aerobios en condiciones

específicas y únicas durante 20 semanas a condiciones de pH y tasa de carga calculadas en el Anexo V y descritas en la Tabla 2.7. a temperatura ambiente ($T=22 \pm 2$ °C).

Tabla 2.7. Condiciones de masificación de bacterias en los reactores de biodegradación anaerobia a temperatura ambiente ($T=22 \pm 2$ °C)

Biorreactor Anaerobio	pH	Tasa de carga en base a metanol [g/L/día]	Agitación durante la adición de la tasa de carga
1	6,2	0,20	SI
2	6,4	0,25	SI
3	6,6	0,30	SI

Los tres biorreactores fueron monitoreados tres veces al día, donde se realizaron las adiciones de la tasa de carga diaria junto con una agitación para homogeneizar la solución metanol, agua, aceite y tensoactivo. La agitación tuvo una duración de una hora aproximadamente y únicamente fue utilizada para mezclar los componentes de la tasa de carga diaria con los existentes dentro de los reactores anaerobios. La Figura 2.5. muestra el esquema de los sistemas de biodegradación anaerobia puestos en marcha.

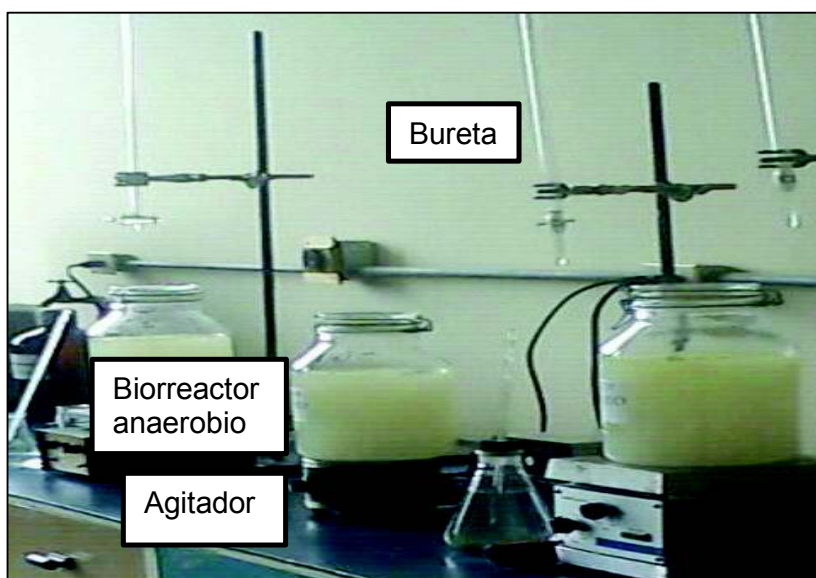


Figura 2.5. Esquema de la puesta en marcha de los reactores anaerobios

La Figura 2.5. indicó los tres sistemas de biodegradación anaerobia, que constan de las mismas partes y características físicas como: biorreactor anaerobio de material de vidrio con tapa hermética y capacidad de 3 litros, agitador magnético y bureta de dosificación, que fueron empleados para suministrar la tasa de carga diaria en base a metanol a cada reactor.

2.2.7. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LAS MUESTRAS INTERMEDIAS Y FINALES MEDIANTE CROMATOGRAFÍA DE GASES

Las muestras tomadas cada tres semanas junto a su paralela a partir de la puesta en marcha en cada biorreactor aerobio y anaerobio fueron analizadas mediante cromatografía de gases, siguiendo la norma ASTM D 4059-00. Esta norma incluye condiciones de operación para los análisis por cromatografía de gases de PCB's, que se especifican en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Condiciones de operación del cromatógrafo de gases de acuerdo a la norma ASTM D 4059-00

Características	Condiciones
Detector	FID
Puerto de inyección	Split
Temperatura del puerto de inyección	250 °C
Temperatura de la columna isotérmica	165 a 200 °C
Temperatura del detector	280 a 400 °C
Tipo de columna	Columna Capilar
Material de columna	Sílica Fundida

A partir del método detallado en la norma ASTM D 4059-00 se desarrolló un procedimiento en el laboratorio donde se analizaron las muestras por cromatografía de gases, que fue empleado en el análisis de los congéneres contaminantes de PCB's, ya que se realizaron varias corridas de prueba para calibrar la sensibilidad del cromatógrafo, las condiciones de operación del equipo son presentadas en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Condiciones de operación del cromatógrafo de gases de acuerdo al método desarrollado a partir de la norma ASTM D 4059-00

	Variables	Condiciones
Detector	Tipo	Detector de ionización de llama (FID)
	Temperatura	300 [°C]
Inyector/Puerto de Inyección	Puerto	Split 1 a 1
	Volumen	1 [μl]
	Temperatura	250 [°C]
Horno	Temperatura inicial:	110 [°C]
	Tiempo inicial	1 [min]
	Rampa 1	Aumenta 5 [°C/min] hasta alcanzar 180 [°C]
	Rampa 2	Aumenta 2 [°C/min] hasta alcanzar 210 [°C]
	Máxima temperatura	210 [°C]
Tiempo	Tiempo total de la corrida	30 [min/muestra]
	Tiempo para equilibrar el método	0,5 [min]

El procedimiento permitió utilizar el cromatógrafo de gases con detector FID (Detector de ionización de llama) del laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional, se realiza de esta manera por que los escenarios ambientales y los diferentes equipos de cromatografía necesitan ajustarse a las condiciones propias del medio, no es lo mismo tener un equipo trabajando a presión atmosférica y temperatura ambiente de Quito que de Guayaquil, así como para obtener una mejor resolución y separación de los componentes de cada cromatograma.

Las características de la columna que se empleó en el análisis de cromatografía fueron:

- Tipo de columna capilar: sílica fundida
- Marca: PTETM – 5
- Longitud: 30 metros
- Diámetro interno: 0,25 mm

- Film 0,12 um
- Temperatura máxima de operación: 320 °C

2.2.7.1. Preparación y análisis de las muestras

La preparación y análisis por cromatografía de gases de las muestras de aceite contaminado con PCB's, se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 4059-00 y siguió con el siguiente procedimiento:

- Se prepararon las muestras tomadas de cada sistema de biodegradación aerobia y anaerobia que contenían de 10 a 20 gramos de aceite dieléctrico por cada litro de solvente (Hexano, marca: Baker Analyzed Reagent, concentración: grado pesticida).
- Las muestras se homogenizaron, paso en el cual el aceite se disolvió en el hexano y se formó una sola fase acuosa.
- Luego, cada muestra fue filtrada para evitar la existencia de interferencias y taponamientos en la inyección.
- El equipo de cromatografía de gases (marca: Perkin Elmer Precisely, modelo: Claurus 500) fue encendido, con un flujo de hidrógeno como gas portador de 413 685 Pa.
- Se cargó el método desarrollado en el equipo, y se esperó a que alcance la temperatura programada de 250 °C.
- Un volumen de 1 µl de cada muestra filtrada fue inyectada en el cromatógrafo y posteriormente se esperó 30 minutos de acuerdo a lo establecido en el método para la obtención de cada cromatograma.
- Las concentraciones de los PCB's encontrados en los cromatogramas obtenidos a partir de las muestras de cada bioreactor, se analizaron de acuerdo a la suma de áreas de los picos de cada componente.

Las Figuras que muestran los cromatogramas obtenidos de los sistemas aerobios y anaerobios analizados cada tres semanas y sus análisis en paralelo se presentan en el Anexo VI.

2.2.7.2. Análisis de datos obtenidos por cromatografía de gases

Para obtener las concentraciones de las muestras por cromatografía de gases de los reactores aerobios y anaerobios se analizan los datos del área de los picos de cada componente, de acuerdo a la Norma ASTM D 4059-00.

Para el valor medido del total de la suma de las áreas de los componentes, se multiplicó por el factor 10^6 , factor que recomienda el método desarrollado en el cromatógrafo de gases Perkin elmer, y factor que también es recomendado en la norma ASTM D 4059-00, con lo que se obtuvo el valor de las áreas para cada componente de PCB's de las muestras tomadas (Olguín, Pérez, 2004, pp. 21-27).

Al concluir con el procesamiento de datos de las áreas totales, éstas fueron tabuladas y mediante la curva de calibración específica para cada biodegradación aerobia y anaerobia se logró obtener las concentraciones de PCB's presentes de todas las muestras a lo largo de la experimentación tomadas cada tres semanas con sus paralelas y de esta manera se obtuvo la cantidad de remoción de PCB's, el ejemplo de cálculo de las concentraciones de los contaminates presentes en los aceites dieléctricos degradados se presentan en el Anexo VII.

2.2.8. DISEÑO DEL REACTOR EN EL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE ACEITE DIELECTRICO CON PCB's

2.2.8.1. Dimensiones del reactor agitado

El diseño de los biorreactores aerobios y anaerobios se realizó de acuerdo a los criterios de dimensionamiento de tanques agitados en los cuales se especifican las medidas de un agitador de turbina para un recipiente, tal como se indica en la Figura 2.6. (McCabe y Smith, 2003, p. 268). Estos criterios fueron empleados para el diseño del mejor sistema de degradación que fue escogido de acuerdo al biorreactor aerobio o anaerobio que contiene mayor porcentaje de remoción de

contaminantes de PCB's y discutido en el ítem 3. resultados y discusión de resultados.

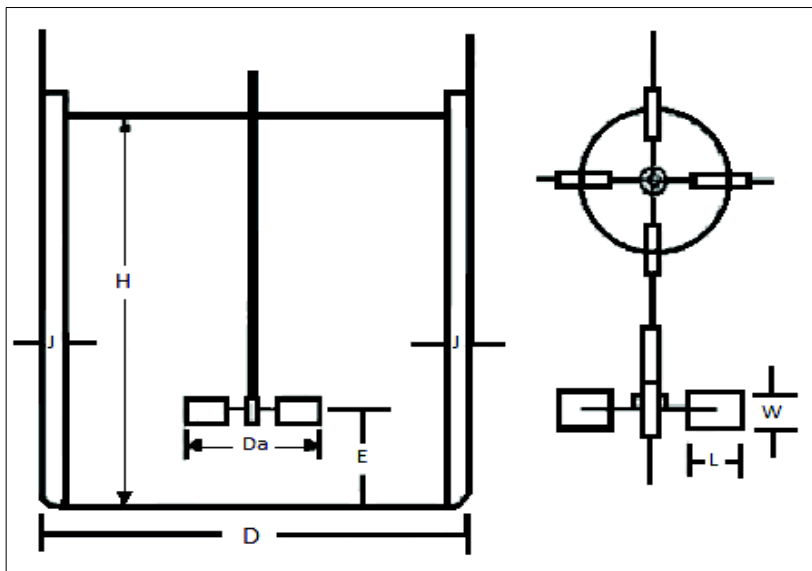


Figura 2.6. Medidas de un agitador de turbina
(McCabe y Smith, 2003, p. 268)

La Figura 2.6. presenta las dimensiones consideradas en el diseño del sistema de agitación y sus magnitudes se determinaron en función de las Ecuaciones 2.11 a la 2.16 (McCabe y Smith, 2003, pp. 268-270).

$$\frac{D_a}{D_r} = \frac{1}{3} \quad [2.11]$$

$$\frac{h_{f-r}}{D_r} = 1 \quad [2.12]$$

$$\frac{E}{D_r} = 1 \quad [2.13]$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad [2.14]$$

$$\frac{L_p}{D_a} = \frac{1}{4} \quad [2.15]$$

$$\frac{J}{D_r} = \frac{1}{12} \quad [2.16]$$

Donde:

D_r : Diámetro interno del reactor [m]

H : Altura del líquido en el tanque [m]

- D_a : Diámetro de la paleta del agitador [m]
 W : Altura de la paleta del agitador [m]
 E : Altura de la base del tanque al agitador [m]
 J : Ancho del deflector [m]
 L : Largo de la paleta del agitador [m]
 h_{f-r} : Altura entre el nivel del líquido dentro del reactor y la paleta del agitador [m]

La distancia h_{f-r} es el espacio entre la base del reactor y la paleta del agitador, la altura del reactor h_r menos la distancia entre el reactor se considera como la longitud del agitador, el largo de la paleta L_p es considerado como la cuarta parte del diámetro del reactor, y la altura de la paleta W mide la quinta parte de la longitud del diámetro del reactor (McCabe y Smith, 2003, pp. 268-270). Los cálculos del diseño del biorreactor y sus dimensiones se presentan en el Anexo VIII.

Las diferentes variables expresadas en las Ecuaciones 2.11 hasta la 2.16 indican las dimensiones necesarias y los factores de forma correspondientes a un tanque agitado, e involucran las observaciones tales que: el diámetro del agitador D_a debe ser un tercio del diámetro total del reactor.

2.2.8.2. Potencia del agitador

La potencia del agitador fue calculada a partir de la variable adimensional del número de Reynolds (N_{Re}) de acuerdo a la Ecuación 2.17 (McCabe y Smith, 2003, pp. 270-280).

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 \times N \times \delta}{\mu} \quad [2.17]$$

$$N_{Re} = \frac{\left(\frac{D_r}{3}\right)^2 \times N \times \delta}{\mu} \quad [2.18]$$

Donde:

- N_{Re} : Número de Reynolds
 D_a : Diámetro del agitador [m]
 N : Número de revoluciones por minuto [rpm]
 μ : Viscosidad dinámica de la mezcla [kg/m.s]
 δ : Densidad de la mezcla [kg/m³]

La variable adimensional del número de Reynolds N_{Re} , relaciona además de variables de diseño del reactor, propiedades físicas propias de la mezcla dentro de él, por lo que se requiere del cálculo de la densidad de la mezcla a partir de la densidad de sus componentes líquidos, y de su viscosidad.

2.2.8.3. Densidad de la mezcla

La densidad de la mezcla fue calculada de acuerdo a las fracciones de los componentes líquidos constituyentes en la solución, la cual fue hallada de acuerdo a la Ecuación 2.19.

$$\delta = \frac{M_{Mezcla}}{V_{Mezcla}} = \frac{\delta_{Agua} \times V_{Agua} + \delta_{aceite} \times V_{aceite} + \delta_{inóculo} \times V_{inóculo}}{V_{Agua} + V_{aceite} + V_{inóculo}} \quad [2.19]$$

2.2.8.4. Viscosidad de la mezcla

El valor de la viscosidad, propiedad física de la mezcla, fue estimado directamente como la viscosidad del agua a temperatura de 22 °C, ya que en los biorreactores su composición tienen agua en mayor parte que de otros componentes, este dato fue obtenido a partir del Manual del Ingeniero Químico (Perry R., Green D., 2001, p. 2-329). En la Figura 2.7. se muestra la gráfica del número de Reynolds relacionada con el número de potencia en un reactor.

Con el número de Reynolds y la gráfica característica para agitadores de la Figura 2.7. se determinó el valor de N_p Número de potencia acorde a la Ecuación 2.21.

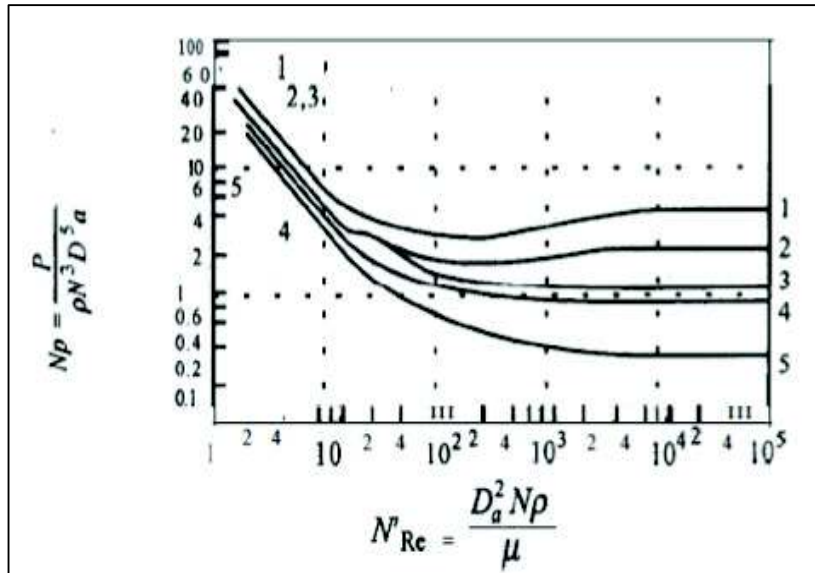


Figura 2.7. Número de Reynolds con relación al número de potencia (McCabe y Smith, 2003, p. 276)

Estimado el Número de potencia N_p , se encuentra la potencia del agitador empleando su Ecuación por definición (McCabe y Smith, 2003, p. 276).

$$P = N_p \times \delta \times N^3 \times D_a^5 \quad [2.20]$$

Donde:

P : Potencia del agitador [W]

N_p : Número de potencia

δ : Densidad de la mezcla [kg/m^3]

D_a : Diámetro del agitador [m]

N : Número de revoluciones del agitador [150 rpm]

2.2.8.5. Temperaturas de operación y diseño

- Temperatura de operación

La temperatura de operación que se empleó en este trabajo fue la temperatura correspondiente a las condiciones experimentales de cada biorreactor, en el

laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional donde se llevó a cabo la experimentación de acuerdo a Liu (2004) y Reyes y Vásquez (2002).

Los datos tabulados se manejaron de acuerdo a los mediciones diarias presentadas en el Anexo IX, donde se obtuvo el promedio de todas las medidas tabuladas para cada biorreactor y la desviación de los datos registrados.

Las Ecuaciones 2.21 y 2.22 muestran el cálculo del promedio de las temperaturas de los biorreactores.

$$T_{media/reactor} = \frac{\sum T}{\# \text{ días monitoreadas} \times 3} \quad [2.21]$$

$$T_{media/proceso} = \frac{\sum T_{media/reactor}}{6 \text{ biorreactores}} \quad [2.22]$$

Donde:

T : Temperaturas medidas periódicamente (3 veces/día/biorreactor) [°C]

$T_{media/reactor}$: Temperatura media de cada biorreactor [°C]

$T_{media/proceso}$: Temperatura media de todo el proceso [°C]

- **Temperatura de diseño**

La temperatura de diseño fue calculada de acuerdo a la Ecuación 2.23, que especifica la relación entre la temperatura de diseño y la temperatura de operación de un sistema que trabaja con una presión de operación en un rango de 120 – 650 °F, que en el Sistema Internacional de Unidades (SI) equivaldría a un rango de 48,9 - 343,3 °C (Sinnot y Towler, 2008, p. 980).

$$T_{diseño} = T_{operación} + 50 \text{ } ^\circ F \quad [2.23]$$

La Ecuación 2.23 transformada al Sistema (SI), nos da como resultado la Ecuación 2.24.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 10^{\circ}\text{C} \quad [2.24]$$

2.2.8.6. Presiones de operación y diseño

- Presión de operación

La presión interna fue aquella presión que se requirió en el proceso del que forma parte el biorreactor, a la cual normalmente se trabajó. La presión de operación para un reactor aerobio, tuvo aportes de la presión atmosférica que se encuentra encima del tanque por tratarse de un sistema abierto, y la presión hidrostática.

La presión de operación para un reactor anaerobio, únicamente tendrá el aporte de la presión que ejerce el líquido sobre la base del tanque, es decir su presión de operación será la misma que la presión hidrostática (León, 2001, p. 10). Se emplean para el cálculo de la presión de operación en sistemas aerobios y anaerobios las siguientes relaciones.

$$P_{\text{operación aerobia}} = P_{\text{hidrostática}} + P_{\text{atm}} = (\delta \times g \times \text{altura líquido}) + P_{\text{atmosférica}}$$

$$P_{\text{operación anaerobia}} = P_{\text{hidrostática}} = \delta \times g \times \text{altura líquido}$$

- Presión del diseño

La presión que se empleó en el diseño del biorreactor, se satisface siendo un 10% del valor de la presión de operación (León, 2001, p. 10). La presión de diseño se calculó mediante la Ecuación 2.24 que se muestra a continuación.

$$P_{\text{diseño}} = 0,10 (P_{\text{operación}}) \quad [2.24]$$

Los balances de masa empleados en todo el procedimiento de biodegradación se muestran en el Anexo X, donde se encuentran calculados los valores de los

componentes necesarios para la puesta en marcha de los sistemas aerobios y anaerobios.

2.3. OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE DEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA DE ACEITES DIELECTRICOS CONTAMINADOS CON PCB'S EN UN PERÍODO DE 15 Y 20 SEMANAS

Para obtener el proceso más adecuado que aportó con la mayor remoción de contaminantes, se realizó una comparación de los biorreactores de acuerdo a los ensayos aerobio y anaerobio presentados en las Tablas 2.10. y 2.11. Estos ensayos se agrupan conforme a las condiciones de operación de cada uno de los sistemas, de esta manera y de acuerdo a las variables de operación se muestran en las Tablas 2.10 y 2.11.

Tabla 2.10. Comparación entre las condiciones de los sistemas aerobios

Proceso	pH	Aireación [cm ³ /min]	Agitación	Temperatura [°C]	Tiempo de ensayo
Aerobio 1	6,2	60	NO	22	15 semanas
Aerobio 1	6,8	70	NO	22	15 semanas
Aerobio 1	6,2	60	SI	22	15 semanas

Tabla 2.11. Comparación entre las condiciones de los sistemas anaerobios

Proceso	pH	Tasa de carga de Metanol [g/L/día]	Agitación	Temperatura [°C]	Tiempo de ensayo
Anaerobio 1	6,2	0,20	NO	22	20 semanas
Anaerobio 1	6,4	0,25	NO	22	20 semanas
Anaerobio 1	6,6	0,30	NO	22	20 semanas

A partir de los ensayos de las Tablas 2.10. y 2.11 y una vez cumplido el tiempo de biodegradación (15 semanas sistemas aerobios y 20 semanas sistemas

anaerobios) se realizó el cálculo de las concentraciones de contaminantes de PCB's presentes en cada muestra de los procesos aerobios y anaerobios y con la concentración inicial de PCB's se determinó el porcentaje de remoción de los contaminantes del aceite dieléctrico.

Una vez finalizado el tiempo de ensayo, se seleccionó el sistema en el cual existió mayor remoción de PCB's, considerando que este biorreactor es el más adecuado, y el que contó con las condiciones más óptimas para ser diseñado a escala de laboratorio y así mismo llevado al diseño en una planta piloto.

2.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS SISTEMAS DE BIODEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA

La evaluación económica del proyecto de biodegradación de aceites dieléctricos con PCB's se realizó sobre la base del balance de masa y energía de los sistemas de diseñados. La finalidad del mismo, es establecer la factibilidad de la ejecución del proyecto a escala industrial. Se consideró varios parámetros como:

- Inversión total
- Aporte del IESS de los trabajadores
- Mantenimiento de construcciones, maquinaria y equipos
- Tasas de seguro de maquinaria, materiales directos e indirectos, equipos y mano de obra

Posteriormente se cuantificaron los costos requeridos para la ejecución de cada proceso de biodegradación, y tomando en cuenta la duración de 20 semanas del proyecto, los costos fueron (Baca, 2001, pp. 159-181):

- Terrenos y construcciones
- Equipos (biorreactores, compresor)
- Equipos y muebles de oficina
- Instrumentación

- Instalación de equipos, accesorios primarios y secundarios
- Materia prima
- Insumos
- Nómina laboral
- Suministros (agua potable y luz eléctrica)
- Depreciación
- Costos de seguros

Se eligieron los costos de equipos teniendo en cuenta material, dimensiones, potencia y demás especificaciones técnicas. En el caso de los biorreactores y accesorios se solicitaron diferentes cotizaciones y se seleccionaron las más adecuadas en función de características y costos de acuerdo a CIMA proveedores.

Los costos de terreno y construcciones fueron tomados de la Cámara Industrial de la Construcción según el manual de costos publicado en febrero de 2016.

La depreciación de los activos se la realizó según lo establece el, Artículo 28, Numeral 6, del Reglamento para la aplicación Ley de Régimen Tributario Interno (LORTI).

Con los valores establecidos, se efectuó una matriz en MS Excel™ para cada proceso de biodegradación de PCB's, con esto se determinó el costo por cada tonelada de aceite dieléctrico a biodegradar (el mismo para los dos procesos).

El costo unitario se lo obtuvo en función del costo total del proyecto y las toneladas de aceite dieléctrico con PCB's que tiene el Ecuador almacenado según el último inventario realizado en el año 2009 por la PNUMA, la cantidad es 7 041,05 toneladas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DIELECTRICO CONTAMINADO CON PCB'S

En la caracterización de los aceites contaminados con PCB's, se realizaron análisis por cromatografía de gases de las muestras iniciales para conocer las concentraciones del contaminante (PCB) y a su vez se obtuvieron los resultados de los ensayos efectuados para conocer las propiedades físicas inherentes de los aceites dieléctricos.

3.1.1. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS MUESTRAS INICIALES DE ACEITES DIELECTRICOS POR CROMATOGRAFÍA DE GASES

Las muestras de aceite dieléctrico fueron obtenidas de las bodegas de pasivos ambientales de la Empresa Eléctrica Quito S.A., teniendo concentraciones de PCB's de 700 y 2 000 ppm con el congénere contaminante Aroclor 1254. Los resultados por cromatografía de gases fueron usados como datos de partida para evaluar la disminución de la concentración de PCB's. Las concentraciones determinadas tanto de las muestras entregadas por la Empresa Eléctrica Quito S.A. (EEQ S.A.) y las analizadas en los laboratorios del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Concentraciones del congénere 1254 presente en las muestras iniciales de aceites dieléctricos obtenidas por EEQ S.A. y las analizadas por el MEER

Muestra de aceite dieléctrico	Concentración EEQ S.A. [ppm]	Concentración (MEER) [ppm]	Tipo de PCB presente	Diferencia [ppm]	Porcentaje de Error
1	700	702	Aroclor 1254	2	0,28
2	2 000	1 918	Aroclor 1254	82	4,10

Los valores del porcentaje de error de la Tabla 3.1. muestran que no existe una diferencia mayor al 5% entre las concentraciones medidas en los Laboratorios del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) en relación con las concentraciones entregadas por la Empresa Eléctrica Quito S.A.

Las concentraciones de la Empresa Eléctrica Quito S.A. fueron reportadas a partir de metodologías internas para detección de PCB's. No se obtienen los respaldos de los análisis realizados por la Empresa Eléctrica Quito S.A., al ser aceites inventariados en bodega del año 2009 etiquetados con las concentraciones indicadas.

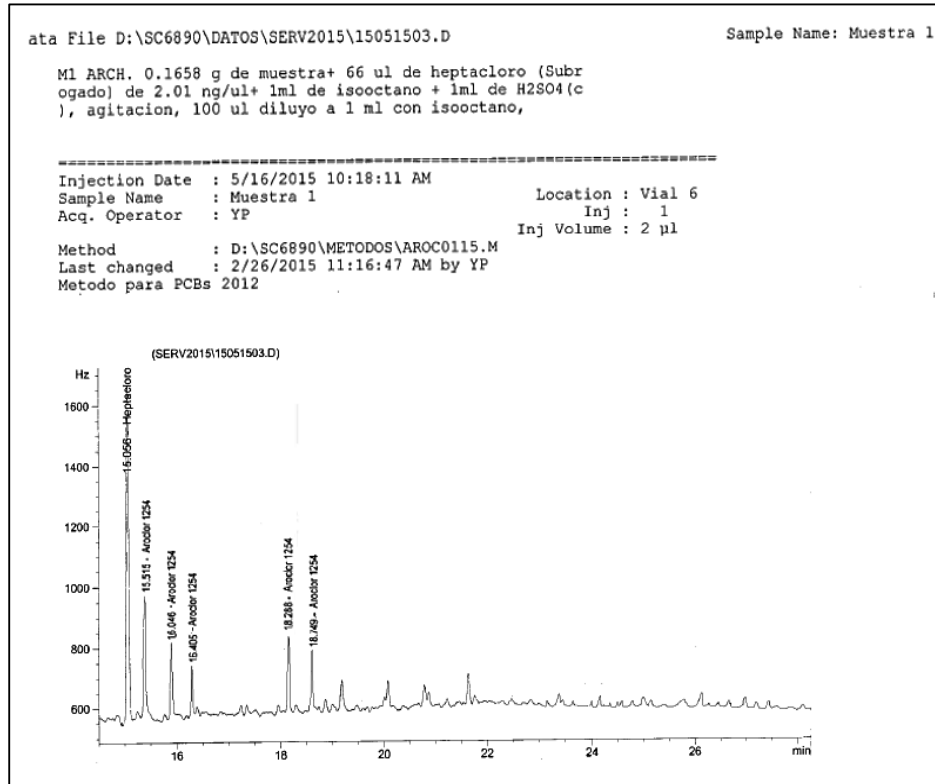
- **Cromatografía de gases de las muestras iniciales de aceite dieléctrico contaminado con PCB's**

Se esperaba una mezcla de congéneres de Aroclor 1254, 1260 y 1248 según Reyes y Vásquez (2000), pero acorde a la información presentada en la Figura 3.1. las muestras analizadas, evidencian la presencia únicamente de Aroclor 1254, uno de los congéneres más detectados en este tipo de aceites dieléctricos (Lopera *et al*, 2006, p. 76).

Por consiguiente la muestra con concentración de 702 ppm será empleada para biodegradación aerobia, y la muestra con concentración de 1 918 ppm para la biodegradación anaerobia, teniendo como contaminante Aroclor 1254 en ambas.

La Figura 3.1. a) y b) presentan los cromatogramas reportados para las muestras de aceites dieléctricos contaminados con PCB's de concentración de 702 ppm y 1 918 ppm respectivamente. El primer pico que aparece en los cromatogramas a similar tiempo de retención pertenece al solvente, que en este caso fue el heptacloro, se emplea solvente para que al realizar el análisis el aceite pueda disolverse y crear una muestra en fase líquida homogénea, se pueden emplear algunos solventes como heptacloro o hexano ambos grado pesticida según lo cita la Norma ASTM D 4059-00.

a)



b)

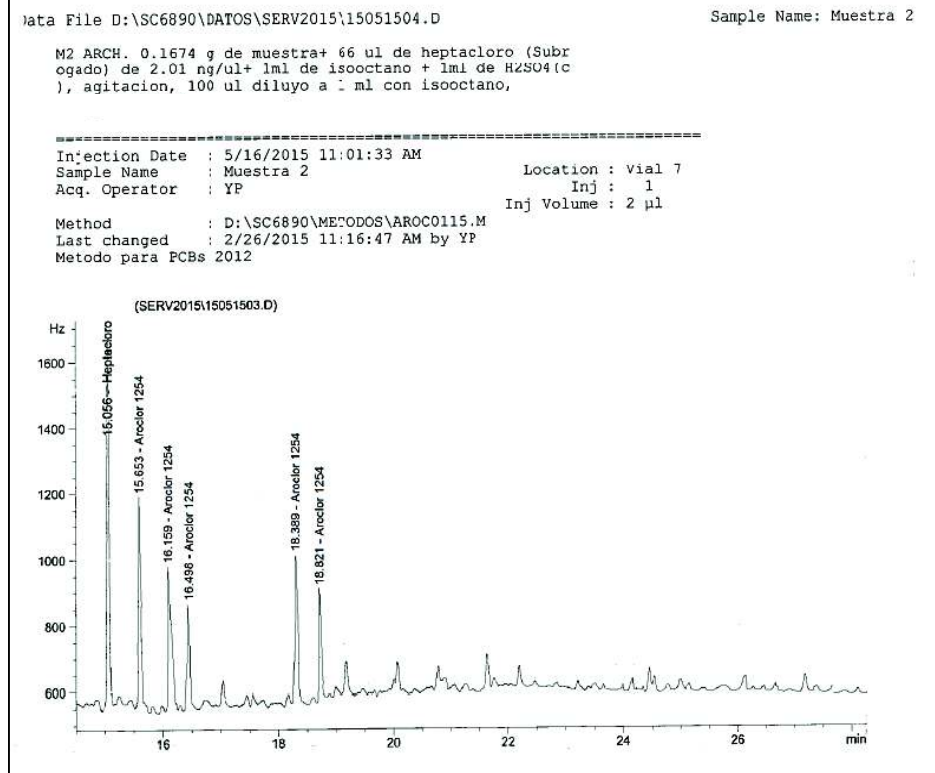


Figura 3.1. Cromatogramas reportados por los laboratorios del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) de la muestra de aceite contaminado con PCB's con concentración de a) 702 ppm y b) 1 918 ppm

Los tiempos de retención de los congéneres de Aroclor 1254 que se encontraron en los cromatogramas presentados en la Figura 3.1. a) y b) fueron tomados como referencia para la identificación de cada uno de los componentes en los análisis por cromatografía de las muestras de los aceites degradados tanto en los biorreactores aerobios como en los anaerobios y se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Tiempo de retención de los estándares de PCB's del aceite de 702 y 1 918 ppm respecto al tipo de Aroclor 1254

Tiempo de retención [min]	Nombre del compuesto
15,058	Heptacloro
15,515	Aroclor 1254
16,046	Aroclor 1254
16,405	Aroclor 1254
18,268	Aroclor 1254
18,749	Aroclor 1254

3.1.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS INICIALES DE LAS MUESTRAS DE ACEITES DIELECTRICOS

3.1.2.1. Análisis de densidad gravimétrica y peso específico de las muestras de aceites iniciales

Los ensayos de densidad gravimétrica y peso específico se rigieron a la norma ASTM D 1480-12. Los resultados de los ensayos de la densidad gravimétrica y peso específico de las muestras de los dos aceites dieléctricos son presentados en la Tabla 3.3.

En la información presentada en la Tabla 3.3. se evidencia que los aceites con diferente contenido de PCB's poseen diferentes densidades y pesos específicos, el aceite que contiene mayor cantidad de PCB's posee una densidad y peso específico mayor.

Tabla 3.3. Densidades gravimétricas y pesos específicos de las muestras iniciales de aceites dieléctricos de 702 y 1 918 ppm

Concentración de las muestras contaminadas	Densidad gravimétrica [kg/L]	Peso específico [N.m ³]	Método de análisis
702 ppm	1,251	$12,262 \times 10^3$	ASTM D 1480-12
1 918 ppm	1,310	$12,840 \times 10^3$	

Se podría esperar que la densidad de un aceite con mayor contenido de PCB's sea mayor que la de un aceite sin PCB's por su composición molecular, ya que los aportes de densidades de sus componentes hacen que la molécula adquiera mayor peso y a su vez mayor densidad. Este comportamiento se explicaría mediante el valor de la densidad de un aceite dieléctrico que presentan Murillo y Marchena (2006), el cual varía de 1,2 a 1,6 kg/L de acuerdo a la cantidad de PCB's contenidos en él líquido.

Los datos presentados en la Tabla 3.3. indicaron que las propiedades como la densidad y el peso específico de los aceites dieléctricos se ven afectadas por la cantidad de compuestos organoclorados que lo componen y sus concentraciones, en el caso de los análisis por cromatografía de gases se identificaron 5 congéneres de Aroclor 1254 reportando un porcentaje total de 52,54 % y 66,5 % de PCB's en las muestras de 702 ppm y 1 918 ppm respectivamente.

3.1.2.2. Análisis de potencial hidrógeno de las muestras de aceites iniciales

Como parte de las pruebas iniciales de caracterización de los aceites, también se realizaron los ensayos de pH de acuerdo con la norma APHA 4500 H-B. Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla 3.4. donde los valores de pH muestran que los congéneres de PCB's (Aroclor 1254) presentes en los aceites dieléctricos influyen en la basicidad de las muestras, y se consideraría que el valor de pH de cada aceite es directamente proporcional a la concentración de Aroclor; es decir, el aceite con mayor pH tiene mayor concentración de PCB's.

Tabla 3.4. Resultados de aceites dieléctricos de 702 y 1 918 ppm en ensayos de pH

Concentración de PCB's en el aceite contaminado [ppm]	pH	Método
702	8,3	APHA 4500 H-B
1 918	8,7	

Por lo general los aceites dieléctricos con compuestos organoclorados llegan a tener pH's de hasta 9,5; lo que nos lleva a deducir que el carácter básico de las muestras de aceite se debe a la mayor concentración de PCB's en él (Pico y Ramírez, 2002, p. 37). De esta manera los resultados de densidades, pesos específicos y pH's indicaron una relación directa y proporcional con la concentración de Aroclor en las muestras de aceite dieléctrico analizados.

3.2. DISEÑO DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PCB'S

El diseño del proceso de biodegradación aerobia y anaerobia fue comprendido desde la incubación de las bacterias, hasta la puesta en marcha en cada biorreactor aerobio y anaerobio; y el análisis periódico de cromatografía de gases cada tres semanas de las muestras obtenidas de cada sistema para determinar la degradación de contaminantes por PCB's.

3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS BACTERIAS BIODEGRADORAS AEROBIAS Y ANAEROBIAS

En las Tablas 3.5. (recuento aerobio) y 3.6. (recuento anaerobio) se presentan los resultados del recuento de microorganismos del pre inóculo aerobio y anaerobio mediante el método de Petroff-Hauser que se expresaron como [#células/mL] por cada muestra diluida.

Tabla 3.5. Recuento bacteriano aerobio para la determinación de #celulas/mL de solución

Dilución	Tiempo [h]	#Células por cuadrado contabilizadas					Promedio	#células/mL	ln[#células/mL]
		#1	#2	#3	#4	#5			
1,00E-01	30	184	169	160	170	186	173,80	2,17E+07	7,337
1,00E-02	28	85	102	111	122	126	109,20	1,37E+06	6,135
1,00E-03	26	91	92	94	84	99	92,00	1,15E+05	5,061
1,00E-04	24	50	51	43	69	60	54,60	6,83E+03	3,834
1,00E-05	22	26	25	20	46	18	27,00	3,38E+02	2,528
1,00E-06	8	15	40	20	21	18	22,80	2,85E+01	1,455
1,00E-07	6	15	14	19	13	16	15,40	1,93E+00	0,284
1,00E-08	4	8	7	6	5	5	6,20	7,75E-02	-1,111
1,00E-09	2	5	4	4	3	4	4,00	5,00E-03	-2,301
1,00E-10	0	2	1	1	0	2	1,20	1,50E-04	-3,824

Tabla 3.6. Recuento bacteriano anaerobio para la determinación de #celulas/mL de solución

Dilución	Tiempo (h)	#Células por cuadrado contabilizadas					Promedio	# células/mL	ln[#células/mL]
		#1	#2	#3	#4	#5			
1,00E-01	30	214	247	232	180	241	218.80	2,74E+07	7,437
1,00E-02	28	112	188	117	132	139	127.80	1,60E+06	6,203
1,00E-03	26	146	103	116	126	123	122.80	1,54E+05	5,186
1,00E-04	24	101	88	100	96	89	94.80	1,19E+04	4,074
1,00E-05	22	84	85	88	86	80	84.60	1,06E+03	3,024
1,00E-06	8	43	56	57	56	53	53,00	6,63E+01	1,821
1,00E-07	6	23	37	28	32	28	29.60	3,70E+00	0,568
1,00E-08	4	23	20	17	16	15	18.20	2,28E-01	-0,643
1,00E-09	2	13	7	9	8	10	9.40	1,18E-02	-1,930
1,00E-10	0	5	3	4	1	1	2.80	3,50E-04	-3,456

La Tabla 3.6. indica que durante el recuento bacteriano anaerobio la cantidad de bacterias disminuyó con la dilución del pre inóculo.

Los valores obtenidos en el recuento bacteriano aerobio presentados en la Tabla 3.5, demostraron que a mayor dilución del pre inóculo aerobio existió menor cantidad de bacterias aerobias presentes, con lo que se ha logrado una estimación de las poblaciones bacterianas en medio aerobio (Romero, 2007, p. 645).

Con los datos de las Tablas 3.5. y 3.6. se demostró que a la misma dilución, el pre inóculo anaerobio posee mayor cantidad de células contabilizadas que el pre inóculo aerobio. Esto se debería a que el medio anaerobio tiene mayor afinidad con las bacterias y el sustrato, dato que se evalúa en el ítem 3.3 referente a la optimización del mejor sistema de biodegradación.

- Curva de crecimiento bacteriano

Los resultados de concentración [#células/mL] presentados anteriormente en las Tablas 3.6. y 3.7. fueron empleados para obtener las curvas de crecimiento bacteriano aereobio y anerobio presentados en las Figuras 3.2. y 3.3.

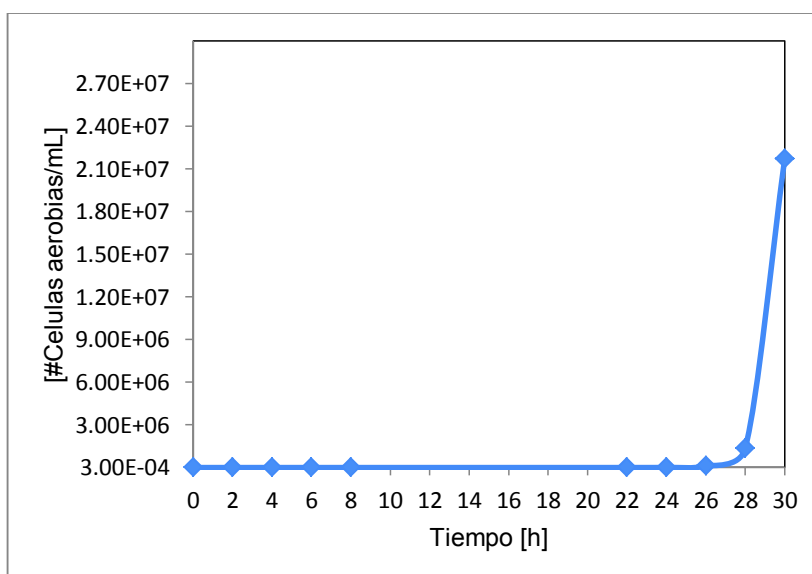


Figura 3.2. Curva de crecimiento bacteriano [# células/mL] de pre inóculo aerobio respecto al tiempo

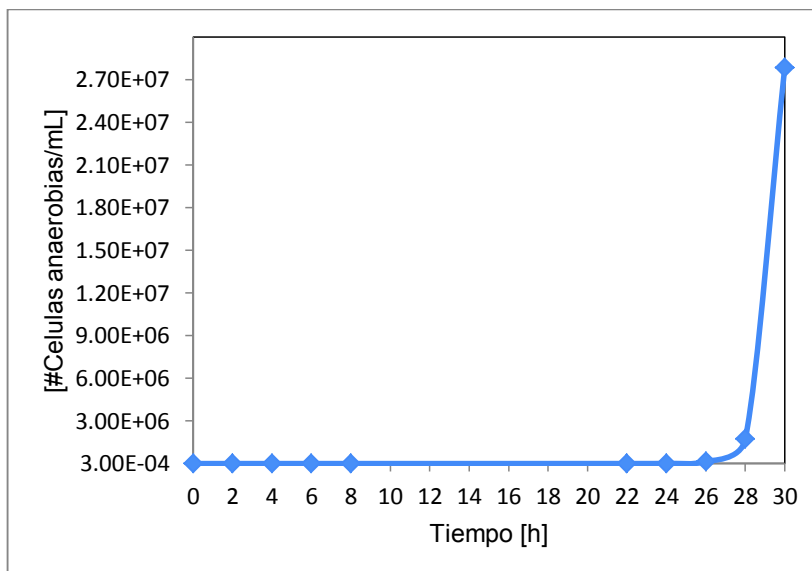


Figura 3.3. Curva de crecimiento bacteriano [# células/mL] de pre inóculo anaerobio respecto al tiempo

Las Figuras 3.2. y 3.3., evidencian que las bacterias en medio aerobio y anaerobio se encontraron en la fase exponencial de la curva de crecimiento bacteriano al cabo de 30 horas, en la cual los microorganismos se desarrollaron y crecieron exponencialmente, lo que denota que conforme pasa el tiempo la población aumenta (Romero, 2007, p. 646).

A simple vista las Figuras 3.2. y 3.3. se muestran iguales, por tratarse del mismo tipo de bacterias que están cultivándose en el medio, su diferencia está en los valores de las diluciones de los puntos finales, valores presentados en las Tablas 3.6. y 3.7.

La curva de crecimiento bacteriano, llegó hasta la etapa de crecimiento (logarítmica ó exponencial), fase en la que las células se multiplicaron; no se logró evidenciar la continuidad de la curva a mayor tiempo ya que el estudio de las bacterias mediante el método de Petroff-Hauser, únicamente se realiza hasta la dilución 1×10^{-10} (Romero, 2007, p. 645).

Al tiempo de 25 horas, la curva de crecimiento cambia su pendiente, este comportamiento se debe a que los microorganismos incubados pasan de la etapa de latencia (período en el que las bacterias se adaptan al medio y presentan gran

actividad metabólica) a la fase exponencial o logarítmica en la cual existió un aumento de los microorganismos dentro de la población bacteriana (Romero, 2007, p. 646).

Se calculó la cinética de crecimiento de la población bacteriana en medio aerobio y anaerobio empleando la deducción de pendientes de la región exponencial de las Figuras 3.2. y 3.3. y mediante la Ecuación 2.5 el valor encontrado para la pendiente en medio aerobio fue 1,392 y para medio anaerobio fue 2,303.

Con los valores obtenidos de la pendiente de la zona de crecimiento exponencial se determinaron los tiempos de generación (tiempo necesario para que una célula se divida), para las bacterias fue de 0,50 horas en el proceso aerobio y 0,30 horas para el proceso anaerobio; por lo que se deduce que las condiciones ambientales afectan a la velocidad de crecimiento exponencial según (Romero, 2007, pp. 647-648).

Se relaciona el tiempo de generación g con la constante de velocidad de crecimiento k que indica el cambio del número de células por unidad de tiempo, el valor de k es $2,009 \text{ h}^{-1}$ en la biodegradación aerobia y $3,323 \text{ h}^{-1}$ en la biodegradación anaerobia, según Madigan *et al.* (2004).

Los valores de la cinética del crecimiento bacteriano k y g son necesarios ya que indican la afinidad de las bacterias dentro del medio y su reproducción dentro de él. Los criterios de estas constantes afectan a los sistemas de biodegradación sabiendo que una bacteria logra reproducirse al cabo de 0,49 horas en medio aerobio y 0,30 horas en medio anaerobio.

Mediante los valores encontrados en las Figuras 3.2. y 3.3. y en las Tablas 3.6. y 3.7. referentes a la curva de crecimiento bacteriano, se logró llevar a cabo el diseño del mejor sistema de biodegradación, al tener expuesto y verificado que las bacterias tienen afinidad con el medio y de la misma manera logran reproducirse a las condiciones a las que fueron incubadas aerobia y anaerobicamente (Romero, 2007, p. 648).

3.2.2. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LAS MUESTRAS INTERMEDIAS MEDIANTE CROMATOGRAFÍA DE GASES

Lo análisis por cromatografías de gases de las muestras intermedias tomadas cada tres semanas se presentan en las siguientes secciones. Inicialmente se emplearon curvas de calibración de aceite dieléctrico en las concentraciones de 702 y 1 918 ppm, para comparar mediante las cromatografías de gases la disminución del contaminante en cada sistema con el paso del tiempo.

3.2.2.1. Curva de calibración para cromatografía de gases

Se realizaron curvas de calibración para el aceite de concentración de 702 ppm y de 1 918 ppm, mismos que se muestran en la Figura 3.4. y Figura 3.5., para esto se tomaron concentraciones conocidas de aceite dieléctrico contaminado diluido que para la curva de calibración correspondiente a 702 ppm fueron 50, 250, 500 ppm 600 y 700 ppm y para la curva de calibración correspondiente a 1 918 ppm fueron de 50, 500, 750 1 000 y 2 000 ppm, el área de los picos de dichas concentraciones fue llevado a la curva de calibración de acuerdo al tiempo de retención.

Las curvas fueron necesarias ya que mediante la interpolación y la ecuación de la recta se obtuvieron los valores de concentración de los PCB's de las muestras intermedias y finales de los sistemas de biodegradación aerobios y anaerobios.

A partir de las curvas de calibración para las concentraciones de 702 y 1 918 ppm, fue posible realizar la cuantificación de muestras con concentraciones desconocidas (muestras analizadas cada tres semanas), mediante interpolación; es decir, se obtuvo las áreas de los picos de los componentes del congénere de Aroclor 1254 presentes en los aceites y conociendo las ecuaciones de las curvas de calibración se lograron cuantificar las concentraciones de PCB's contaminantes correspondientes a cada intensidad de pico registrado.

Las Figuras 3.4. y 3.5. representan al área de los picos de los cromatogramas obtenidos frente la concentración del aceite contaminado.

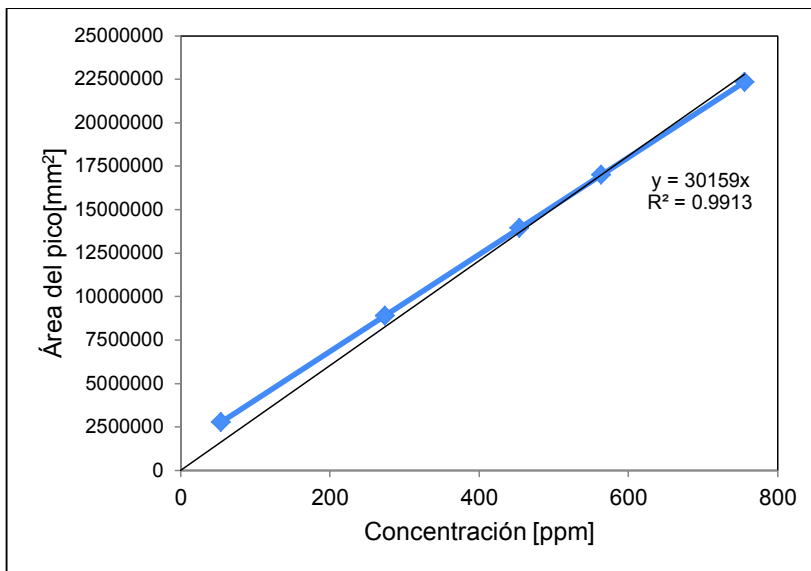


Figura 3.4. Curva de calibración para el proceso de biodegradación aerobio

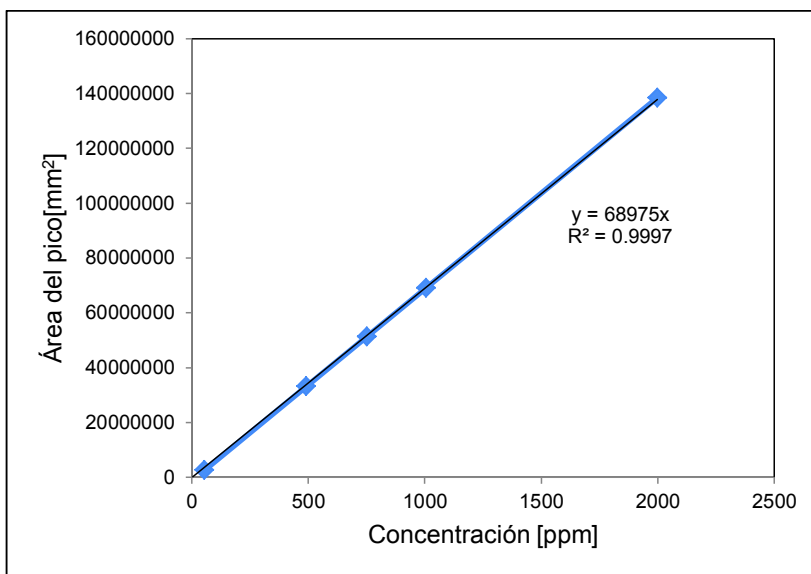


Figura 3.5. Curva de calibración para el proceso de biodegradación anaerobio

Para la curva de calibración del proceso aerobio con concentración del aceite de curva de 702 ppm mostrado en la Figura 3.4. se obtuvo mediante regresión lineal entre la concentración y el área del pico de los compuestos presentes en el aceite

dada por $y=mx$ y al realizar la regresión lineal se obtuvo un r^2 de 0,991 para el proceso de biodegradación aerobio.

Así mismo para la curva de calibración del proceso anaerobio con concentración del aceite de curva de 1 918 ppm mostrado en la Figura 3.5. se obtuvo mediante regresión lineal entre la concentración y el área del pico de los compuestos presentes en el aceite dada por $y=mx$ que pasa por el origen y al realizar la regresión lineal se obtuvo un r^2 de 0,999 para el proceso de biodegradación anaerobio.

3.2.2.2. Análisis de la descomposición de las muestras intermedias y finales de los biorreactores aerobios y anaerobios

La Figura 3.6. presenta el cromatograma de la muestra analizada (a) con su paralela (b) del biorreactor aerobio 1 a la semana 3. Con fines comparativos, se presentan únicamente los cromatogramas de los análisis iniciales y finales al tiempo de 15 semanas y 20 semanas de cada reactor aerobio y anaerobio respectivamente, los demás análisis intermedios se presentan en el Anexo VI.

Con base en la similitud de los picos y según las muestras iniciales realizadas en el MEER acerca del Aroclor 1254 presentadas en la Figura 3.1. en los cuales se dividió los tiempos de retención para los isómeros de este Aroclor a los minutos 15 y 18, se comprobó en la interpretación de los cromatogramas de la Figura 3.6. la existencia de Aroclor 1254 en sus 5 congéneres.

En la Figura 3.6, el primer pico del cromatograma representa al solvente que corresponde al hexano grado pesticida, utilizado en la preparación de la muestra según lo especifica la Norma ASTM D 4059-00, compuesto que apareció a un tiempo de retención de 2,02 minutos en la muestra y 2,05 minutos en su paralela.

El porcentaje de error es de alrededor del 1,4 % en el tiempo de retención del solvente y del 2 % en los congéneres de PCB's , lo que correspondió a que las

moléculas de cada componente de la muestra no reaccionan a la décima de minuto que su paralela analizada. Las líneas rojas en el eje horizontal no tuvieron aportes de interés ya que representan interferencias.

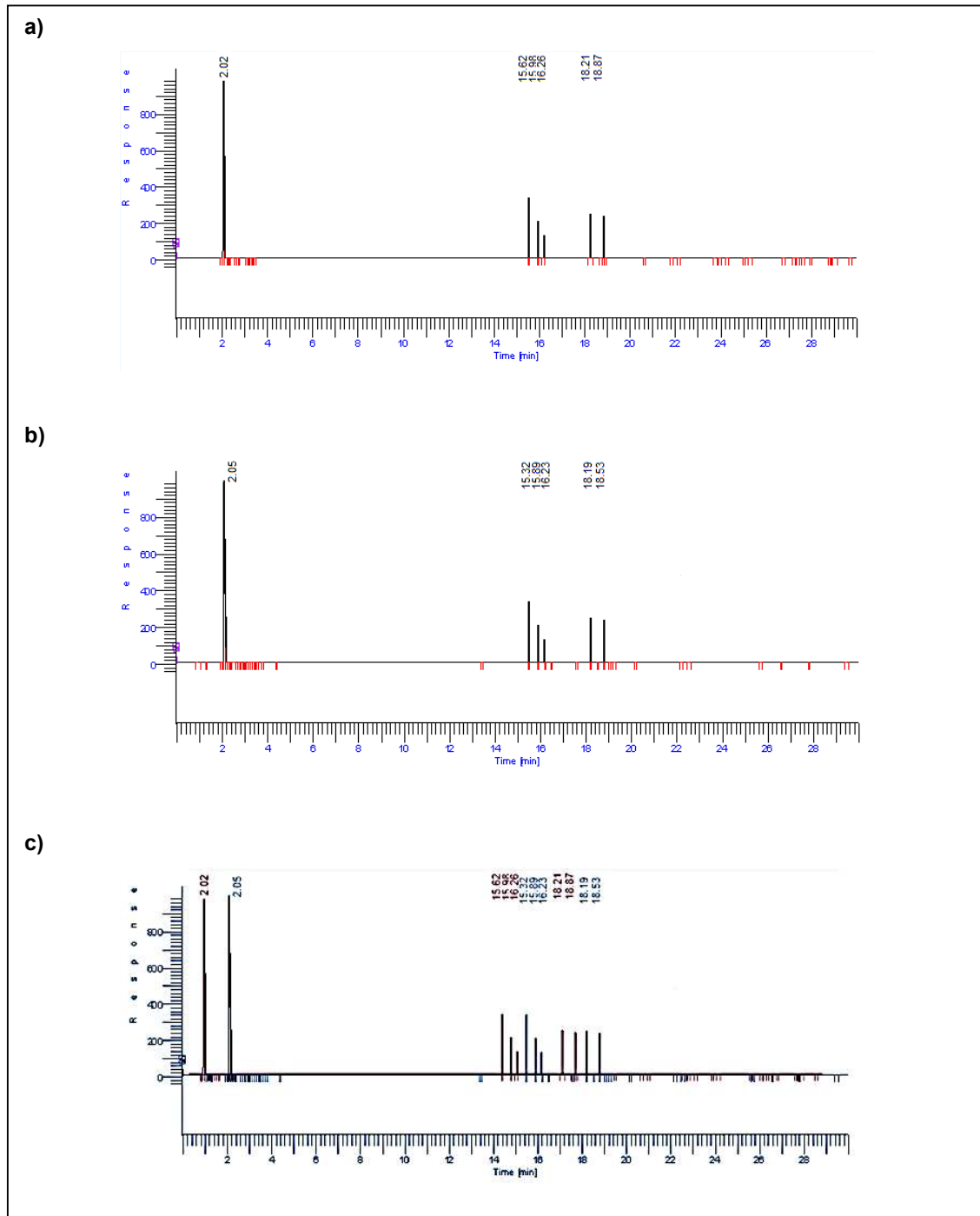


Figura 3.6. a) Cromatograma de la degradación del aceite dieléctrico correspondiente al reactor aerobio 1 a la semana 3, con su paralelo b)

Cabe recalcar que los análisis por cromatografía de gases de las muestras con sus respectivas paralelas de los sistemas aerobios y anaerobios, no llegaron a tener el mismo tiempo de retención, aunque cada uno de los componentes de la mezcla presenta un tiempo característico de paso por el sistema se presentó una variación de décimas de minuto tanto para picos de Aroclor 1254 como de solvente. Esto se debió a que en cromatografía de gases la separación de los componentes presentes se da por la diferente capacidad de interacción de cada compuesto en la sustancia que lo traspasa a diferentes velocidades (Olguín, Pérez, 2004, pp. 25).

En la Figura 3.6. literales a) y b) se visualiza que las muestras, tienen picos de solvente como de Aroclor a similares tiempos de retención, y la misma intensidad de los picos de sus componentes, es decir tuvieron igual concentración de contaminantes de PCB's, lo cual nos llevó a presentar únicamente una de las dos muestras para el análisis de resultados, todos los demás gráficos de cromatografía de gases y sus paralelas se presentan en el Anexo VI.

En los cromatogramas correspondientes a las muestras inicial y final del reactor aerobio 1, se pudo evidenciar un decrecimiento en la altura de los picos correspondientes a los componentes de Aroclor 1254, es decir que la concentración de los componentes de PCB's contaminantes del aceite presentan una disminución de su valor inicial. Los análisis en paralelo fueron realizados para cada muestra en las semanas 3, 6, 9, 12, 15 en los biorreactores aerobios y hasta la semana 18 y 20 para los reactores anaerobios, las muestras fueron analizadas un tiempo de 30 minutos, tiempo en el cual el cromatógrafo de gases realizó la separación de los picos de los componentes contaminantes.

A continuación se presentan los cromatogramas iniciales y finales de los sistemas de biodegradación llevados a cabo en los biorreactores aerobios 1, 2, 3 y de los biorreactores anaerobios 1, 2 y 3 correspondientes a las Figuras 3.7. a la 3.12. De la misma forma se realiza un estudio comparativo para el solvente que permanece con una altura de pico constante en ambas cromatografías ya que se empleó únicamente para realizar la dilución del aceite en la muestra a inyectarse.

- **Reactor Aerobio 1**

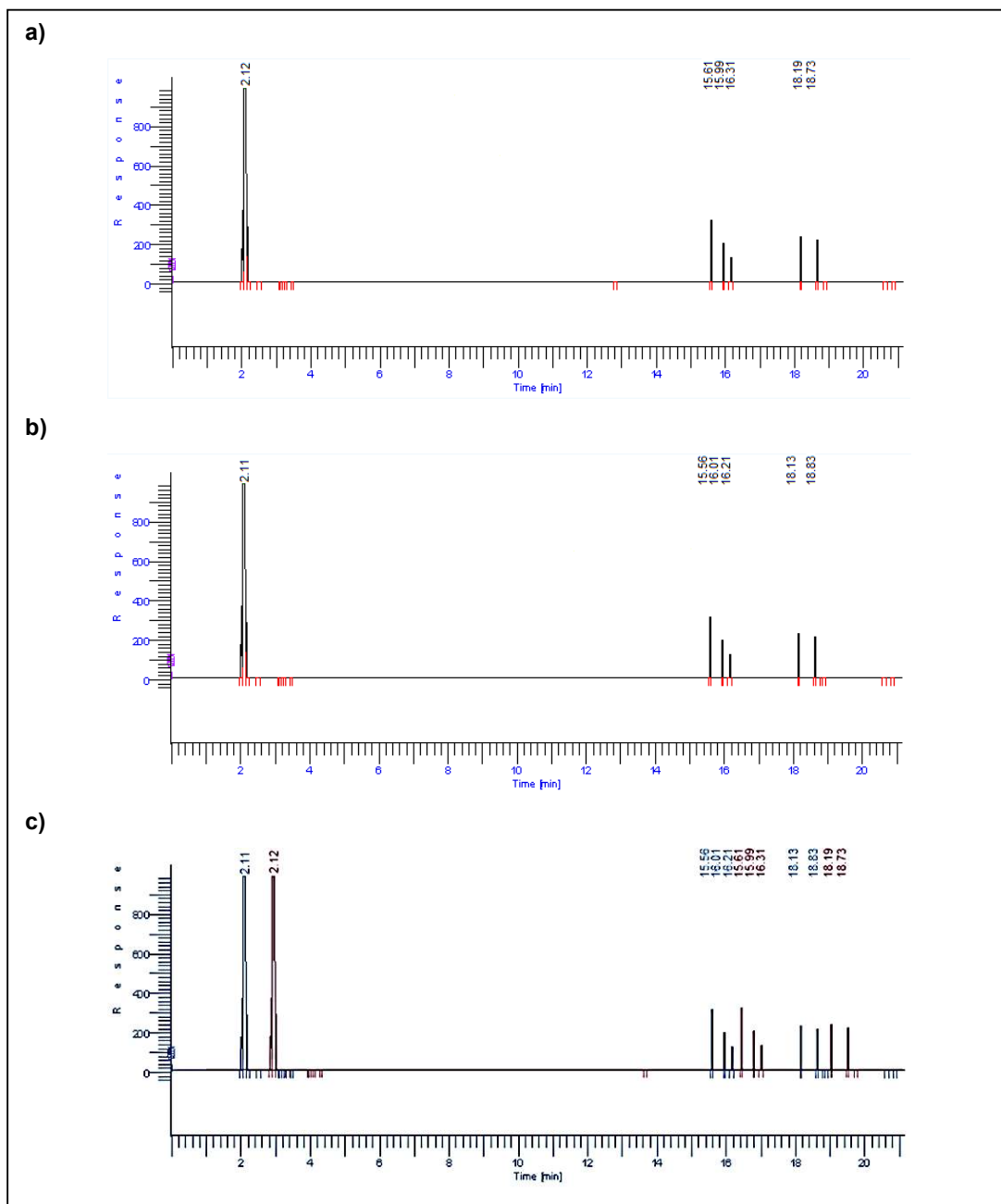


Figura 3.7. a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor aerobio 1

En la Figura 3.7. correspondiente al cromatograma a) inicial y b) final de la muestra del reactor aerobio 1 a la semana 3 y a la semana 15 respectivamente, se evidencia de manera comparativa un decrecimiento en la altura de los picos correspondientes a los congéneres de Aroclor 1254, es decir que la concentración

del aceite disminuyó. Las Figuras 3.8. y 3.9. presentan los análisis por cromatografía de los procesos de degradación en los biorreactores aerobios 2 y 3, con los cromatogramas correspondientes a las muestras a) inicial y b) final.

- **Reactor Aerobio 2**

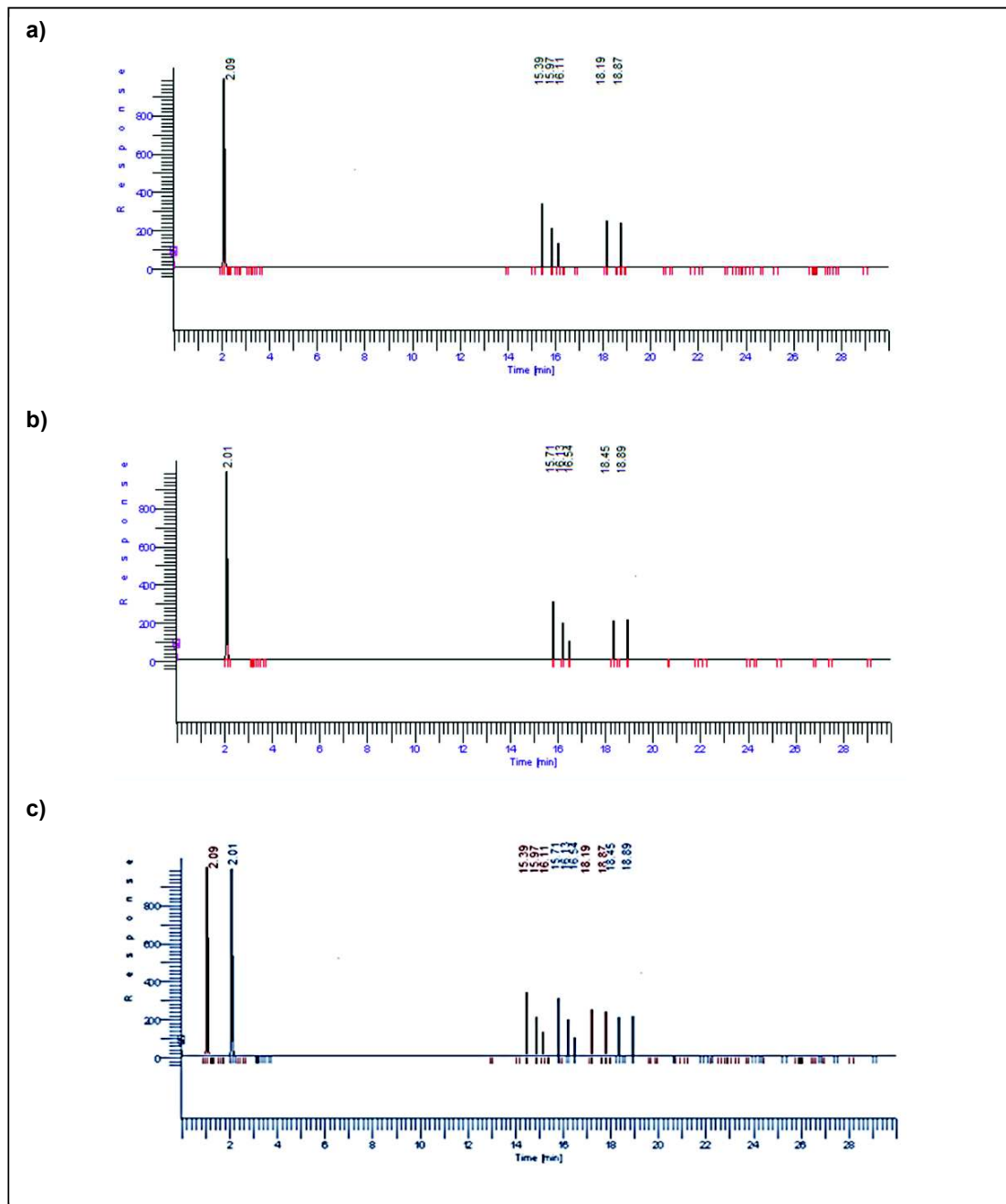


Figura 3.8. a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor aerobio 2

- **Reactor Aerobio 3**

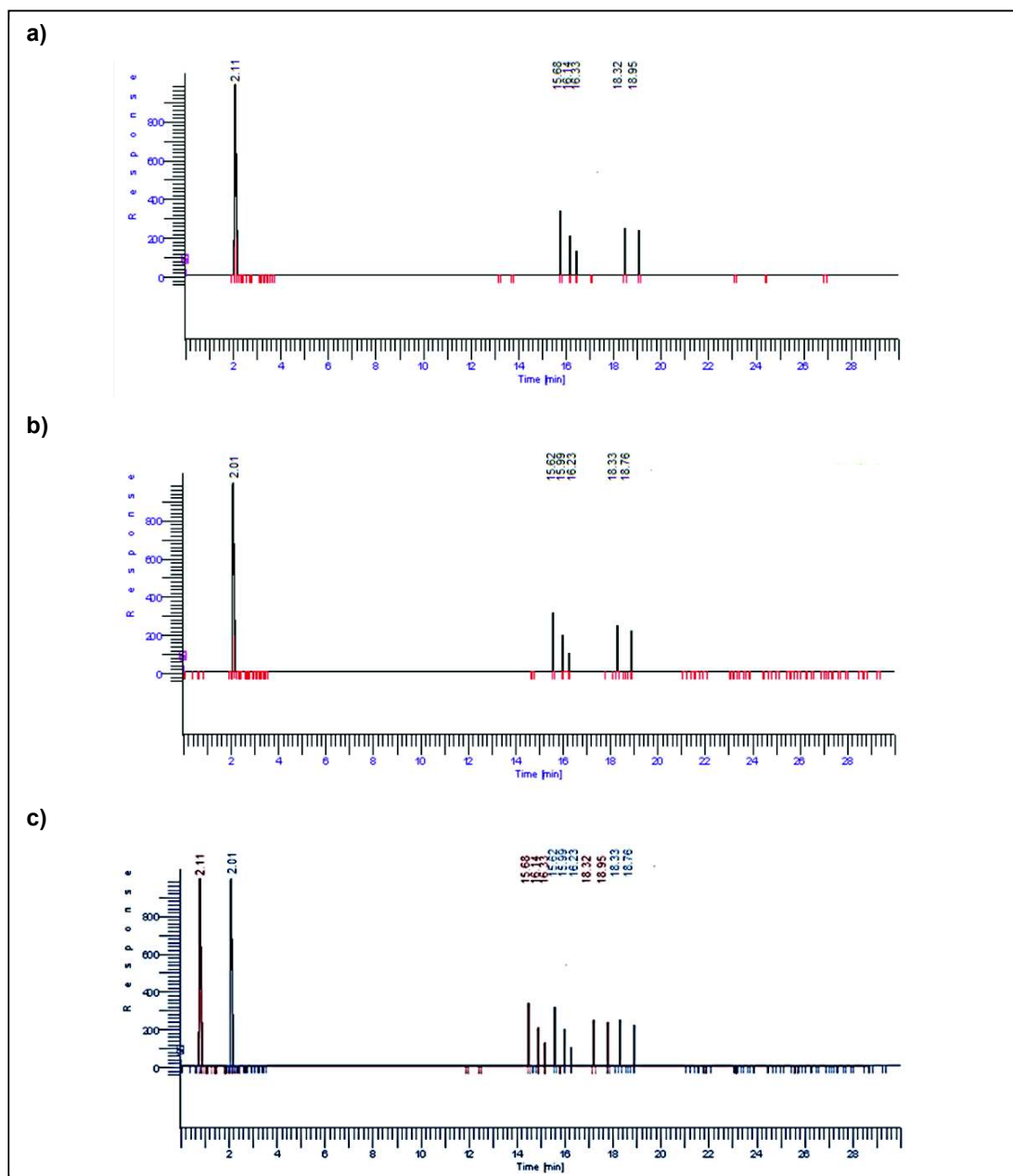


Figura 3.9. a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor aerobio 3

Los cromatogramas de los biorreactores aerobios 2 y 3 muestran similitud en el comportamiento de sus muestras iniciales y finales de lo discutido sobre el reactor aerobio 1. La Figura 3.8. indica una disminución de la concentración de la muestra final respecto a la inicial de todos los congéneres de Aroclor reportados,

revelando mayor decrecimiento de los congéneres contaminantes a los 18 minutos de tiempo de retención. De la misma manera que los sistemas aerobios 1, 2 y 3 se presentan en las Figuras 3.10., 3.11. y 3.12. los cromatogramas de las muestras inicial y final de cada sistema anaerobio.

- **Reactor Anaerobio 1**

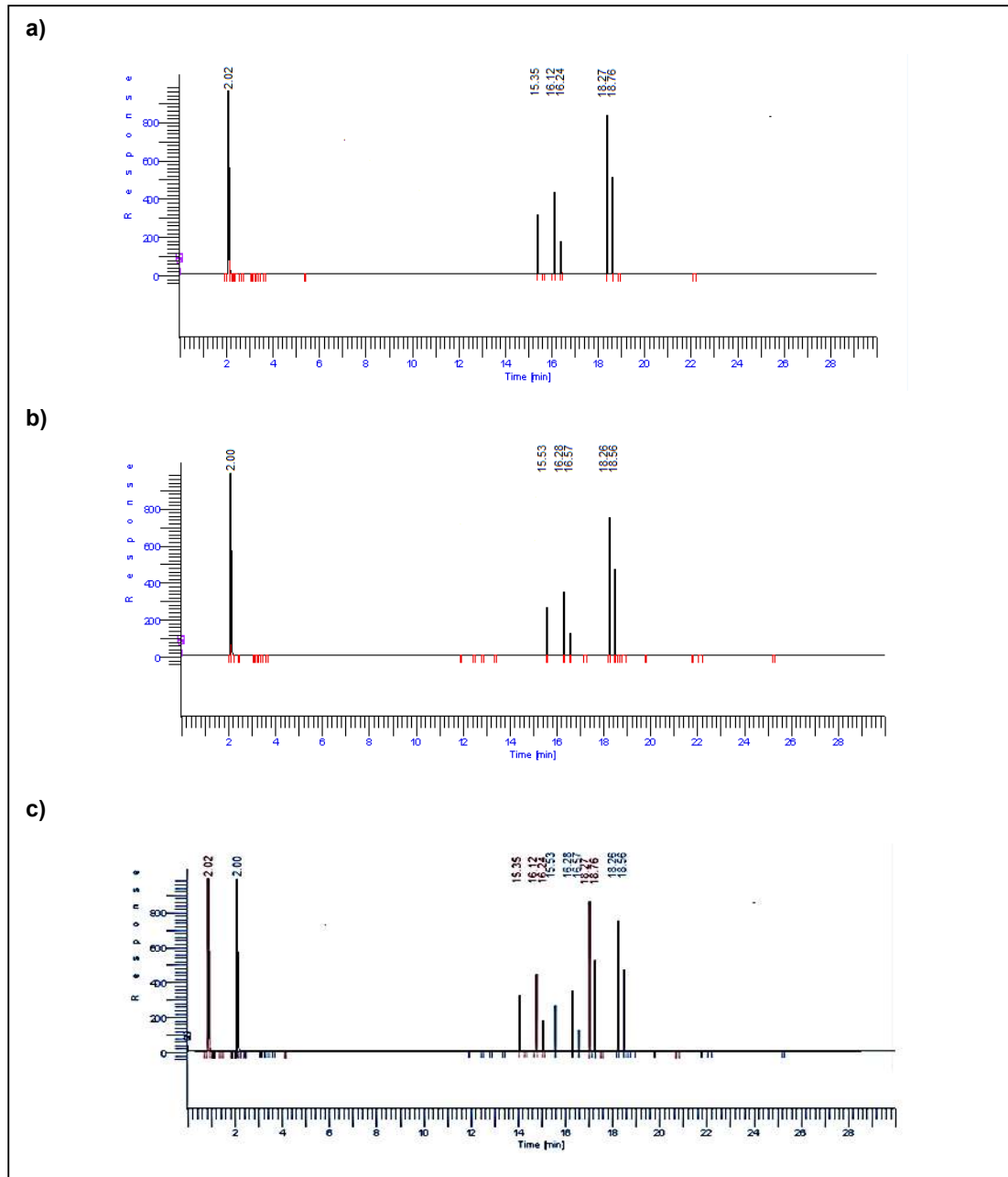


Figura 3.10. a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor anaerobio 1

La Figura 3.10. corresponde a los cromatogramas de proceso de degradación en el biorreactor anaerobio 1, gráficamente este sistema tiene mayor disminución en la intensidad de los picos de los congéneres del Aroclor 1254, comparada con los anteriores sistemas aerobios, el resultado será verificado de acuerdo a las concentraciones tabuladas de las cromatografías de gases.

- **Reactor Anaerobio 2**

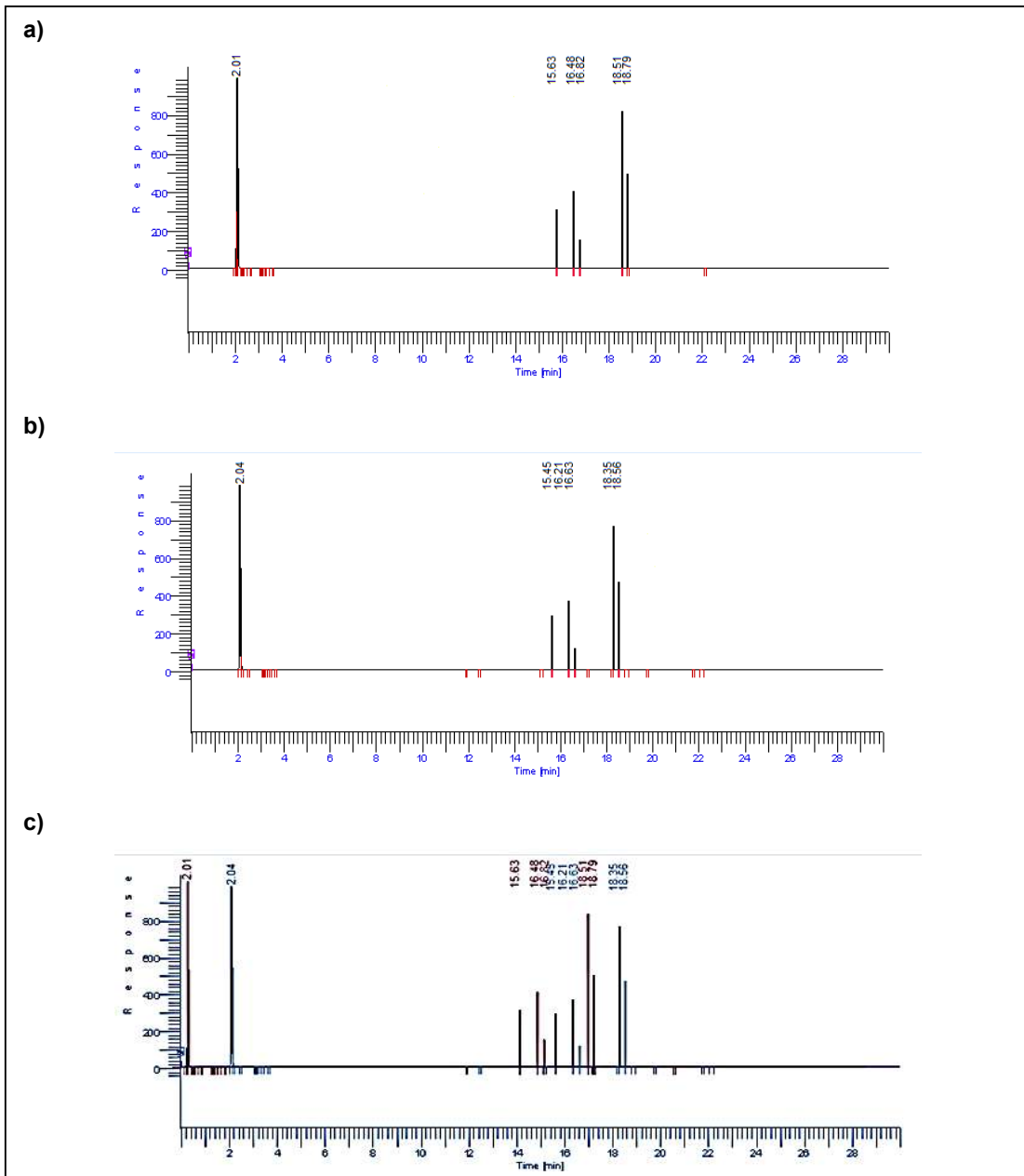


Figura 3.11. a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor anaerobio 2

Las Figuras 3.11. y 3.12. presentaron los cromatogramas en sus literales a) inicial y b) final y c) sobreposición de los mismos respecto al sistema anaerobio 2 y 3, evidenciando una disminución en la intensidad de los picos de los contaminantes, lo que se evaluó como una disminución de la concentración del Aroclor 1254.

- **Reactor Anaerobio 3**

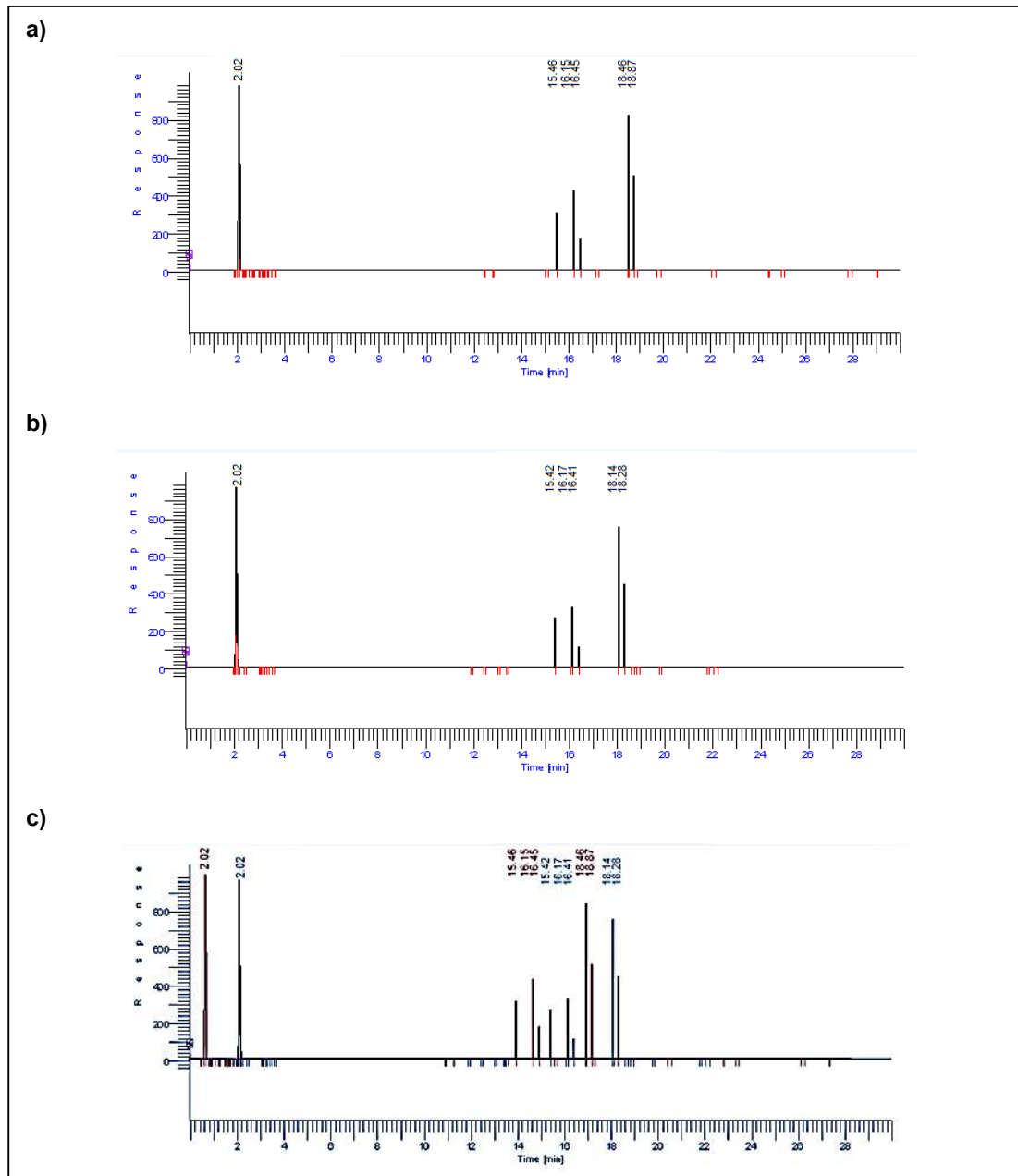


Figura 3.12. a) Cromatograma inicial, b) Cromatograma final c) sobreposición de cromatogramas inicial (rojo) y final (azul) del reactor anaerobio 3

En la Figura 3.12. se presentaron los cromatogramas analizados del sistema de biodegradación anaerobio 3, de la semana 3 y 20 respectivamente y la sobreposición entre ambos, para analizar y comparar la disminución de concentración en los picos de los contaminantes.

Con los datos obtenidos en los análisis por cromatografía de las muestras finales tomadas de los biorreactores aerobios compuestos por aceite dieléctrico con concentración de 702 ppm y anaerobios con 1 918 ppm de concentración de aceite contaminado, que incluyen los datos procesados del área de los picos de los componentes de Aroclor en los cromatogramas de cada sistema. Se llegó a obtener mediante las curvas de calibración presentadas en el ítem 3.2.2.1. las concentraciones concluyentes de los aceites tratados, de esta manera se obtuvo el porcentaje total de remoción de PCB's en cada aceite dieléctrico.

Cabe recalcar que las comparaciones visuales de cada sistema se realizaron de acuerdo a los componentes de Aroclor presentes más no de los otros componentes que no son valiosos para este trabajo de titulación.

Para estudiar todos los cromatogramas presentados en las Figuras 3.7. hasta la 3.12. se realizó el análisis del proceso de biodegradación por medio de tablas y gráficos a presentarse en el ítem 3.2.2.1. y 3.2.2.2.

3.2.2.3. Tablas de resultados de la disminución en las concentraciones de PCB's en los sistemas de degradación aerobio y anaerobio

Al obtener las áreas de los picos de cada cromatograma, los datos fueron tabulados obteniendo la concentración del aceite dieléctrico de cada sistema aerobio de acuerdo a la curva de calibración del aceite dieléctrico contaminado con PCB's de concentración de 702 ppm.

Los valores de las concentraciones de los contaminantes de PCB's semana a semana se muestran en las Tablas 3.7, 3.8 y 3.9, mismas que tienen como factor

de dilución: 1, volumen de extracto: 1 000 mL y volumen de muestra: 50 mL, para todos los datos analizados.

Tabla 3.7. Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor aerobio 1

Fecha de Análisis	Concentración de curva [ppm]	Suma de áreas [mm ²]	Concentración Final [ppm]
15/06/14	35,00	2 238 51	700,1
15/06/14	35,02	2 238 98	700,4
08/07/14	34,63	2 227 97	692,5
08/07/14	34,50	2 224 56	690,1
29/07/14	34,38	2 220 98	687,5
29/07/14	34,33	2 219 86	686,7
19/08/14	33,73	2 202 96	674,6
19/08/14	33,67	2 201 38	673,5
09/09/14	31,97	2 152 48	638,4
09/09/14	31,92	2 152 37	638,3
30/09/14	31,75	2 147 64	634,9
30/09/14	31,79	2 148 87	635,8

Tabla 3.8. Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor aerobio 2

Fecha de Análisis	Concentración de curva [ppm]	Suma de áreas [mm ²]	Concentración Final [ppm]
15/06/14	35,00	2 238 51	700,1
15/06/14	35,02	2 238 98	700,4
08/07/14	33,96	2 209 35	679,2
08/07/14	33,96	2 209 52	679,3
29/07/14	31,80	2 149 04	635,9
29/07/14	31,90	2 152 00	638,0
19/08/14	31,28	2 134 67	625,6
19/08/14	31,36	2 136 78	627,1
09/09/14	29,81	2 093 54	596,1
09/09/14	29,77	2 092 45	595,4
30/09/14	29,61	2 087 97	592,1
30/09/14	29,67	2 089 75	593,4

Tabla 3.9. Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor aerobio 3

Fecha de Análisis	Concentración de curva [ppm]	Suma de áreas [mm ²]	Concentración Final [ppm]
15/06/14	35,00	2 238 51	700,1
15/06/14	35,02	2 238 98	700,4
08/07/14	34,18	2 215 67	683,7
08/07/14	34,10	2 213 24	682,0
29/07/14	33,71	2 202 37	674,2
29/07/14	33,79	2 204 78	675,9
19/08/14	33,22	2 188 65	664,3
19/08/14	33,18	2 187 63	663,6
09/09/14	32,54	2 169 87	650,9
09/09/14	32,64	2 172 45	652,7
30/09/14	32,31	2 163 26	646,1
30/09/14	32,32	2 163 57	646,3

El factor de dilución de las muestras fue determinado de acuerdo a la relación de disgregación de la solución; de acuerdo a la Norma ASTM D 4059 no se realiza el análisis con dilución de la muestra por lo tanto tuvo un valor de 1.

Los datos encontrados en cada biorreactor aerobio se analizaron para obtener el porcentaje de descontaminación de cada sistema, y fue el criterio que ayudó a estimar el sistema con mayor remoción de Aroclor 1254.

Las Tablas 3.7, 3.8 y 3.9 mostraron las concentraciones de los contaminantes de PCB's en los sistemas de biodegradación aerobia, concentraciones que se obtuvieron a partir de la curva de calibración del aceite dieléctrico con concentración inicial de 702 ppm de contaminantes de PCB's. Se puede observar en las tablas que la concentración del contaminante va disminuyendo de acuerdo a las semanas transcurridas.

Las Tablas 3.10., 3.11. y 3.12 presentan las concentraciones de las muestras analizadas de los sistemas de biodegradación anaerobios y se muestran a continuación. Al igual que las tablas de resultados de las muestras aerobias, las

muestras anaerobias tienen factor de dilución: 1, volumen de extracto: 1 000 mL y volumen de muestra: 50 mL.

Tabla 3.10. Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor anaerobio 1

Fecha de Análisis	Concentración de curva [ppm]	Suma de áreas [mm ²]	Concentración final [ppm]
15/06/15	95,87	5 548 61	1917,4
15/06/15	95,95	5 554 12	1918,9
08/07/15	95,33	5 511 14	1906,6
08/07/15	95,19	5 501 24	1903,8
29/07/15	94,21	5 432 65	1884,2
29/07/15	94,23	5 434 18	1884,6
19/08/15	91,57	5 248 39	1831,4
19/08/15	91,65	5 254 19	1833,0
09/09/15	91,16	5 219 84	1823,2
09/09/15	91,09	5 214 85	1821,8
30/09/15	89,58	5 109 84	1791,7
30/09/15	89,65	5 114 65	1793,1
21/10/15	88,74	5 050 69	1774,7
21/10/15	88,70	5 071 93	1780,8
04/11/15	88,18	5 011 45	1763,5
04/11/15	88,20	5 013 41	1764,1

Las tablas de concentraciones de los reactores anaerobios se discuten de igual manera que los sistemas aerobios, donde se tomó como factor de dilución 1, y los valores de las concentraciones se obtuvieron a partir de la curva de calibración del aceite dieléctrico con 1 918 ppm de concentración.

Tabla 3.11. Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor anaerobio 2

Fecha de Análisis	Concentración de curva [ppm]	Suma de áreas [mm ²]	Concentración final [ppm]
15/06/15	95,87	5 548 61	1917,4
15/06/15	95,95	5 554 12	1918,9

Tabla 3.11. Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor anaerobio 2 (continuación...)

Fecha de análisis	Concentración de curva [ppm]	Suma de áreas [mm ²]	Concentración final [ppm]
08/07/15	94,19	5 431 68	1883,9
08/07/15	94,23	5 434 37	1884,7
29/07/15	92,99	5 347 90	1859,9
29/07/15	93,04	5 350 95	1860,8
19/08/15	92,25	5 295 79	1845,0
19/08/15	92,16	5 289 75	1843,2
09/09/15	91,95	5 274 68	1838,9
09/09/15	91,93	5 273 95	1838,7
30/09/15	91,36	5 233 65	1827,2
30/09/15	91,32	5 231 08	1826,4
21/10/15	91,29	5 229 17	1825,9
21/10/15	91,29	5 229 34	1825,9
04/11/15	91,23	5 224 68	1824,6
04/11/15	91,20	5 222 31	1823,9

Tabla 3.12. Resultados de las cromatografías de gases de las muestras analizadas del reactor anaerobio 3

Fecha de análisis	Concentración de curva [ppm]	Suma de áreas [mm ²]	Concentración final [ppm]
15/06/15	95,87	5 548 61	1917,4
15/06/15	95,95	5 554 12	1918,9
08/07/15	95,05	5 491 35	1901,0
08/07/15	94,99	5 487 61	1899,9
29/07/15	94,07	5 423 15	1881,4
29/07/15	94,05	5 421 89	1881,1
19/08/15	93,67	5 395 06	1873,4
19/08/15	93,71	5 397 88	1874,2
09/09/15	93,59	5 389 79	1871,9
09/09/15	93,45	5 379 79	1869,0
30/09/15	93,00	5 348 39	1860,0
30/09/15	93,08	5 354 19	1861,7
21/10/15	92,70	5 327 42	1854,0
21/10/15	92,84	5337425	1856,9
04/11/15	92,43	5 308 75	1848,7
04/11/15	92,49	5 312 45	1849,7

El reactor anaerobio 1, es el sistema que presentó mayor descontaminación de acuerdo a la concentración final a la semana 20, lo que el reactor que presenta menor descontaminación es el sistema anaerobio 3.

De acuerdo a las concentraciones iniciales y finales de las Tablas 3.7. hasta la 3.12. de los sistemas aerobios y anaerobios se determinaron los porcentajes de remoción de PCB's que se muestran en la Tabla 3.13.

El ejemplo de cálculo para analizar el área de los picos de los cromatogramas de acuerdo a la curva de calibración se muestran en el Anexo VII.

Tabla 3.13. Porcentajes de descontaminación de PCB's en las muestras iniciales y finales de los sistemas de biodegradación aerobio y anaerobio

Biorreactor	Concentración inicial [ppm]	Concentración final [ppm]	Porcentaje de remoción de PCB's
Aerobio 1	702	635,8	9%
Aerobio 2	702	593,4	15%
Aerobio 3	702	646,3	8%
Anaerobio 1	1 918	1764,1	8%
Anaerobio 2	1 918	1823,9	5%
Anaerobio 3	1 918	1849.7	4%

La Tabla 3.13. muestra los porcentajes de remoción de PCB's, en cada sistema de biodegradación y mediante estos resultados se determinó que existe menor descontaminación en los sistemas anaerobios al tener una biodegradación promedio de alrededor del 6%, por lo que se consideraría como un medio en el cual las bacterias, las condiciones de operación y el tipo de biodegradación no es idóneo para este tipo de ensayo, tomando en consideración los datos tomados de bibliografía que presentan degradaciones de alrededor del 70% (De Giorgis, Schwarz, Chamy, Schiappacasse, 2003, p. 1).

Los sistemas de biodegradación aerobia presentaron mejores porcentajes de descontaminación promedio de alrededor del 11%, método que descontaminó el doble de PCB's comparado con los biorreactores anaerobios.

3.2.2.4. Análisis de gráficos del proceso de biodegradación aerobia y anaerobia en cada sistema

Los gráficos presentados a continuación desde la Figura 3.13. hasta la Figura 3.18., fueron tabulados de acuerdo las tablas de los resultados por cromatografía de gases del ítem 3.2.2.3. los cuales muestran la variación de la concentración de cada sistema aerobio y anaerobio en función del tiempo de experimentación.

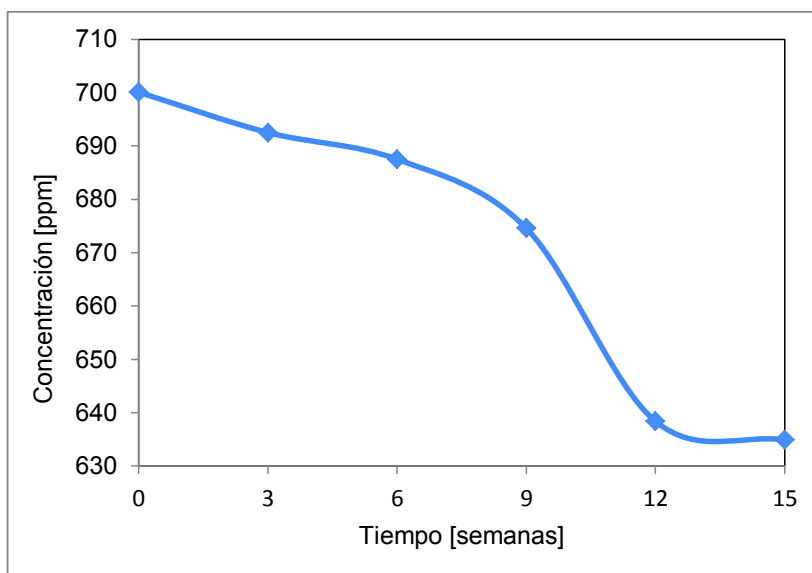


Figura 3.13. Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor aerobio 1

Como se observa en la Figura 3.13., el proceso de biodegradación aerobia inicia con una concentración de 702 ppm de PCB's en el aceite dieléctrico y alcanza una concentración final de 635 ppm. Se obtuvo en este sistema un porcentaje de degradación de PCB's del 9%.

Desde la semana de arranque de la experimentación se visualiza una reducción de PCB's aproximadamente constante hasta la semana nueve, después de la cual hasta la semana 12 se denota como la concentración cambia de pendiente, haciendo que la concentración disminuya más rápidamente entre estas 3 semanas, aunque posteriormente la degradación disminuye a partir de la semana 12 debido a que las condiciones de pH=6,2 y aireación 60 cm³/min pueden no ser

suficientes para la supervivencia de los microorganismos y estos pueden haber detenido su reproducción, también puede deberse a que las enzimas no lograron llevar a cabo su ruta metabólica y por lo tanto se puede deducir que ha iniciado la fase de muerte de las bacterias.

La Figura 3.14. representa el sistema de biodegradación aerobia a partir del tiempo cero hasta las 15 semanas.

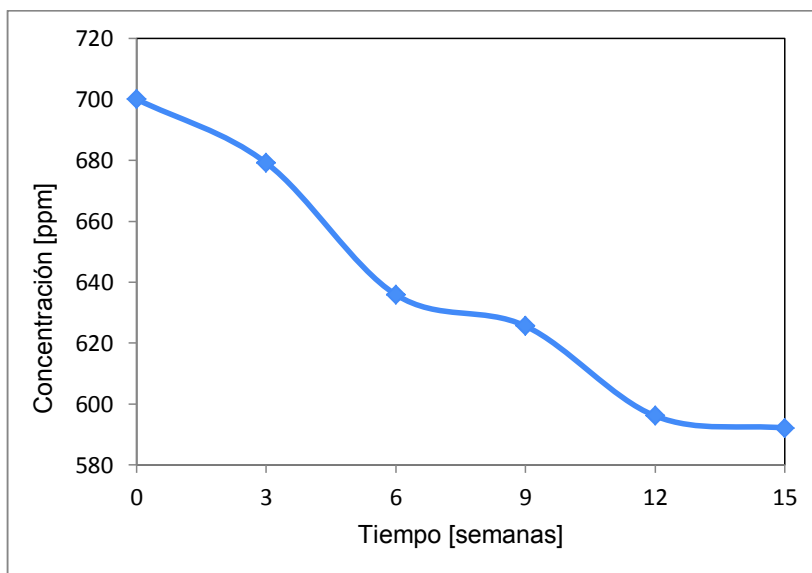


Figura 3.14. Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor aerobio 2

Como se observa en la Figura 3.14., el proceso de biodegradación alcanza una reducción en la concentración de 593 ppm al finalizar las 15 semanas de experimentación, y se obtuvo un porcentaje de degradación de PCB's del 15%.

En este sistema de biodegradación, se observa que la curva tiene una pendiente similar durante toda la experimentación, excepto en la semana 9, en la cual la curva de variación de concentración cambia de pendiente disminuyendo la actividad de los microorganismos sobre el sustrato (aceite dieléctrico), dando como resultado una variación menor de concentración de PCB's entre la semana 6 y 9. El pH de 6,8 y la aireación de 70 cm³/min pudieron permitir que los organismos presenten una degradación constante y que las enzimas catalicen la degradación subsecuentemente.

La Figura 3.15. representa el sistema de biodegradación aerobio 3, desde la semana de arranque hasta la semana 15, relacionando la concentración con el tiempo de duración de esta experimentación.

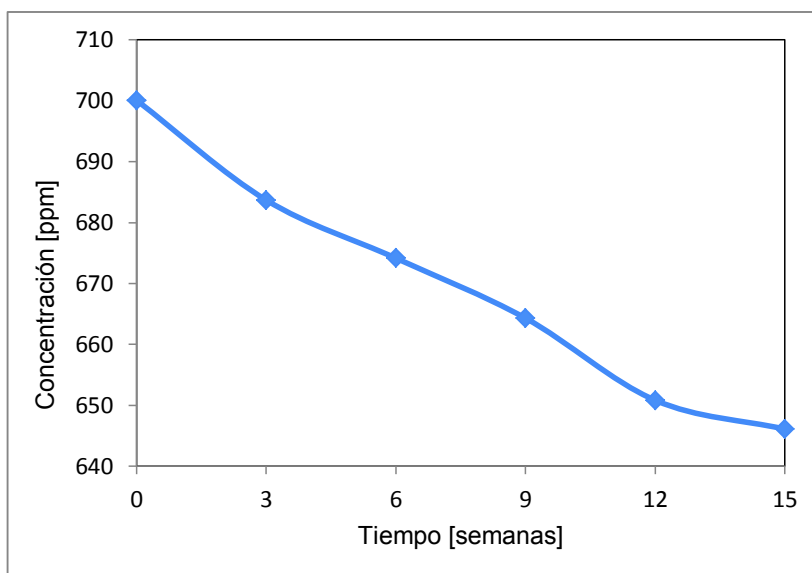


Figura 3.15. Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor aerobio 3

Como se observa en la Figura 3.15., este sistema de biodegradación alcanza una reducción en la concentración de PCB's de 646 ppm, las condiciones de este reactor nos han servido para obtener un porcentaje de degradación de PCB's del 8%.

Se visualiza una reducción de PCB's estable, y se puede establecer que los microorganismos presentan una degradación estable aunque esta degradación es mínima. Se podría afirmar que el sistema de degradación aerobio realizado en el biorreactor 3 cuenta con mejor permanencia en el decrecimiento de la concentración del aceite dieléctrico, a pesar de haber tenido la menor remoción de PCB's; este comportamiento puede atribuirse a la agitación continua que es un parámetro que lo diferencia de los demás biorreactores aerobios.

La Figura 3.16. representa el sistema de biodegradación anaerobio 1, desde la semana de arranque hasta la semana 20, relacionando la concentración con el tiempo.

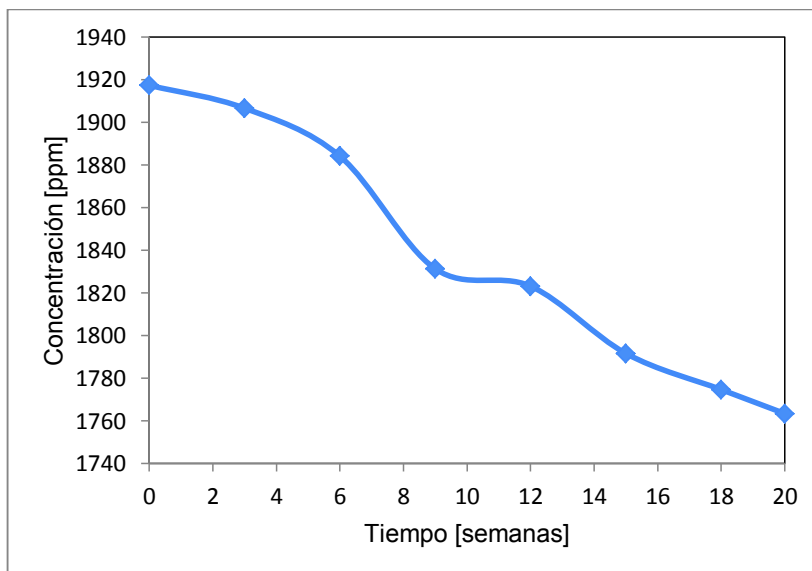


Figura 3.16. Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor anaerobio 1

Para realizar estos gráficos se emplearon los resultados de la concentración de las tablas del ítem 3.2.2.3. respecto a las semanas en las que se tomó la muestra.

Como se observa en la Figura 3.16., el proceso de biodegradación anaerobia inicia con una concentración de 1 918 ppm de PCB's en el aceite dieléctrico y alcanza una concentración de 1 764 ppm. La biodegradación anaerobia tratada en este sistema tiene un porcentaje de remoción del 8%.

Desde la semana de arranque hasta la semana seis, se visualiza una reducción de PCB's aproximadamente constante; de la semana seis a la nueve, se observa un incremento en la pendiente lo que representaría un aumento en la degradación del contaminante; a partir de este intervalo, las bacterias presentan una degradación menor hasta que finaliza la experimentación. Se puede atribuir a que a partir de la semana nueve, los microorganismos necesitaron de una mayor carga de metanol que fomente el crecimiento bacteriano y la generación de energía para que la degradación sea mayor.

La Figura 3.17. representa el sistema de biodegradación anaerobio 2, desde la semana de arranque hasta la semana 20.

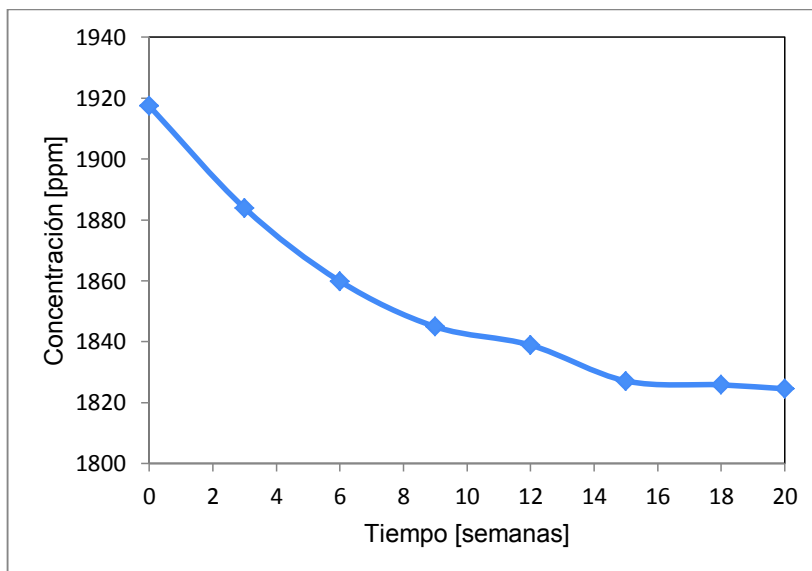


Figura 3.17. Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor anaerobio 2

Como se observa en la Figura 3.17, el proceso de biodegradación alcanza una reducción en la concentración de 1 823 ppm partiendo de una concentración inicial de 1 918 ppm, obteniendo un porcentaje de degradación de PCB's del 5%. En este sistema de biodegradación, se observa que existe un decrecimiento constante hasta la semana nueve, a partir de esta semana la degradación disminuye, los microorganismos pueden estar disminuyendo su reproducción, a pesar de que la carga de metanol es mayor que el biorreactor 1, es decir el pH puede estar afectando el desarrollo enzimático y por ende la supervivencia del consorcio bacteriano.

La Figura 3.18. representa el sistema de biodegradación anaerobio 3, desde la semana de arranque hasta la semana 20, relacionando la concentración de contaminante de Aroclor 1254 con el tiempo de duración de esta experimentación.

En la Figura 3.18. a su vez se observa que el en proceso de biodegradación existió muy poca descontaminación, presentando una reducción del 4% partiendo de una concentración de PCB's inicial de 1 918 ppm hasta llegar a obtener un concentración de 1 848 ppm, este fue el sistema con menor remoción de contaminante.

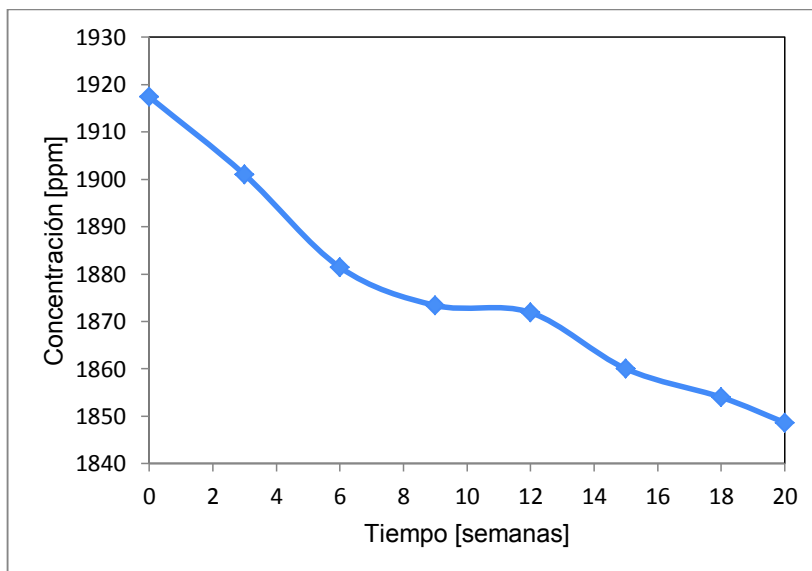


Figura 3.18. Variación de la concentración de Aroclor 1254 [ppm] vs tiempo [semanas], reactor anaerobio 3

En este sistema de biodegradación, se observa que existe una degradación mínima, la curva no demuestra estabilidad en la remoción de PCB's; esto se puede atribuir a que los parámetros de operación pueden ser muy elevados y afectan la supervivencia de los microorganismos; por lo tanto no es constante el metabolismo ni la degradación del contaminante (Liu, 2004, p. 17).

3.2.3. DISEÑO DEL BIORREACTOR CON MAYOR PORCENTAJE DE BIODEGRADACIÓN DE ACEITE DIELECTRICO CON PCB's

3.2.3.1. Dimensiones del reactor agitador

Los resultados obtenidos de acuerdo a las relaciones de diseño de tanques con agitadores de turbina según McCabe y Smith (2003), son tabulados en la Tabla 3.8., donde se expresan las dimensiones del reactor a escala de laboratorio, que cuenta con la mejor remoción de PCB's, discutido en el numeral 3.2.2. (pp. 268-276). Los cálculos realizados para determinar las dimensiones del biorreactor se muestran en el Anexo VIII.

Tabla 3.14. Características y parámetros considerados para el diseño del reactor agitado

Parámetro	Valor
Diámetro del agitador	$D_a = 0,036 \text{ m}$
Diámetro del reactor	$h_{r,r} = 0,180 \text{ m}$
Longitud del agitador	$L = 0,180 \text{ m}$
Altura del reactor	$h_r = 0,220 \text{ m}$
Largo de la paleta del agitador	$L_p = 0,009 \text{ m}$
Altura de la paleta del agitador	$W = 0,006 \text{ m}$

3.2.3.2. Potencia del agitador

Al tratarse de un reactor de laboratorio, se considera únicamente una paleta para que permanezca en condición de reactor agitado (McCabe y Smith, 2003, pp. 270-280). La potencia del agitador fue calculada a partir de la variable adimensional del número de Reynolds (N_{Re}), como se muestra en las ecuaciones 2.17 y 2.18.

Se obtiene el valor del Número de Reynolds $N_{Re}=2,041 \times 10^3$, el cual nos indicó que la nuestra solución que se encuentra en el reactor es un líquido con flujo laminar, pudiendo llevar a cabo el cálculo de la potencia, basándonos en el gráfico mostrado por (McCabe y Smith, 2003) en el que relaciona el Número de Reynolds N_{Re} con el número de potencia (p. 270).

Al analizar el número de Reynolds, $10 < N_{Re} < 10\ 000$, se trata de un líquido con flujo laminar y luego de haber encontrado el valor de la variable adimensional del número de Reynolds.

También se encontró la variable N_p , que es el número de potencia a partir de la Figura 2.7. la cual se muestra a continuación, mediante la figura se llegó a encontrar el valor de la potencia de la bomba para la agitación reemplazandola en la Ecuación 2.22 y 2.23 respecto a N_p . El resultado de la potencia del agitador es: $P=0,04 \text{ W}$.

3.2.3.3. Temperaturas de operación y diseño

- Temperatura de operación

La temperatura de operación que se empleó en este trabajo será la temperatura correspondiente a las condiciones experimentales de cada biorreactor, en los que se midió una temperatura inicial ambiente de 22 °C, los valores fueron monitoreados diariamente, 3 veces al día en el laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional donde se llevó a cabo la experimentación (Liu, 2004; Reyes y Vásquez, 2002).

En la Tabla 3.15. se presentan los resultados de las temperaturas obtenidas en el proceso. La temperatura de operación se obtuvo a partir de los datos tabulados en el Anexo IX, se obtuvo un promedio de 420 temperaturas para cada reactor.

Tabla 3.15. Temperaturas evaluadas a lo largo del proceso de biodegradación aerobia y anaerobia

Biorreactor	Aerobio 1	Aerobio 2	Aerobio 3	Anaerobio 1	Anaerobio 2	Anaerobio 3
T _{media} del reactor [°C]	22,0	22,0	22,0	22,1	22,0	22,0
T _{media} del proceso [°C]	22,0					
Desviación estándar σ	$\pm 2,2$					
Temperatura de operación [°C]	22,0 \pm 2,2					

- Temperatura de diseño

La temperatura de diseño ha sido calculada de acuerdo a la Ecuación 2.24 acorde a los rangos de trabajo de la temperatura de operación, que fue calculado a partir del promedio de todas las medidas tabuladas para cada biorreactor y la desviación de los datos registrados. Por lo tanto, la temperatura de diseño para los biorreactores será:

$$\text{Temperatura de diseño} = (22,0 \pm 2,2 + 10)^{\circ}\text{C} = 32,2 \pm 2,2^{\circ}\text{C}$$

3.2.3.4. Presiones de operación y diseño

- Presión de operación

La presión de operación de los biorreactores fue calculada de acuerdo al sistema en biodegradación, para lo cual se tiene el sistema aerobio y anaerobio que poseen distintas presiones de operación, al ser uno abierto y el otro cerrado.

Reactor aerobio: La presión de operación para los reactores aerobios se calculó a partir de la presión hidrostática que es la presión que ejerce la masa de aire atmosférico sobre él y la masa del líquido sobre el nivel del piso del reactor, la presión en el biorreactor es de 74 506,79 Pa.

Reactor anaerobio: La presión de operación para los reactores anaerobios fue calculada a partir de la columna de agua que se encuentra dentro del reactor anaerobio, esta es 2 512,72 Pa.

- Presión del diseño y material

La presión de diseño calculada para el proceso de los biorreactores, se calcula siendo el 10% más que el valor de la presión de operación, por lo tanto para el biorreactor aerobio de 81 957,469 Pa, y en el anaerobio de 2 763,992 Pa (León, 2001, p. 10).

3.2.3.5. Diseño de tanques para la biodegradación de aceite dieléctrico con PCB's

Los biorreactores al ser escalados para dimensionamiento de una planta piloto deben tener entre 50 a 300 L de capacidad, o a su vez también se considera

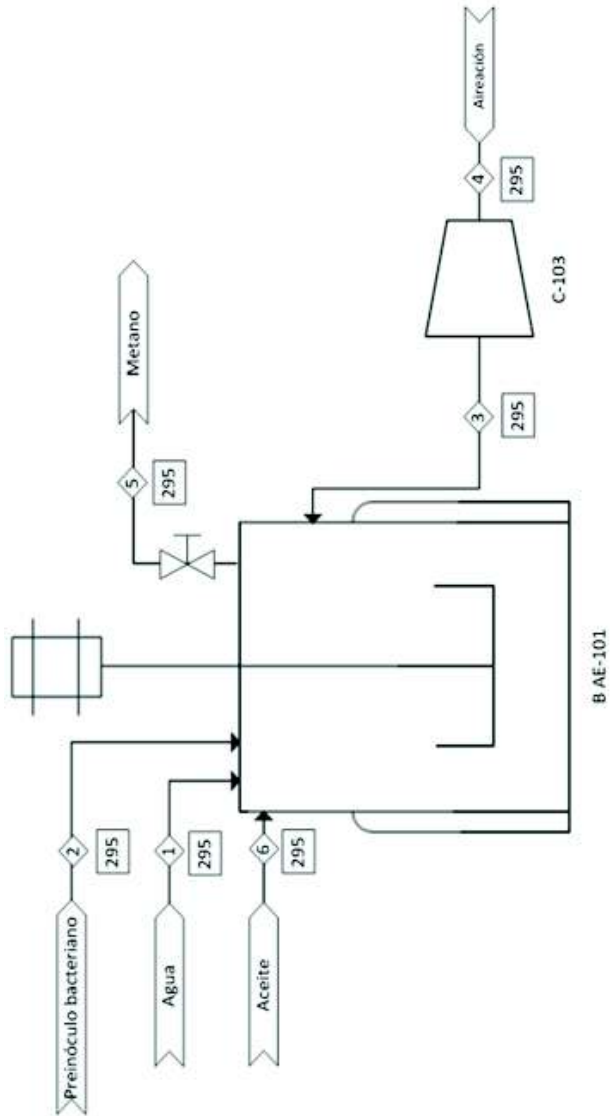
como criterio de diseño para un reactor a escala piloto la relación de 10:1 referente a las dimensiones al biorreactor de laboratorio (Fundación Universitaria Tecnológico de Copenalco, 2014). En la Tabla 3.16. se presentan las características de los biorreactores a escala de laboratorio y a escala piloto.

Tabla 3.16. Características de los reactores a escala de laboratorio y a escala piloto, con sus respectivos criterios de cálculo y escalado

Parámetro	Dimensiones	
	Reactor a escala de laboratorio 2 L	Reactor a escala piloto 20 L
Potencia	0,04 W	0,40 W
Número de Reynolds N_{Re}	$2,04 \times 10^3$	$2,04 \times 10^3$
Velocidad de agitación	150 rpm	150 rpm
Diámetro del reactor	0,108 m	0,234 m
Diámetro del agitador	0,036 m	0,078 m
Altura entre reactor y agitador	0,036 m	0,078 m
Longitud del agitador	0,180 m	0,389 m
Altura del reactor	0,220 m	0,467 m
Largo de la paleta del agitador	0,009 m	0,019 m
Altura de la paleta del agitador	0,006 m	0,016 m


Los reactores aerobios trabajaron con volumen inicial de 2 L y de acuerdo a los resultados presentados en los ítems anteriores respecto a la variación de las concentraciones finales e iniciales, el sistema que presentó mayor remoción de PCB's fue el reactor aerobio 2, a partir del cual se calcularon las dimensiones del biorreactor a escala piloto que siguiendo la relación de bibliografía citada en el párrafo anterior de 10:1 contendrá un volumen de 20 L.

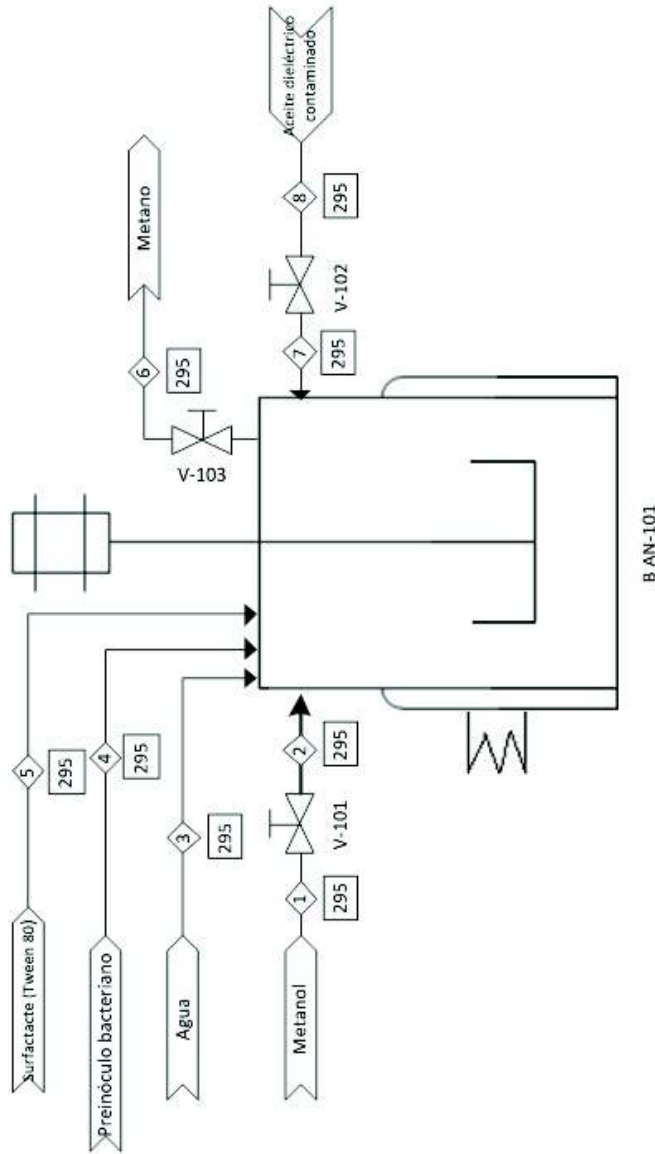
De acuerdo a las dimensiones propuestas en la Tabla 3.16, de los reactores a escala de laboratorio y a escala piloto, y de acuerdo a los componentes de cada sistema aerobio y anaerobio tratados y analizados en el punto 3.2. se presentan en las Figuras 3.19. y 3.20. los diagramas PFD's de los sistemas de biodegradación aerobia y anaerobia.



Número de Corriente	1	2	3	4	5	6
Temperatura (°C)	22	22	22	22	22	22
Presión (Pa)	74506,79	74506,79	74506,79	74506,79	74506,79	74506,79
Flujo Másico (kg/día)	2,00	$2,00 \times 10^{-2}$	-	-	-	$2,00 \times 10^{-2}$
Agua (kg/día)	2,00	-	-	-	-	-
Preinóculo bacteriano (kg/día)	-	$2,00 \times 10^{-2}$	-	-	-	-
Aceite dieléctrico (kg/día)	-	-	-	-	-	$2,00 \times 10^{-2}$
Metano (kg/día)	-	-	-	-	-	-

Figura 3.19. Diagrama PFD del sistema de biodegradación aerobia

 ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA	
NOMBRE DEL PROYECTO DISEÑO DE SISTEMAS DE BIODEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA A ESCALA PILOTO PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS CON BIFENILOS POLICLORADOS (PCB'S)	
LÍNEA DE DEGRADACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS CON PCB'S	
ELABORADOR POR: Mishel Izquierdo, Eliana Peña	PÁGINAS 1 DE 2 PFD



B AN-101

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA		NOMBRE DEL PROYECTO						
DISEÑO DE SISTEMAS DE BIODEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA A ESCALA PILOTO PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS CON BIFENILOS POLICLORADOS (PCBS)		DISEÑO DE SISTEMAS DE BIODEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA A ESCALA PILOTO PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS CON BIFENILOS POLICLORADOS (PCBS)						
LINEA DE DEGRADACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS CON PCBs		PÁGINAS						
ELABORADOR POR: Mishel Izquierdo, Eliana Peña		2 DE 2 PFD						
Número de Corriente	1	2	3	4	5	6	7	
Temperatura (°C)	22	22	22	22	22	22	22	
Presión (Pa)	74506,79	74506,79	74506,79	2,10 x 10 ³	74506,79	74506,79	74506,79	
Flujo Másico (kg/día)	3,00 x 10 ³	3,00 x 10 ³	3,00	-	3,84x10 ²	-	3,84x10 ²	
Agua (kg/día)	-	-	3,00	-	-	-	-	
Metanol (kg/día)	3,00x10 ³	3,00 x 10 ³	-	-	-	-	-	
Preinóculo bacteriano (kg/día)	-	-	-	2,10 x 10 ³	-	-	-	
Surfactante (Tween 80)	-	-	-	-	3,84x10 ²	-	-	
Metano (kg/día)	-	-	-	-	-	-	-	
Aceite dieléctrico (kg/día)	-	-	-	-	-	-	3,84x10 ²	

Figura 3.20. Diagrama PFD de los reactores en la biodegradación anaerobia

La Figura 3.19. muestra el diagrama PFD del sistema de biodegradación aerobio, en el cual fueron consideradas como corrientes de entrada el pre inóculo bacteriano (2), aceite dieléctrico contaminado (6) y agua (1) que son los componentes esenciales de este biorreactor, además del flujo de aire (3) dado por un compresor para lograr un burbujeo y movimiento del líquido dentro del biorreactor, que agilitó el proceso aerobio dentro del biorreactor.

En la Figura 3.20. como corriente de salida se ha considerado el metano (5) producto de la digestión de las bacterias, que en los biorreactores este compuesto fue producido en mínimas cantidades por tratarse de un medio acuoso en el cual la cantidad de sustrato en el medio fue añadido en relación de 20 mg de aceite por 2 litros de medio. La hoja de especificación del reactor aerobio, para la puesta en marcha de la planta piloto se muestra en el Anexo XI.

Las Figuras 3.19. y 3.20. tienen similares componentes esenciales pero distinto tipo de procedimiento al tratarse de un sistema abierto (aerobio) y un sistema cerrado (anaerobio), por lo que se tienen corrientes distintas como la tasa de carga para los sistemas anaerobios y la aireación para los sistemas aerobios.

La Figura 3.20. muestra el diagrama PFD del sistema de biodegradación anaerobio, en el cual se han considerado como corrientes de entrada el pre inóculo bacteriano (4), metanol (1), aceite dieléctrico contaminado (7) agua (3) y surfactante *Tween* 80 (5), componentes que fueron empleados en la puesta en marcha de los sistemas anaerobios. Adicionalmente se contó con las corrientes de entrada de metanol (1) y aceite dieléctrico contaminado (7) con una válvula dosificadora que constituyen la tasa de carga diaria en base a metanol. Como corriente de salida se ha considerado el metano (6) por la digestión de las bacterias (6). Este fue el sistema con el que se trabajó durante 20 semanas hasta obtener el aceite dieléctrico descontaminado.

Los criterios de escalado de los biorreactores de la Tabla 3.16. se fijaron en función de las relaciones citadas en la revisión bibliográfica, que de acuerdo a lo estipulado en el ítem 1 de este proyecto de titulación, las relaciones como el

número de Reynolds y la velocidad de agitación se mantienen constantes, la potencia se manejó de acuerdo a la relación presión/volumen (León, 2001, p. 10).

3.3. MEJORES CONDICIONES PARA LA DEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA DE ACEITES DIELECTRICOS CONTAMINADOS CON PCB's EN UN PERÍODO DE 15 Y 20 SEMANAS

La realización del proceso de biodegradación se dió por medio de tres sub etapas: pre inoculación, conteo o curva de crecimiento microbiano y reproducción de microorganismos.

3.3.1. ANÁLISIS DE LA REDUCCIÓN DE PCB'S EN LA BIODEGRADACIÓN AEROBIA

En la Tabla 3.17. se observan las condiciones de operación de cada sistema aerobio y los porcentajes de degradación de concentración de contaminantes alcanzados.

Tabla 3.17. Comparación de resultados de remoción de los biorreactores aerobios

Reactor	pH	Aireación [cm³/min]	Agitación [rpm]	% Remoción de PCB's
Aerobio 1	6,2	60	NO	9,30
Aerobio 2	6,8	70	NO	15,41
Aerobio 3	6,2	60	SI	7,71

En el reactor aerobio 1, la degradación alcanzada es de 9,30%, los parámetros de control fueron: pH de 6,2; aireación de 60 cm³/min, sin agitación; el reactor aerobio 3, la degradación alcanzada fue de 7,71%, el pH de 6,2; aireación de 60 cm³/min, con agitación. Tanto el pH como la aireación fueron los mismos,

comparando los sistemas 1 y 3, la agitación puede no desempeñar un papel importante en este tipo de biodegradación, ya que a las mismas condiciones de pH y aireación el sistema 1 presentó una mejor degradación.

El reactor aerobio 2, con pH de 6,8, aireación de 70 cm³/min y sin agitación, obtuvo el mayor porcentaje de degradación (15,41%). Esto puede demostrar que los microorganismos crecen y se desarrollan de mejor manera en pH's ácidos; por otro lado la aireación demuestra que las enzimas pudieron haber trabajado de mejor manera al tener mayor presencia de oxígeno en el inicio de la ruta metabólica, según Arbeli (2006), si la primera enzima no puede iniciar el metabolismo, la degradación será mínima o no se obtendrá; es decir la primera enzima (BphA) influye en la eficacia de la catálisis de las siguientes enzimas de la ruta metabólica. Por lo tanto, en los reactores aerobios 1 y 3, se concluye que pudieron requerir de mayor aireación para poder iniciar y desarrollar la ruta metabólica de las bacterias en el medio.

3.3.2. ANÁLISIS DE LA REDUCCIÓN DE PCB'S EN LA BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA

En la Tabla 3.18. se observa las condiciones de operación de cada sistema aerobio y los porcentajes de degradación alcanzados.

Tabla 3.18. Comparación de resultados de remoción de los biorreactores anaerobios

Reactor	pH	Tasa de carga en base a metanol [g/L/día]	Agitación durante la adición de la tasa de carga	% Remoción de PCB's
Anaerobio 1	6,2	0,20	SI	8,02
Anaerobio 2	6,4	0,25	SI	4,84
Anaerobio 3	6,6	0,30	SI	3,58

Basándonos en los resultados de la Tabla 3.18., es evidente que el biorreactor 1, con pH de 6,2 y carga de metanol de 0,20 g/L/día, presentó la mejor degradación

(8,02%). Esto pudo deberse a que, a un pH muy ácido los microorganismos degradaron con más facilidad el metanol (sustrato adicional).

La tasa de carga diaria de metanol utilizada en el reactor anaerobio 1 es la menor, lo que puede demostrar que es la cantidad adecuada en la que el sistema generó la energía necesaria para activar las enzimas que posteriormente rompieron el enlace carbono – cloro del PCB (Liu, 2004, p. 17).

El porcentaje de remoción del reactor anaerobio 1 no fue mayor debido probablemente al uso del surfactante *Tween* 80, el cual pudo haber inhibido la degradación e incluso alterado la composición de la comunidad microbiana en lugar de incrementar la biodisponibilidad, según estudios anteriores mencionados por Arbeli, 2006. El biorreactor anaerobio 2, presentó la degradación del 4,84%, a pesar de tener una carga de metanol mayor al del sistema anaerobio 1 (0,25 g/L/día) y un pH de 6,4.

Respecto al biorreactor anaerobio 3, los parámetros de pH y carga del metanol son mayores a los dos anteriores (pH: 6,6 y 0,30 g/L/día) el porcentaje de degradación fue de 3,58%. Esto puede referirse a que el consorcio bacteriano se desarrolla de mejor manera a pH's más ácidos.

En relación al biorreactor anaerobio 1 se puede establecer que los microorganismos no necesitaron más energía para la degradación de los PCB's y que el metanol en menor cantidad y por su estructura molecular más simple funcionó como un sustrato adicional para la degradación anaerobia.

En la Figura 3.21. se establece de manera gráfica los porcentajes de remoción de PCB's de cada sistema de biodegradación aerobia y anaerobia presentando inicialmente al sistema que presentó el mayor porcentaje de remoción de contaminantes de PCB's, hasta el sistema que presentó menor degradación del aceite dieléctrico.

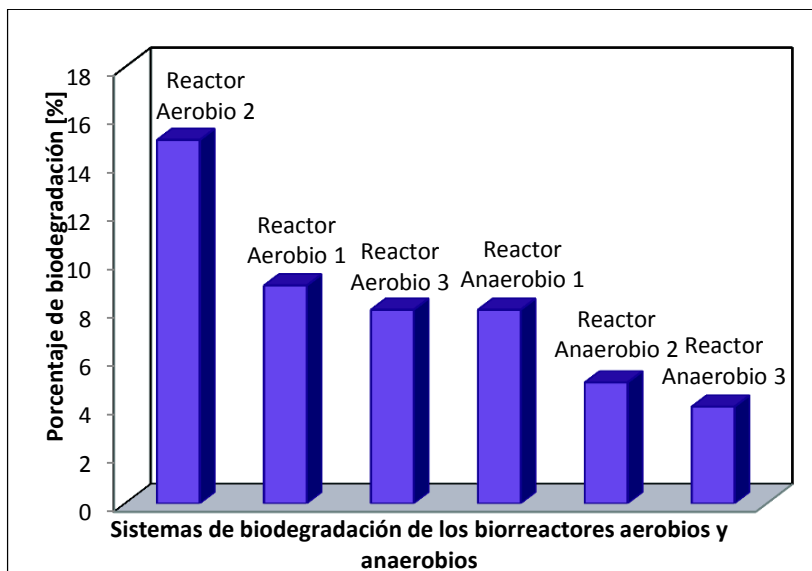


Figura 3.21. Porcentaje de remoción de contaminantes de PCB's de los sistemas de degradación de los biorreactores aerobios y anaerobios

De acuerdo a la Figura 3.21. que mostró los mejores sistemas de biodegradación de acuerdo al porcentaje de remoción de contaminantes de PCB's en los biorreactores aerobios y anaerobios al término de 15 y 20 semanas respectivamente lo que indicaría que los sistemas de degradación aerobia obtuvieron mayor cantidad de remoción de PCB's, comparados con los sistemas anaerobios. Además se evidencia que los aceites dieléctricos poseen mejor afinidad a las condiciones de las bacterias aerobias y a su vez lograron degradarse en mayor porcentaje en lo aceites con menor concentración de PCB's, en los cuales es más fácil romper los enlaces carbono-cloro de moléculas más pequeñas (Liu, 2004, p. 16).

3.3.3. COMPARACIÓN ENTRE EL MEJOR SISTEMA AEROBIO Y ANAEROBIO

Al comparar los sistemas biodegradación aerobia y anaerobia, se determinó mediante el porcentaje de remoción de PCB's el mejor de los sistemas aerobio y anaerobio de acuerdo a la Figura 3.21. A partir de esta figura se obtienen los mejores sistemas de biodegradación, de los cuales el biorreactor que

presenta una mayor disminución en la concentración de contaminantes de PCB's en el aceite tratado y sus condiciones de operación se muestran en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Mejor sistema de biodegradación de PCB's

Reactor	Condiciones de operación		% Remoción de PCB's
Aerobio 1	pH	6,2	15
	Aireación [cm ³ /min]	60	
	Agitación [rpm]	NO	

El sistema aerobio 1 pudo degradar más PCB's debido a la menor concentración del aceite dieléctrico. Un 15% de remoción de PCB's en un aceite que tiene una concentración de 702 ppm en congéneres de Aroclor 1254. Este sistema es el mejor evaluado de acuerdo a la mayor remoción de contaminantes del aceite dieléctrico, pero no quiere decir que haya sido lo esperado en esta experimentación.

No es un resultado satisfactorio aunque el consorcio microbiano presentó mejores resultados a condiciones aerobias para optar por un método nuevo de descontaminación que los usualmente empleados como el método Goodyear o el empleado con fluidos super críticos.

3.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS SISTEMAS DE BIODEGRADACIÓN AEROBIA Y ANAEROBIA

La evaluación económica del proyecto se realizó con base al balance de masa y energía de los sistemas de biodegradación diseñados. Se tomó en cuenta los costos de: equipos, accesorios, construcción, mano de obra, materia prima e insumos.

El terreno se adquirirá en el Parque Industrial del Inga, en donde el costo por

metro cuadrado es de aproximadamente \$ 100,00 y el costo de construcción es de \$ 150,00 datos que fueron proporcionados por la Cámara de la Industria de la Construcción.

Se eligieron los costos de equipos teniendo en cuenta material, dimensiones, potencia y demás especificaciones técnicas. En el caso de los biorreactores y accesorios se solicitó cotizaciones diferentes y se seleccionaron las más convenientes.

Los biorreactores son de una capacidad de 10 m^3 , las dimensiones son: $D = 1,85 \text{ m}$ y $L = 3,7 \text{ m}$, de forma cilíndrica vertical. El material es Acero Inoxidable 314 (Fundación Universitaria del Tecnológico de Copenalco, 2014).

El biorreactor anaerobio tendrá incorporado un tanque para la recolección de metano, el mismo que será controlado por una válvula de despresurización, además de dos tanques (metanol y aceite dieléctrico), mismos que descargarán por medio de un control de flujo la cantidad de sustrato necesaria para que se lleve a cabo el proceso de degradación.

Se requerirá tanques de almacenamiento para ácido clorhídrico y sosa caustica, los volúmenes serán de 27,23 y 41,6 galones respectivamente. Las capacidades se determinaron de acuerdo al consumo de los reactivos en la regulación del pH en función del volumen total del biorreactor a escala industrial de 10 m^3 de aceite dieléctrico con PCB's. No se han establecido costos para los tanques de almacenamiento del aceite dieléctrico debido a que la empresa que requiera del tratamiento entregará el aceite contaminado envasado.

La instrumentación básica de la planta requerirá de un termómetro y pH metro en el biorreactor. Respecto a accesorios primarios, se utilizarán bombas, tuberías y un compresor de 50 HP de potencia, mismo que tiene un costo de \$ 2 876,00. Los costos de los equipos de degradación y maquinaria se detallan en la Tabla 3.20, se consideraron los costos de mantenimiento, repuestos y accesorios de acuerdo a CIMA proveedores.

Tabla 3.20. Costo de equipos y maquinaria

Denominación	Costo [\$]
Equipos de degradación	50 958,00
Instrumentación	7 639,23
Instalación equipos	11 578,90
Tuberías	3 256,41
Instalación servicios	4 874,20
Total	78 306,74

A continuación en la Tabla 3.21. se describen los costos de los activos del proyecto proporcionados por la Cámara de la Industria de la Construcción.

Tabla 3.21. Activos del proyecto

Denominación	Cantidad [\$]
Terreno y construcciones	77 900,00
Equipos y muebles de oficina	3 700,00
Total	81 600,00

La inversión total del proyecto es \$ 177 108,38 dólares, está compuesta por la inversión fija y el capital de operación, \$ 132 458,00 y \$ 44 650,38 dólares respectivamente y se presenta en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Inversión total

Inversión total	
Denominación	Costo [\$]
Terreno y construcciones	77 900,00
Maquinaria y equipos	50 958,00
Equipos y muebles de oficina	3 600,00
Subtotal 1	132 458,00
Capital de operación	44 622,88
Subtotal 2	44 622,88
Total final	177 080,88

Para la estimación del costo de materiales directos de producción no se tomaron

en cuenta a los aceites dieléctricos, ya que serán entregados por la empresa que requiera el servicio. Con base en esto, únicamente se tomó en cuenta como materia prima a las bacterias biodegradadoras. Los cálculos se muestran en el Anexo XII. No se han considerado los tanques de almacenamiento del aceite dieléctrico ya que la empresa que requiera el tratamiento entregará el mismo envasado.

Respecto a los insumos, la sosa cáustica y ácido clorhídrico han sido considerados; los que tienen un costo de \$ 44,80/kg y \$ 22,40/kg respectivamente. En la Tabla 3.23. se puede observar el costo de materiales directos utilizados en el proceso de biodegradación aerobia y anaerobia.

Tabla 3.23. Materiales directos

Materia prima			
Denominación	Cantidad [kg]	Costo [\$]	Costo total [\$]
Bacterias AWT - B350	0,12	114,00	27,36
Subtotal 1			109,44
Insumos			
Denominación	Cantidad [kg]	Costo [\$]	Costo total [\$]
Sosa Cáustica	447,30	44,80	10 019,52
Ácido Clorhídrico	374,86	22,40	8 396,86
Subtotal 2			18 416,38
Total			18 443,74

En la Tabla 3.24. se detallan los materiales indirectos, específicamente se puede observar el costo de los análisis por cromatografía de gases, con frecuencia quincenal. Los análisis se realizarán en laboratorios acreditados en el exterior, y los costos se han estimado de acuerdo al precio de análisis por cromatografía, servicio prestado por Laboratorios Gruentec Enviromental Services.

Tabla 3.24. Materiales indirectos

Denominación	Cantidad de análisis	Costo [\$]	Costo total [\$]
Análisis por cromatografía de gases	34	198,00	6 732,00
Total			6 732,00

Se consideraron tres empleados que se involucrarán directamente con el proceso de planta: un jefe de operaciones y dos supervisores que se determinaron en función del tiempo de operación en planta (24 horas). El personal administrativo estará compuesto por tres guardias, que trabajaran en turnos rotativos de 8 horas, las referencias de los sueldos mensuales presentados en la Tabla 3.25, se estimaron de acuerdo a los sectoriales del IESS 2016, acorde a la actividad económica realizada por la planta de degradación.

Tabla 3.25. Nómina laboral

Denominación	Cantidad	Sueldo mensual [\$]	Costo total [\$]
Jefe de Operaciones	1	1 400,00	22 943,45
Supervisor	3	950,00	47 153,32
Guardia	3	500,00	25 395,71
Total			95 492,47

En la Tabla 3.26, se describe la depreciación anual de los activos del proyecto.

Tabla 3.26. Depreciación de los activos

Denominación	Vida útil [años]	Costo [\$]	Costo anual [\$]
Terreno y construcciones	25	77 900,00	3 116,00
Equipos y muebles de oficina	5	3 700,00	740,00
Total			3 856,00

Respecto a los suministros que se utilizarán en el proyecto, se consideró todo lo relacionado a los servicios industriales: agua potable y energía eléctrica. En la Tabla 3.27, se presenta el consumo energético de cada equipo, se debe tener en cuenta que la planta de biodegradación opera 24 horas.

Tabla 3.27. Consumo energético de los equipos

Equipo	Tiempo de funcionamiento [h]	Potencia [kW]	Consumo energético [kW.h]
Compresor	24	37,29	894,96
Total			894,96

En la Tabla 3.28. se presenta el costo de los suministros requeridos. El consumo de energía eléctrica es \$ 12 854,40 dólares respecto a un consumo energético de 2 678 kW. El consumo de agua potable estimado es de 19,75 m³.

Tabla 3.28. Suministros del proyecto

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo Unitario [\$]	Costo Total [\$]
Energía Eléctrica	kW	2 678	0,40	15,01
Agua	m ³	19,75	0,38	12 854,40
Total				12 869,41

En la Tabla 3.29. se presentan los costos seguros y sus porcentajes de acuerdo a los pagos. Se consideró un rubro para seguros de maquinaria y equipos; que además respaldará una póliza contra daños a terceros, en caso de presentarse un caso de emergencia por la peligrosidad que los PCB's tienen hacia el medio.

Tabla 3.29. Costos seguros

Concepto	Costo [\$]	Porcentaje [%]
Materiales directos	17 402,92	13 %
Mano de obra	88 353,30	66 %
Materiales indirectos	6 693,43	5 %
Depreciación	4 016,60	3 %
Suministros	12 048,18	9 %
Seguros y póliza	5 354,75	4 %
Total	133 868,64	100%

En base a todos los costos descritos anteriormente, fue posible estimar el costo de degradación, mismo que se detalla en la Tabla 3.30.

Tabla 3.30. Costo unitario de degradación

Costo de degradación[\$]	133 868,64
Degradación [T]	7 041,05
Costo unitario de producción [\$/T]	19,01
Costo unitario de producción [\$/m³]	23,76

En la Tabla 3.30. se especifica el costo unitario, en base a la cantidad total de aceites dieléctricos que el Ecuador posee como pasivo ambiental según el último inventario realizado en el año 2009 por parte de PNUMA los países que firmaron el Convenio de Estocolmo, el mismo que es de \$ 23,76 /m³.

Los costos de degradación de aceite dieléctrico con PCB's por los procesos Goodyear y de extracción con fluidos súper críticos son de \$727,00 y \$ 220,00 - \$ 270,00 respectivamente; al compararlos con el costo de la biodegradación aerobia del aceite dieléctrico (\$ 23,76/m³), éste es el proceso más económico con eficiencia de degradación del 15 %. Los porcentajes de degradación de los procesos Goodyear y de extracción con fluidos súper son más eficientes (99,85 % y 99,95 % respectivamente).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Las concentraciones iniciales de los aceites dieléctricos contaminados con PCB's fueron de: 702 ppm y 1 918,20 ppm, valores que superan las cantidades máximas permisibles de 50 ppm y son consideradas como sustancia contaminada y sustancia pura de PCB's respectivamente de acuerdo a la norma EPA (Environmental Protection Agency), norma tomada como referencia debido a que la legislación nacional no establece una normativa para concentraciones de PCB's en aceites dieléctricos.
- Los microorganismos utilizados no presentan una buena afinidad para la degradación de compuestos organoclorados, a esto se le puede atribuir la baja remoción de PCB's, aerobio 15,41% y anaerobio 8,02%.
- En el proceso de biodegradación de aceites dieléctricos estudiado en este proyecto no se obtuvieron descontaminaciones que superen el 15% de remoción de PCB's, por lo que no permitió obtener una disminución de estos contaminantes respecto a lo esperado y citado en la revisión bibliográfica donde estudios alcanzan hasta el 70% de remoción. El método no es viable.
- El porcentaje de reducción de PCB's en los aceites estudiados fue mayor en los ensayos con menor concentración inicial de PCB's (702 ppm).
- El sistema aerobio que presentó las mejores condiciones, fue el biorreactor 2. Los parámetros de operación empleados fueron: pH=6,8; aireación 70 cm³/min y sin agitación, el porcentaje de degradación alcanzado fue 15,41%.

- El sistema anaerobio que presentó mejores condiciones, fue el biorreactor 1. Los parámetros de operación fueron: pH=6,2 y tasa de carga de metanol de 0,20 g/L/día, el porcentaje de degradación alcanzado fue 8,02%.
- El biorreactor aerobio para la remoción de PCB's a escala industrial con capacidad de 10 m³, presenta los siguientes parámetros: altura del reactor 3,71 m, diámetro del reactor 1,853 m, diámetro del agitador 0,618 m, longitud del agitador 3,08 m, largo de la paleta del agitador 0,154 m, altura de la paleta del agitador 0,124 m, velocidad de agitación 150 rpm, potencia 0,4 W, aireación 70 cm³/min.
- El método más económico es la biodegradación aerobia con 23,76 \$/m³, en comparación al proceso Goodyear y extracción con fluidos supercríticos, los precios que manejan son 727 \$/m³ y 220 - 270 \$/m³, respectivamente, sin embargo presenta una baja remoción de PCB's.

4.2. RECOMENDACIONES

- Identificar las cepas a las que pertenecen los organismos utilizados en esta experimentación (bacterias B₃₅₀), con el fin de conocer el grado de potencial degradativo para PCB's de la cepa utilizada.
- Aislar las cepas de Pseudomonas sp y Burkholderia Xenovorans que son afines a la degradación PCB's.
- Desarrollar estudios complementarios con otros microorganismos capaces de degradar en mayor porcentaje los compuestos organoclorados presentes en los aceites dieléctricos analizados.
- Evaluar el comportamiento de los microorganismos utilizados (B₃₅₀) en los aceites dieléctricos con concentraciones de PCB's inferiores a 700 ppm y

diferentes parámetros de operación como pH y aireación.

- Incrementar el tiempo de degradación y realizar análisis adicionales por cromatografía de gases que permitan la obtención de un modelo matemático que describa la descomposición de PCB's con los microorganismos utilizados.

- Probar otros sustratos adicionales como: tolueno, propano y butano para apoyar al co-metabolismo de la ruta de metabólica anaerobia y aerobia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Andino, P. (2013). *Plan de Acción para el Manejo de Desechos Peligrosos con énfasis en Bifenilos Policlorados (PCB's) en la Empresa Eléctrica Quito*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Máster en Gestión Ambiental publicado). Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador.
2. APHA 2550. (2010). *Temperature*. American Public Health Association. Estados Unidos.
3. APHA 4500 H-B. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. Estados Unidos.
4. Aráoz, B., Viale, A., (2004). *Microbial dehalogenation of polychlorinated biphenyls in aerobic conditions*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
5. Arbelí, Z., (2009). Biodegradación de Compuestos Orgánicos Persistentes (COP): I. *El caso de los Bifenilos policlorados (PCB)*. (pp. 57-88). Bogotá, Colombia: Acta biol. Colombia.
6. ASTM D1480-12. (2012). *Standard Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Viscous Materials by Bingham Pycnometer*. American Section of the International Association for Testing Materials Estados Unidos.
7. ASTM D4059-00. (2010). *Standard Test Method for Analysis of Polychlorinated Biphenyls in Insulating Liquids by Gas Chromatography*. American Section of the International Association for Testing Materials. Estados Unidos.

8. Baca, G., (2001). *Evaluación de Proyectos*, (6ta Ed.). México D.F., México: McGRAW-HILL.
9. COALDES, (2003). *Inventario Preliminar de Bifenilos Policlorados PCB's*. Quito, Ecuador.
10. CONELEC, (2012). *Manual de procedimientos para el manejo de Bifenilos Policlorados (PCB's) en el sector eléctrico ecuatoriano*. Dirección de Gestión Ambiental.
11. Changoluisa, M., (2004). *Tratamiento de Aceites Dieléctricos Clorados por Métodos Químicos*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
12. Cuellas, A., (2007). *Biorreactores, Teoría*. Universidad Nacional de Quilmes, Buenos Aires, Argentina
13. De Giorgis, F., Schwarz, I., Chamy, R., y Schiappacasse, M. (2003). *Alternativas de Tratamientos Biológicos para la Remediación de Suelos Contaminados con PCB's en Chile*. XV congreso de ingeniería sanitaria y ambiental, Concepción, Chile. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile15/alterna.pdf>, (Febrero, 2014).
14. Faroon, O., Keith S., Smith C., y De Rosa C. (2003). *Polychlorinated biphenyls: Human health aspects*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, Georgia, USA. Recuperado de: <http://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad55.htm#5.2> (Octubre, 2015).
15. Gil, I., (2012). *Tutoriales de Lubricación: Transformadores. Brettis, (vol 1)*, (pp.18-25).

16. Global Asset Protection Services LLC. (2008). Oil And Chemical Plant Layout And Spacing. *GAPS Guidelines*, GAP(2.5.2), 3-5. doi: http://xlcatlin.com/~media/gaps/252_0.pdf.
17. Golden, R., Doull, J., Waddell, W. y Mandel, J. (2003). *Potential Human Cancer Risks from Exposure to PCBs: a Tale of Two Evaluations, Critical Reviews in Toxicology*. Universidad de Kansas Medical Center, Ciudad de Kansas, Kansas.
18. González, M. y Gutiérrez, J. (2012). *Tendencia en el Manejo y Análisis de Policloruros de Bifenilo (PCB's)*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Químico Industrial). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
19. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (2014). "*Bioprocesos, Equipos y Procedimientos*", Madrid, España. Recuperado de <http://www.idae.es> (Octubre, 2015).
20. Klasson, T., Just, E., (2000). *Prediction of PCV de Chlorination and Degradation Environmental Endpoints*. Chemical Technology Division Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
21. León, J., (2001). *Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión*. México D.F, México: Ingeniería León C.A. de C.V.
22. Lorán, S., (2007), *Estudio de la Contaminación y Evaluación del Riesgo de Dibenzodioxinas, Dibenzofuranos y Bifenilos Policlorados en Alimentos Constituyentes de la Dieta Infantil*. Universidad de Zaragoza, España.
23. Lopera, E., Aguirre, J., (2006). *Purificación de Aceites Aislantes*

Contaminados con Bifenilos Policlorados (PCB's). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

24. López, E., Díez, F., Ordoñez, S., (2001). *Contaminación por Bifenilos Policlorados. Problemática Medioambiental y Tratamiento*. Universidad de Oviedo, Asturias, España.
25. Liu, K. (2004). *Aerobic and Anaerobic Process for PCB's Removal from Aqueous and Oil Phases*. (Tesis de maestría previa a la obtención del título de Maestría en Ciencias de la bioingeniería). Universidad de Hawaii, Manoa, Estados Unidos.
26. Manacorda, A., Cuadros, M. y Álvarez, A. (2007). *Manual Práctico de Microbiología Ambiental I*. Tomo I: Microbiología Ambiental. (p. 3). Escuela Superior de Salud y Ambiente, Buenos Aires, Argentina.
27. McCabe, W., Smith, J., (2003). *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.
28. Madigan, M., Martinko, J., Parker, J. (2004). *Brock: Biología de los Microorganismos*. (10ma Ed.). Madrid, España: Pearson Prentice Hall.
29. Murillo, J., Marchena, V., (2006). *Estudio Básico de Contaminación de Aceites Dieléctricos Mediante Láser*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico) Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
30. Paz, M. (2010). *Ensayos del Biofilm (Pseudomonas sp. y Xanthomonas sp.) In Vitro para la Degradación de Agentes Tóxicos Contenidos en Plaguicidas como una Alternativa para la Biorremediación de Aguas Dulces*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Biólogo). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

31. Perry, R., Green, D. (2001). *“Manual del Ingeniero Químico”*. (7ma ed). Madrid: España: McGraw-Hill/Interamericana de España. S. A. U.
32. Pica, Y., Ramirez, P., (2012). *“Evaluación de la Toxicidad de Extractos Acuáticos de Cianobacterias Mediante el Ensayo con Semillas de Lechuga”*. En Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Ed. 1). Contribuciones al Conocimiento de Toxicología y Química Ambiental en México. México D. F., México: Iconographic.
33. PNUMA. (2002). *Productos Químicos “Estudio de las Tecnologías Actualmente Disponibles para la Destrucción de PCB’s sin Incineración”*. Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, Chile.
34. Recalde, P., Zorrilla, M., (2008). *Evaluación del Contenido de Bifenilos Policlorados (PCB’s) en los Aceites Dieléctricos Empleados en Transformadores de Potencia, Distribución y Servicio en el sector Industrial y Comercial de la ciudad de Guayaquil*. Universidad de Guayaquil, Guayas, Ecuador.
35. Reyes, W. y Vásquez M. (2002). *Degradación de Aroclor 1242 por Pseudomonas sp.* Revista de la Sociedad Peruana de Gestión Ambiental, Volumen(2), s/p. Recuperado de: http://www.linros-interinsumos.com/Tempo/revista1/degradacion_Aroclor_1242.htm (Febrero, 2014).
36. Rivera, M., Suárez, P., (2010). *Diseño y Construcción de un Biorreactor Batch Aerobio para Cultivo de Bacterias Biodegradadoras de Petróleo*. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
37. Romero R. (2007). *Microbiología y Parasitología Humana: Bases Etiológicas*

de las Enfermedades Infecciosas y Parasitarias. (3er Ed.). México D.F., México: Editorial Médica Panamericana S.A. de C.V.

38. Ruiz, G., (2005), *Biodegradación de Bifenilos Policlorados (BPCs) por Microorganismos*. Universidad de Guanajuato, México.
39. Ruiz, G., Fernández, J., Rodríguez, R., Poggi, H., (2001). *Utilización de residuos agroindustriales*. Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, México D.F., México.
40. Suárez, R., (2006). *Conociendo a los Bifenilos Policlorados (PCB, PCBS, BPCS)*, Fundación M'Biguá – Producciones Educativas, Paraná, Argentina.
41. Sinnott, R., Towler, G. (2008). *Chemical Engineering Design, Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design: Equipment selection, specification, and design*. (5ta Ed.). Butterworth-Heinemann, Reino Unido: Elsevier Inc.
42. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *Integrated Risk Information System (IRIS) on PCBs*. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, Washington, DC. 1999.
43. Villafañe, E., Torres, Z. (2012). *Estudio de la Degradación de PCB (Bifenilos Policlorados) utilizando surfactantes con nutrientes*. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. San Juan, Puerto Rico.

ANEXOS

ANEXO I

CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD GRAVIMÉTRICA Y PESO ESPECÍFICO DE LAS MUESTRAS DE ACEITES DIELÉCTRICOS INICIALES

Densidades de los aceites dieléctricos empleando densitómetros

En esta determinación se empleó un densitómetro para cada aceite, se realizó la lectura:

$$\delta_{\text{aceite con más PCB's}} = \frac{1,290 \text{ g}}{\text{cm}^3} \qquad \delta_{\text{aceite con menos PCB's}} = \frac{1,232 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

Densidades de los aceites dieléctricos empleando la norma ASTM D 1480-12

Las densidades de los aceites empleados se obtuvieron mediante ensayos de densidad gravimétrica y peso específico de acuerdo a la norma ASTM D 1480-12 y siguiendo la Ecuación [Al.1]:

$$\delta_d = \frac{M_T - M_P}{V_P} \qquad \text{[Al.1]}$$

Ejemplo de cálculo de las densidades de los aceites de acuerdo a la norma ASTM D 1480-12

Cuando el picnómetro está lleno de agua (fluido de referencia) se cumple la Ecuación Al.2 en la que:

$$\delta_w = \frac{M_w}{V_w} + \frac{M_w}{V_P} \qquad \text{[Al.2]}$$

Resolviendo la ecuación Al.2, se obtienen las ecuaciones Al.3 y Al.4:

$$V_p = \frac{M_w}{\delta_w} = \frac{M_{p+w} - M_p}{\delta_w} \quad [\text{AI.3}]$$

$$\delta_w = \frac{M_{p+d} - M_p}{M_{p+w} - M_p} \times \delta_w \quad [\text{AI.4}]$$

Donde:

M_T : masa del picnómetro + masa de la muestra [kg]

M_p : masa del picnómetro [kg]

M_w : masa del agua [kg]

V_p : volumen del picnómetro [m^3]

δ_d : densidad del líquido [kg/m^3]

δ_w : densidad del agua [kg/m^3]

Los datos tomados en el laboratorio para la muestra del aceite dieléctrico con mayor concentración se observan en la Tabla AII.1.

Tabla AI. 1. Datos de las variables tomadas en laboratorio para determinar densidad del aceite dieléctrico con mayor concentración

Variabes	Valores [kg]
M_p	24,7378
M_{p+w}	54,0886
M_{p+d}	63,1939

Los datos para el aceite con menor concentración se observan en la Tabla AII.2.

Tabla AI. 2. Datos de las variables tomadas en laboratorio para determinar densidad del aceite dieléctrico con menor concentración

Variabes	Valores [kg]
M_p	22,7376
M_{p+w}	56,3307
M_{p+d}	64,7695

Con los datos obtenidos, se hallaron las densidades de los aceites dieléctricos que fueron empleados en este procedimiento, utilizando el ejemplo de cálculo los valores fueron:

$$\delta \text{ aceite con mayor concentración de PCB's} = \frac{1,310 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

$$\delta \text{ aceite con menor concentración de PCB's} = \frac{1,251 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

Densidades de otros componentes usados en los reactores

Las densidades de los componentes usados han sido consultados de acuerdo al manual del Ingeniero Químico. (Perry R., Green D., 2001, p. 2-10)

$$\delta \text{ aceite del agua} = \frac{1,000 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

$$\delta \text{ metanol} = \frac{0,791 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$


$$\delta \text{ tween 80} = \frac{1,064 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

$$\delta \text{ ácido clorhídrico} = \frac{1,190 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$


$$\delta \text{ sosa cáustica} = \frac{2,130 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

ANEXO II

CATÁLOGO DE BACTERIAS COMERCIALES B₃₅₀ DE AWT S.A.



Aguas y Suelos contaminados con Hidrocarburos



FORMULACIÓN BACTERIANA más BIOESTIMULANTES más MICRONUTRIENTES

=

MENOS DBO

MENOS DQO

MENOS Sólidos Suspendidos

B **350**

B350 es un compuesto de microorganismos premezclados con todos los nutrientes necesarios para su uso inmediato en remediación de suelos y tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos y otros elementos orgánicos.

Para asegurar un desempeño óptimo de estos organismos bajo las más duras condiciones, son producidos y mezclados con nutrientes y estimulantes de "alta potencia".

B350 contiene organismos que degradarán un amplio rango de hidrocarburos, incluyendo: gasolina, diesel, petróleo, benceno, tolueno, etilbenceno, y xileno, tanto en suelos como en aguas residuales de procesos petroquímicos.

Por supuesto, todos los requerimientos varían dependiendo del suelo, las condiciones climáticas (humedad, temperatura, cantidad de lluvias), población bacteriana indígena, contaminantes involucrados, la concentración de esos contaminantes y la cantidad de tiempo permitida para limpiar el sitio.

Los beneficios que B350 ofrece son:

- Limpiará profundamente suelos contaminados
- Aumentará los procesos naturales
- Elimina áreas antiestéticas
- Reduce DBO y DQO
- Reduce los costos de remediación
- Reduce depósitos de petróleo en tanques, alcantarillas, drenes y tanques de aireación.
- Acelera la ruptura de olores desagradables

Sitios de aplicación

Suelos contaminados con HC
Plantas de aguas residuales
Drenes, desagües y tuberías
Lagunas aerobias, anaerobias y facultativas

Especificaciones

Presentación	B
Color	Azul o Café
Nutrientes	Biológicos y estimulantes
No. Bacterias	7 billones por gramo
No. Cepas	8

Condiciones de trabajo

pH	6-9
Temperatura	Hasta 50° C

Presentación

Fundas de 1 lb.
Balde de 20 lbs.

Abra el paquete y agregue las fundas de plástico soluble en agua, directamente en el sistema.

Dosificación

Plantas de Tratamiento

Caudal	Dosis Inicial	Mantenimiento
Hasta 5.000 gpd	1.5 lbs	0.5 lbs / semana
Hasta 10.000 gpd	3 lbs	1 lb / semana
Hasta 20.000 gpd	5 lbs	1.5 lbs / semana
Hasta 50.000 gpd	7 lbs	2 lbs / semana
Hasta 100.000 gpd	10 lbs	3 lbs / semana
Hasta 200.000 gpd	15 lbs	4 lbs / semana

Tuberías, drenes y desagües

Disueltor 1/2 libra en 20 litros de agua y luego dosificar 100 ml de la solución por cada 100 mm de diámetro de la tubería, dren o desagüe, todos los días.

Suelos Contaminados con HC

1 libra por cada metro cuadrado

Lagunas

Aerobias
Igual que en plantas de tratamiento

Facultativas

Dosis Inicial	Mantenimiento
20 lbs* durante 3 días	2 lbs* / día

*Por cada 5.000 m² de superficie

Anaerobias

<100.000 galones 1 lb, 2x por semana por 5.000 gal.
>100.000 galones 1/2 lb, 1x por día por 5.000 gal.

Figura AII.1. Hoja de especificación de las bacterias empleadas en la biodegradación aerobia y anaerobia (Andean Water Treatment S.A., 2015, p. 11).

ANEXO III

CÁLCULOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS BACTERIAS DEGRADADORAS AEROBIAS Y ANAEROBIAS

Ejemplo de cálculo realizado para la preparación el pre inóculo bacteriano aerobio

Los componentes para una solución de 500 mL de agua son: 5 mL aceite y 1 mL bacterias (Reyes y Vásquez, 2002, s/p). En la experimentación los cálculos realizados para 1 litro de pre inóculo bacteriano son:

$$\text{Agua} = 1 \text{ L}$$

$$\text{Aceite} = \frac{5 \text{ mL aceite}}{500 \text{ mL agua}} \times 1000 \text{ mL agua} = 10 \text{ mL aceite}$$

De acuerdo a la hoja de seguridad de las bacterias B₃₅₀, son necesarias 1.51 libras de bacterias liofilizadas en 5 000 galones de agua. Para el inóculo bacteriano aerobio se utilizó:

$$\text{Agua} = 1 \text{ L}$$

$$\text{bacterias aerobias} = \frac{1,51 \text{ lb}}{5000 \text{ gal}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3,78 \text{ L}} \times \frac{454 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times 1 \text{ L} = 0,036 \text{ g}$$

$$\text{Aceite} = \frac{5 \text{ ml aceite}}{500 \text{ mL agua}} \times 1000 \text{ mL agua} = 10 \text{ mL aceite}$$

Ejemplo de cálculo realizado para la preparación pre inóculo bacteriano anaerobio

Con los mismos componentes y cálculos de aceite y agua que el pre inóculo aerobio, los resultados fueron:

$$\text{Agua} = 1 L$$

$$\text{Aceite} = \frac{5 \text{ mL aceite}}{500 \text{ mL agua}} \times 1\,000 \text{ mL agua} = 10 \text{ mL aceite}$$

De acuerdo a la hoja de seguridad de las bacterias B₃₅₀, para cantidades menores a 100 000 galones de agua, se utilizó 1 lb de bacterias. Por consecuencia el inóculo bacteriano anaerobio se utilizó:

$$\text{bacterias anaerobias} = \frac{1 \text{ lb}}{10\,000 \text{ gal}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3,78 \text{ L}} \times \frac{454 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times 1L = 0,012 \text{ g}$$

ANEXO IV

CÁLCULOS REALIZADOS PARA OBTENER LAS CONSTANTES CINÉTICAS DE CRECIMIENTO DE LAS BACTERIAS

Para obtener la constante cinética de crecimiento de la población bacteriana k en medio aerobio y anaerobio, se calculó de acuerdo a la Figura 3.2. para sistemas aerobios y la Figura 3.3. para sistemas anaerobios mediante la Ecuación AIV.1.

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \text{[AIV.1]}$$

Donde:

m : Pendiente de la curva $\text{Ln}\left[\frac{\# \text{células}}{\text{mL}}\right]$ vs tiempo

Δy : Variación de $\text{Ln}\left[\frac{\# \text{células}}{\text{mL}}\right]$

Δx : Variación del tiempo [s]

A partir de la ecuación AIV.1 se desarrolla por definición los valores de una pendiente, que son el valor final menos el inicial tanto para numerador como denominador, en la Ecuación AIV.2.

$$m = \frac{\ln\left[\frac{\# \text{células}}{\text{ml}}\right]_f - \ln\left[\frac{\# \text{células}}{\text{ml}}\right]_i}{t_f - t_i} \quad \text{[AIV.2]}$$

$$m = \frac{\ln[2,79E7] - \ln[1,720E6]}{30 - 28}$$

$$m = 1,392$$

La Ecuación AIV.3 relaciona la pendiente y el tiempo de generación de las bacterias de las bacterias, que desglosando para el tiempo de generación calculadose obtiene finalmente el valor de g .

$$m = \frac{\ln[2N] - \ln[N]}{g} \quad [\text{AIV.3}]$$

$$m = \frac{\ln[2]}{g}$$

$$1,392 = \frac{0,693}{g}$$

$$g = \frac{0,693}{1,392} = 0,498 \text{ h}$$

La constante cinética está dada por la Ecuación AIV.4. por lo que se reemplazan los valores anteriores y se obtiene k .

$$k = \frac{\ln[2]}{g} \quad [\text{AIV.4}]$$

$$k = \frac{0,693}{1,863} = 0,372 \text{ h}^{-1}$$

ANEXO V

CÁLCULOS REALIZADOS PARA LA PUESTA EN MARCHA DE LOS REACTORES ANAEROBIOS

Ejemplo de cálculo realizado para la puesta en marcha de los reactores anaerobios

Para el metanol se realiza el cálculo del volumen a utilizar empleando la pureza del reactivo.

$$\text{Metanol} = \frac{1\,000\text{ mg}}{L} \times 3L \times \frac{100\%}{99,9\%} = 3\,003\text{ mg} = 3,003\text{ g}$$

Para los microorganismos, se necesitan 7 000 mg por cada litro (volumen del reactor anaerobio)

$$\text{Organismos} = \frac{7\,000\text{ mg}}{L} \times \frac{1\text{ g}}{1000\text{ mg}} \times 3L = 2,100\text{ g}$$

Del aceite contaminado con PCB's se requiere 12,8 g por cada cada litro (volumen del reactor anaerobio)

$$\text{Aceite contaminado con PCB's} = \frac{12,8\text{ g}}{L} \times 3L = 38,400\text{ g}$$

$$\text{Tween 80} = \frac{12,8\text{ g}}{L} \times 3L = 38,400\text{ g}$$

Ejemplo de cálculo realizado para la carga diaria de metanol del Reactor Anaerobio 1:

La carga diaria en base a metanol, fue variable para cada biorreactor aerobio, de tal manera que se calcula para cada sistema la cantidad de aceite y metanol que lo conforman, considerando que cada tasa de carga contiene 0,0125 mg de aceite

contaminado por litro de reactor; volúmen de aforo 3 litros, porcentaje de pureza del metanol 99,9%..

$$\text{Volumen añadido de metanol} = \frac{0,20g(\text{metanol} + \text{aceite})}{L. \text{ dia}} \times \frac{1\ 000\ \text{mg}}{1g} \times 3L$$

$$\text{Volumen añadido} = \frac{600\ \text{mg}(\text{metanol} + \text{aceite})}{\text{dia}} - \left(\frac{0,0125\ \text{mg}\ \text{aceite}}{L \times \text{dia}} \times 3L \right)$$

$$\text{Volumen añadido} = \frac{599,963\ \text{mg}\ \text{metanol}}{\text{dia}} \times \frac{1\ \text{g}\ \text{metanol}}{1000\ \text{mg}\ \text{metanol}} \times \frac{1\ \text{ml}}{0,791\ \text{g}} \times \frac{100\ \%}{99,9\ \%}$$

$$\text{Volumen añadido de metanol} = \frac{0,757\ \text{mL}\ \text{metanol}}{\text{día}}$$

Ejemplo de cálculo realizado para la carga diaria de metanol del Reactor Anaerobio 2:

$$\text{Volumen añadido de metanol} = \frac{0,25g(\text{metanol} + \text{aceite})}{\text{dia. L}} \times \frac{1\ 000\ \text{mg}}{1g} \times 3L$$

$$\text{Volumen añadido} = \frac{750\ \text{mg}(\text{metanol} + \text{aceite})}{\text{dia}} - \left(\frac{0,0125\ \text{mg}\ \text{aceite}}{L \times \text{dia}} \times 3L \right)$$

$$\text{Volumen añadido} = \frac{0,948\ \text{mL}\ \text{metanol}}{\text{día}}$$

Ejemplo de cálculo realizado para la carga diaria de metanol del Reactor Anaerobio 3:

$$\text{Volumen añadido de metanol} = \frac{0,30g(\text{metanol} + \text{aceite})}{\text{dia. L}} \times \frac{1\ 000\ \text{mg}}{1g} \times 3L$$

$$\text{Volumen añadido} = \frac{900 \text{ mg}(\text{metanol} + \text{aceite})}{\text{día}} - \left(\frac{0,0125 \text{ mg aceite}}{\text{L} \times \text{día}} \times 3\text{L} \right)$$

$$\text{Volumen añadido de metanol} = 1,130 \frac{\text{mL metanol}}{\text{día}}$$

ANEXO VI

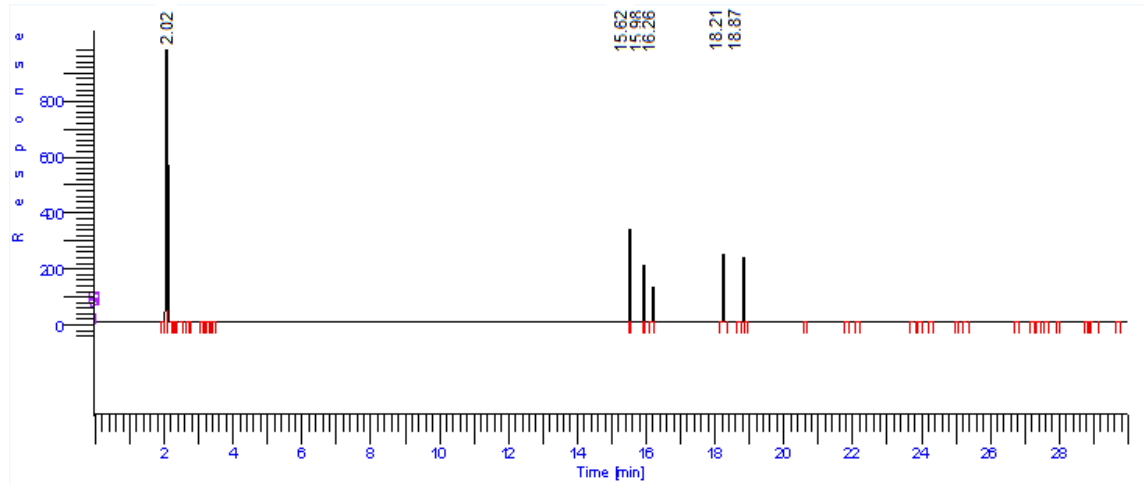
CROMATOGRAMAS DE MUESTRAS INTERMEDIAS DE LOS
BIORREACTORES AEROBIOS Y ANAEROBIOS CON SUS
PARALELAS

Figura AVI.1. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 3

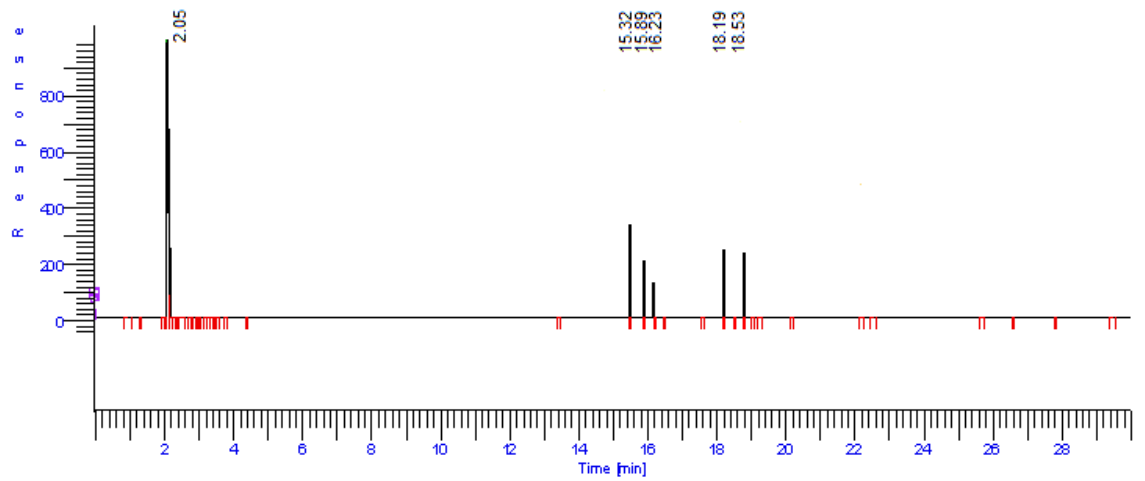


Figura AVI.2. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 3 paralelo

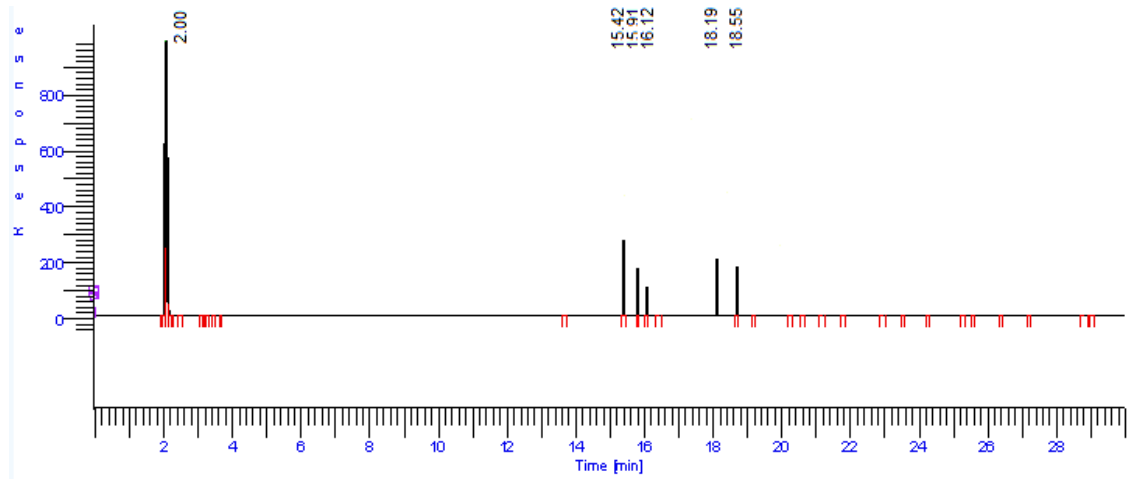


Figura AVI.3. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 6

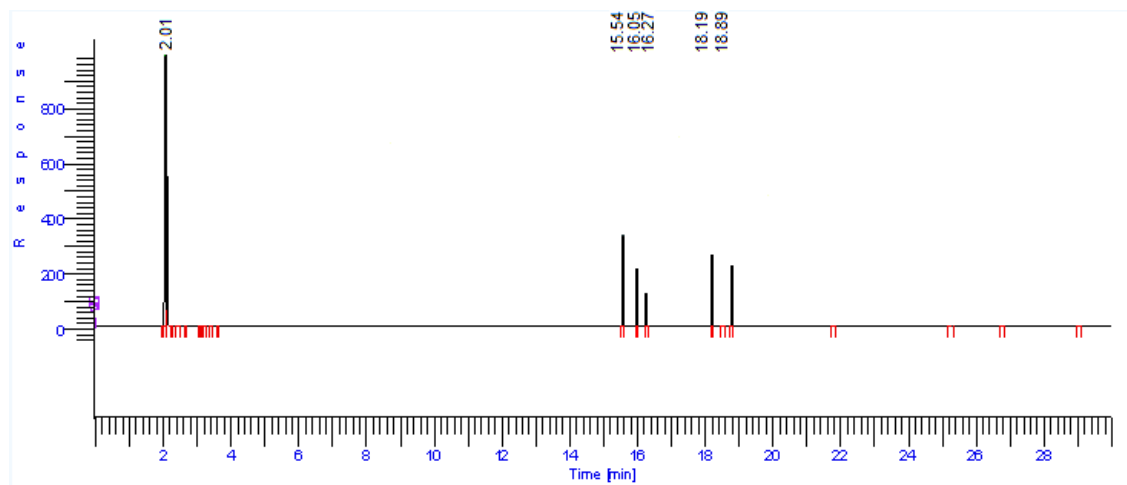


Figura AVI.4. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 6 paralelo

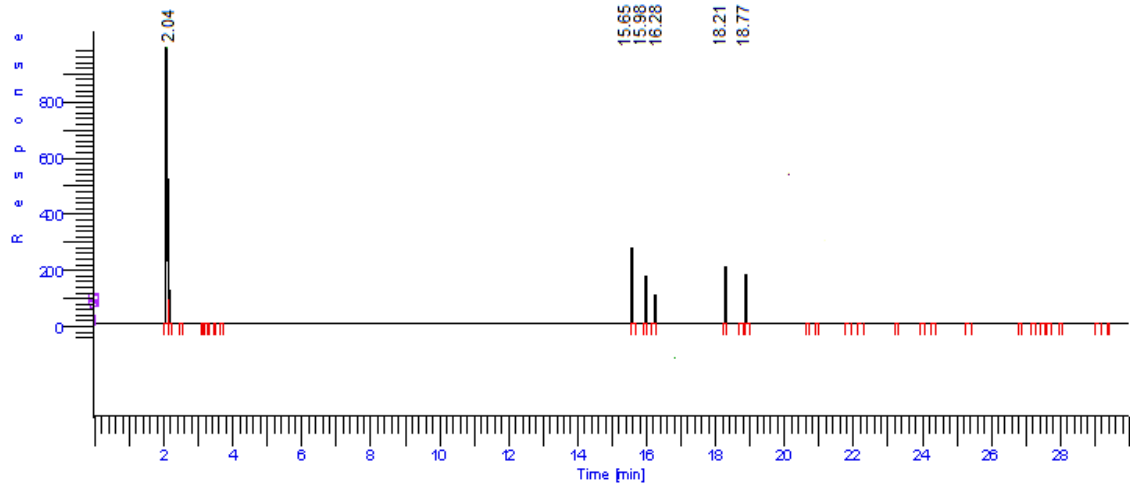


Figura AVI.5. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 9

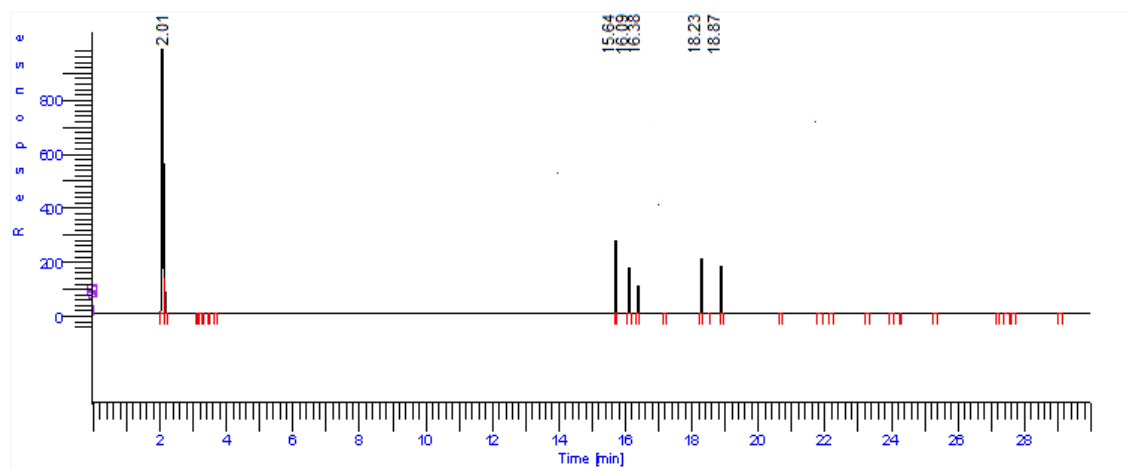


Figura AVI.6. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 9 paralelo

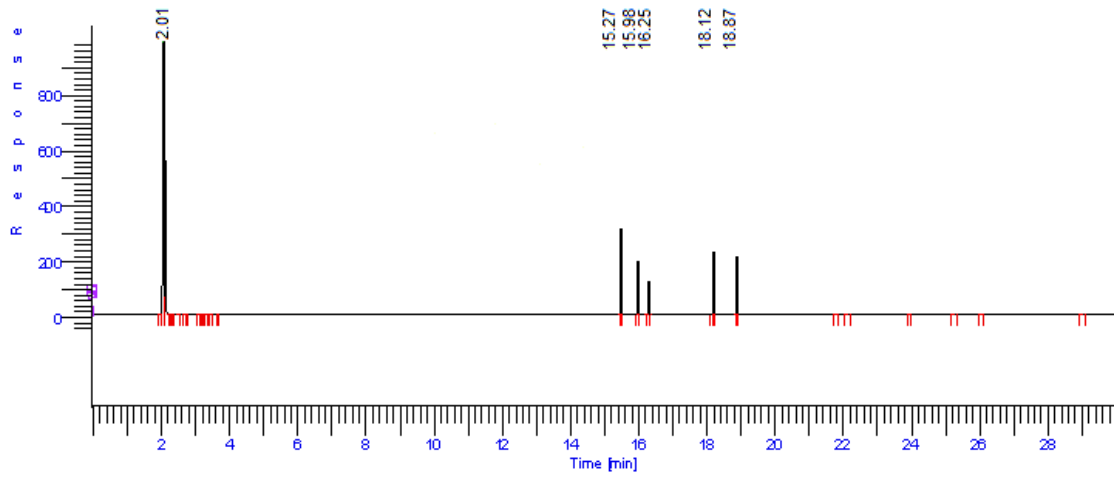


Figura AVI.7. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 12

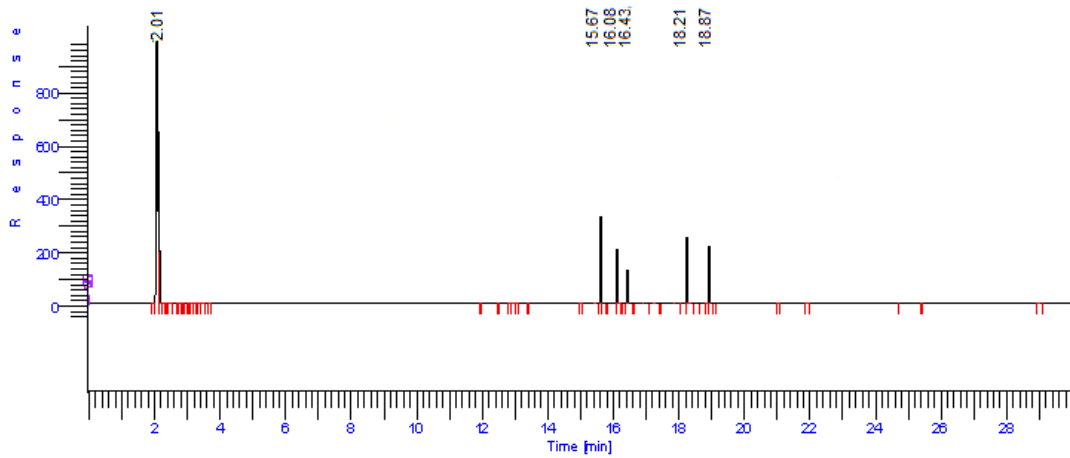


Figura AVI.8. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 12 paralelo

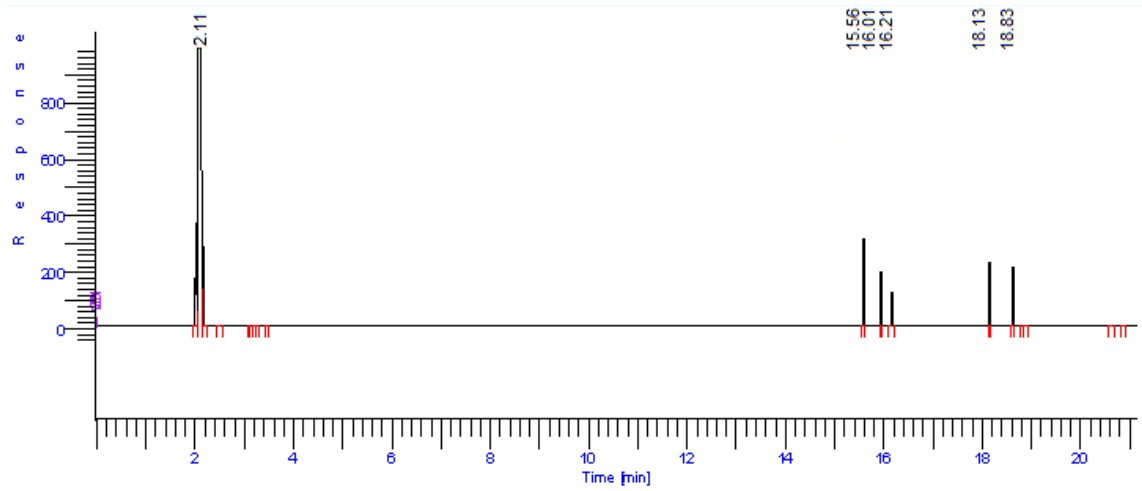


Figura AVI.9. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 15

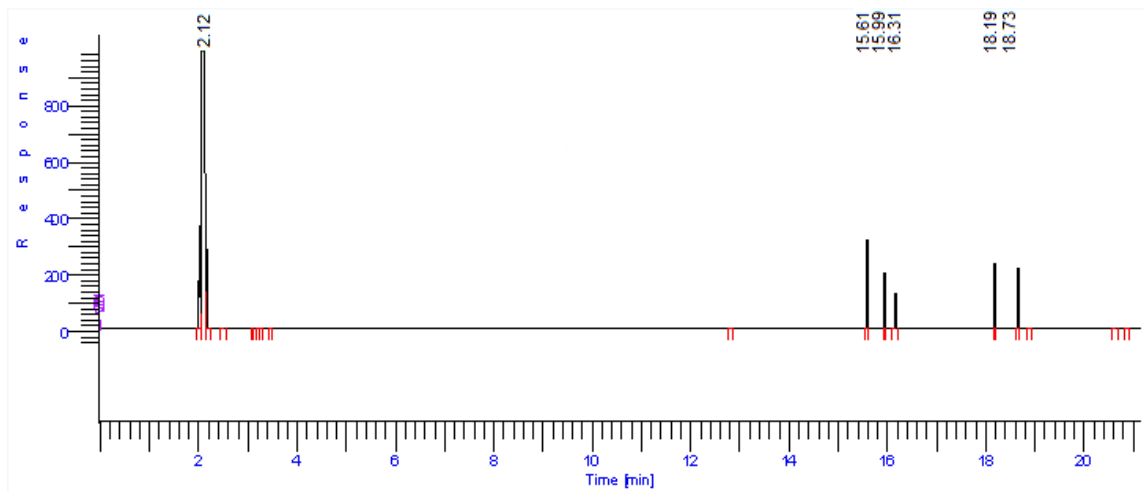


Figura AVI.10. Cromatograma reactor aerobio 1, semana 15 paralelo

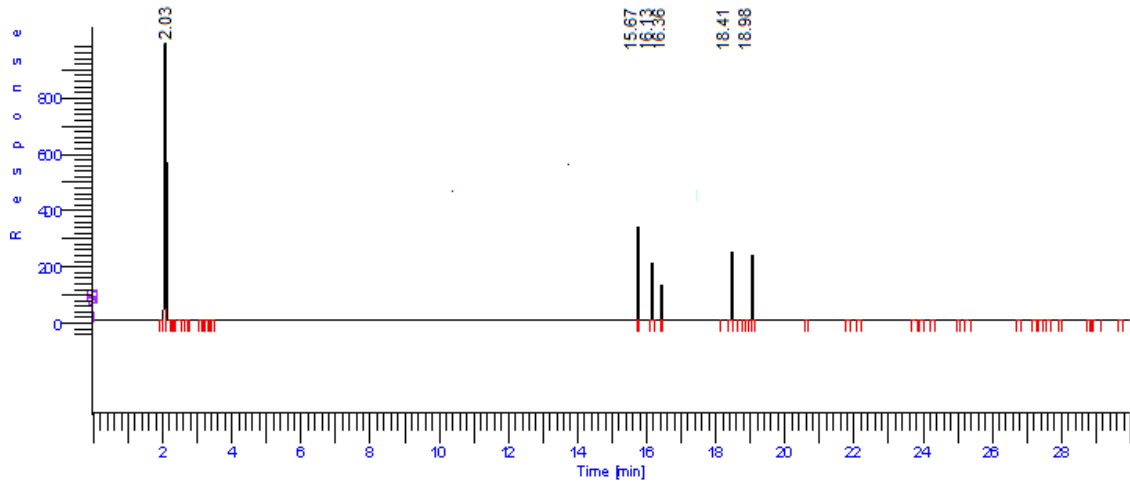


Figura AVI.11. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 3

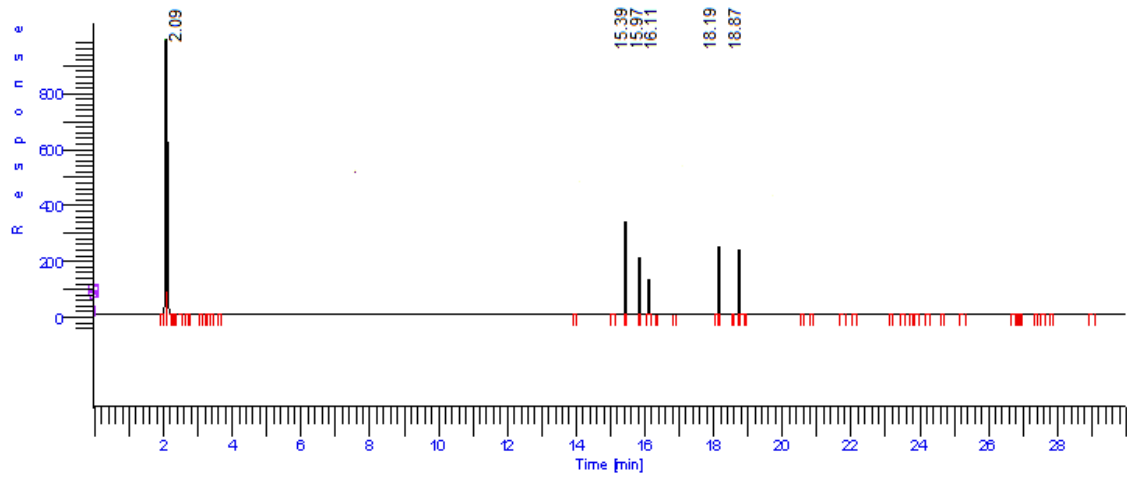


Figura AVI.12. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 3 paralelo

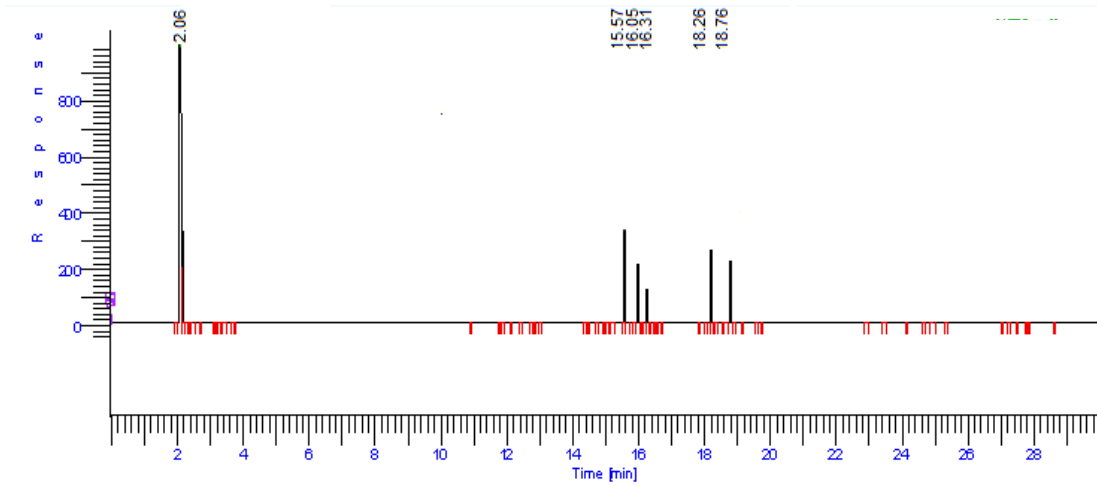


Figura AVI.13. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 6

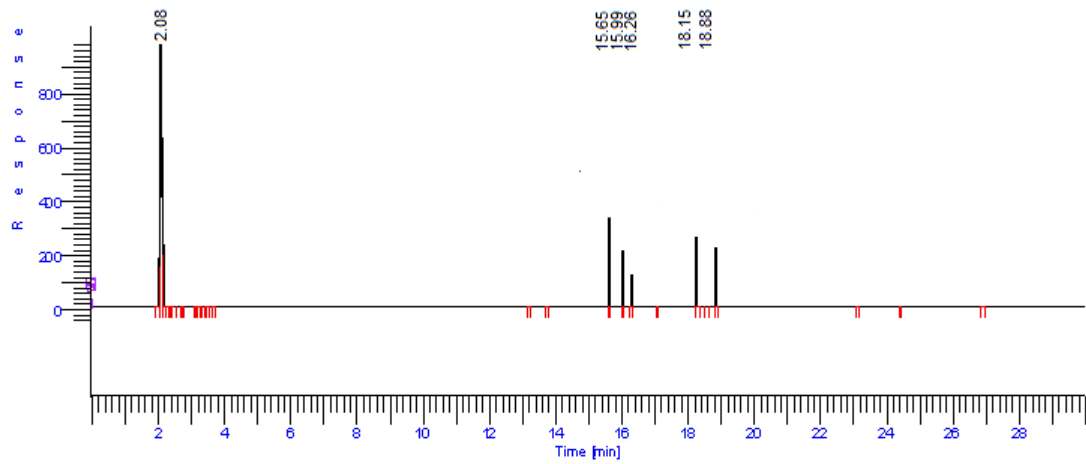


Figura AVI.14. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 6 paralelo

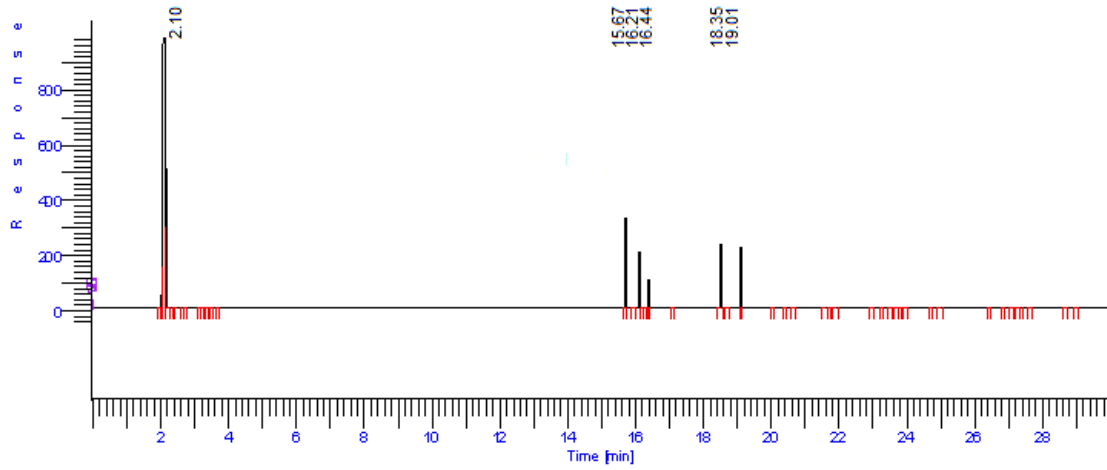


Figura AVI.15. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 9

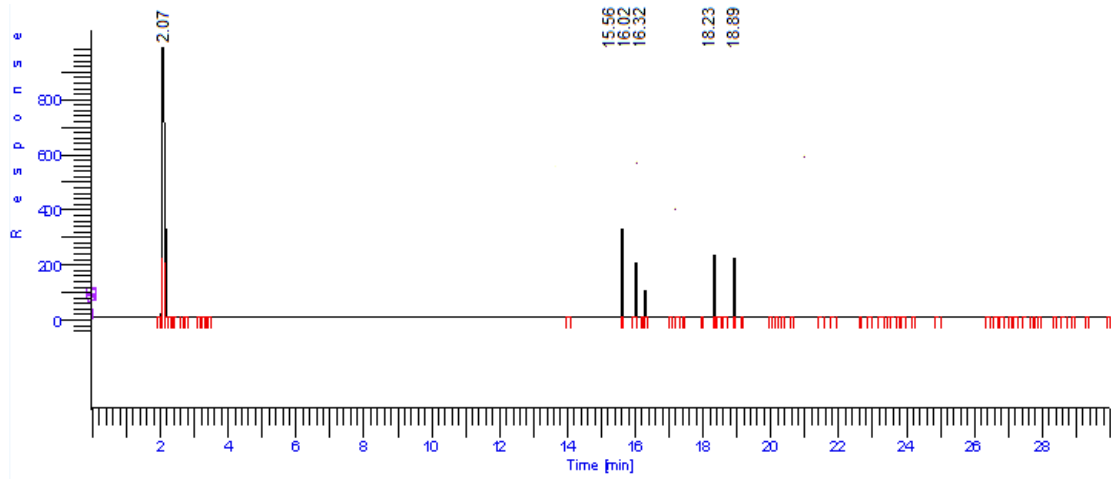


Figura AVI.16. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 9 paralelo

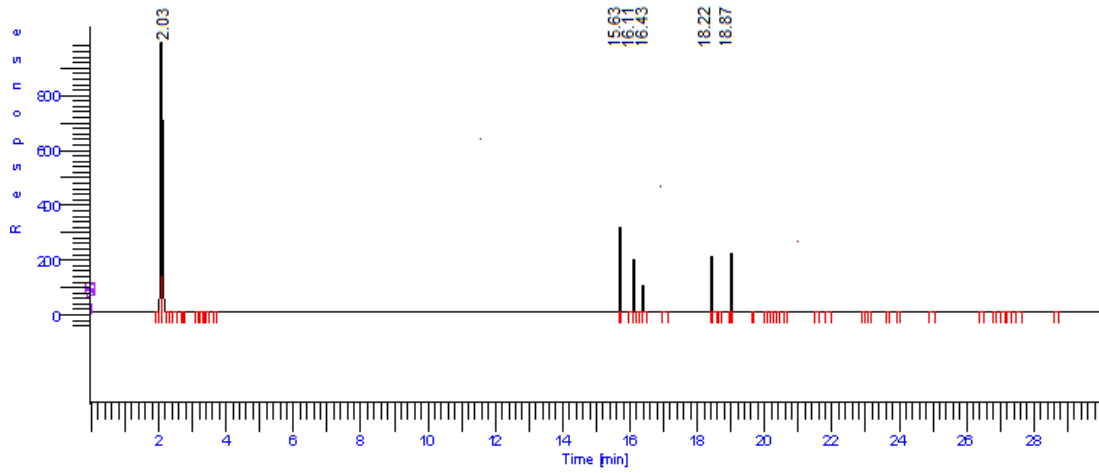


Figura AVI.17. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 12

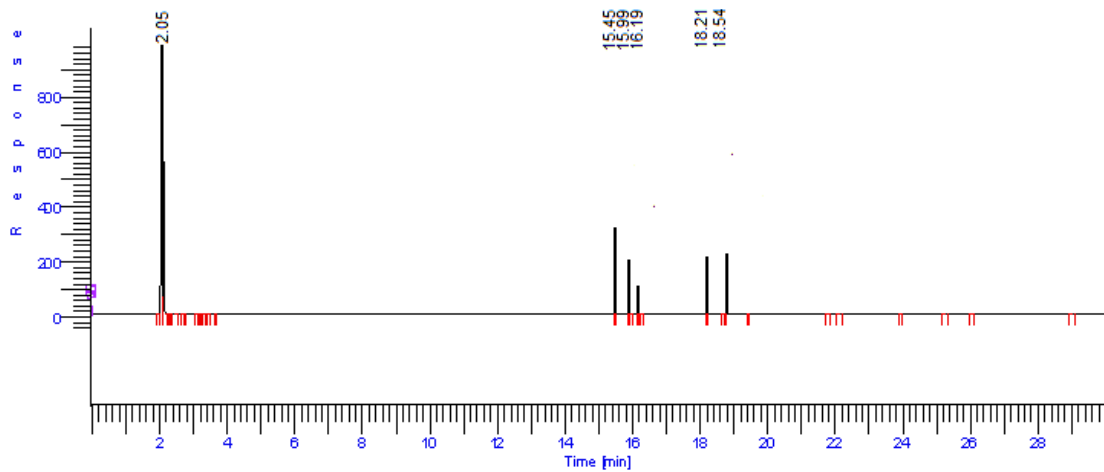


Figura AVI.18. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 12 paralelo

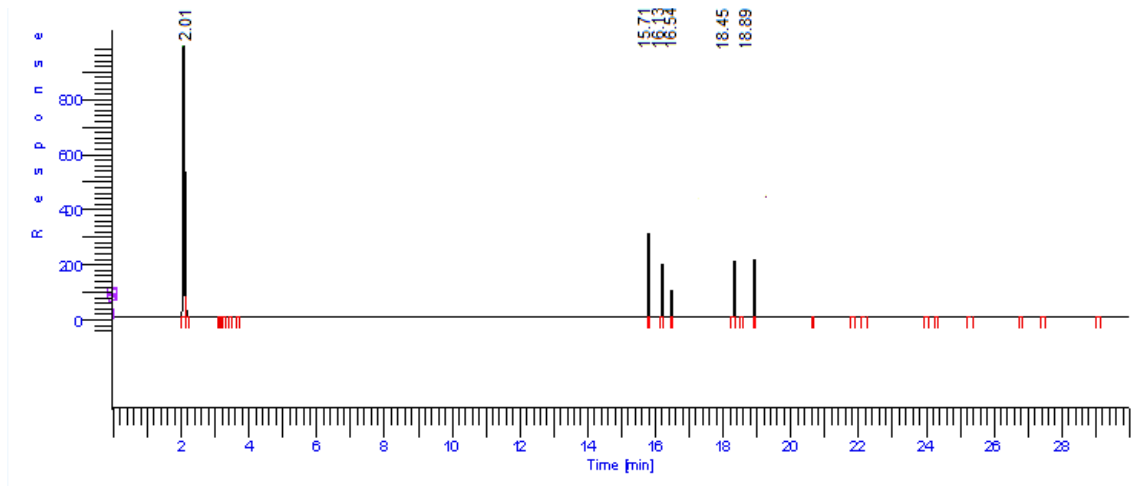


Figura AVI.19. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 15

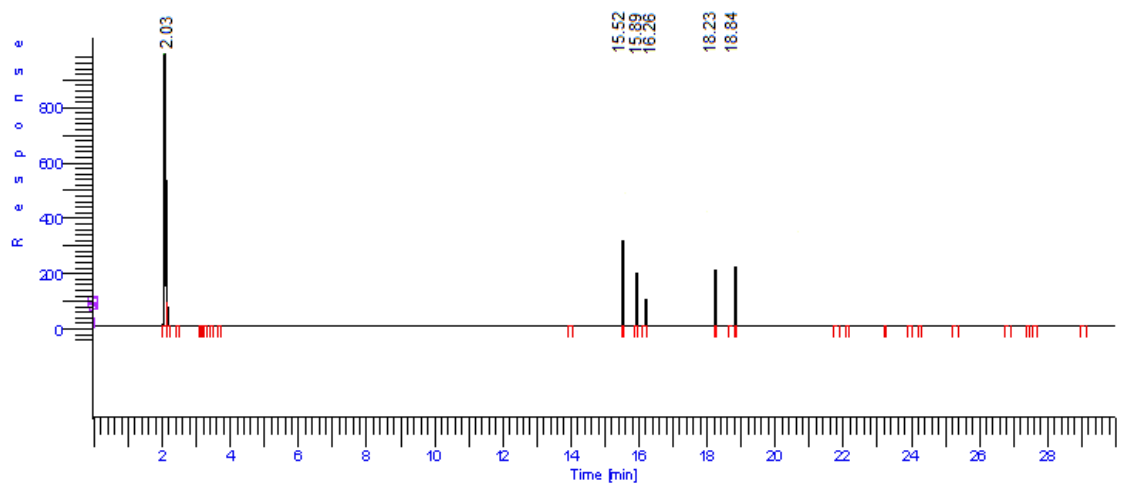


Figura AVI.20. Cromatograma reactor aerobio 2, semana 15 paralelo

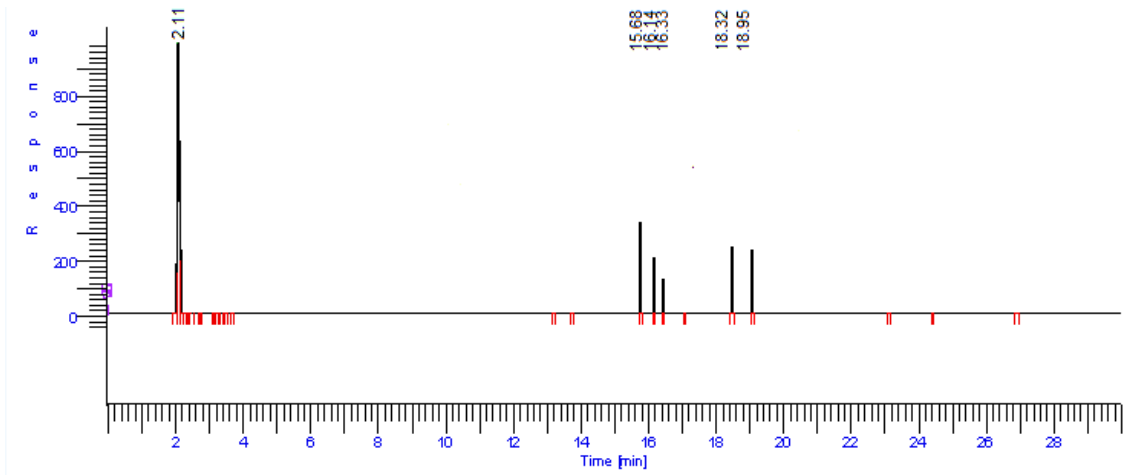


Figura AVI.21. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 3

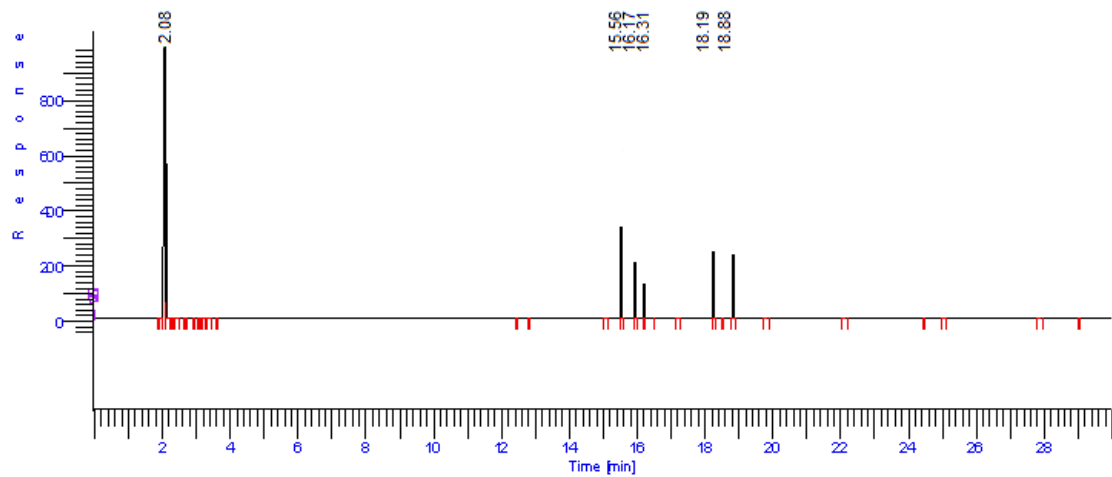


Figura AVI.22. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 3 paralelo

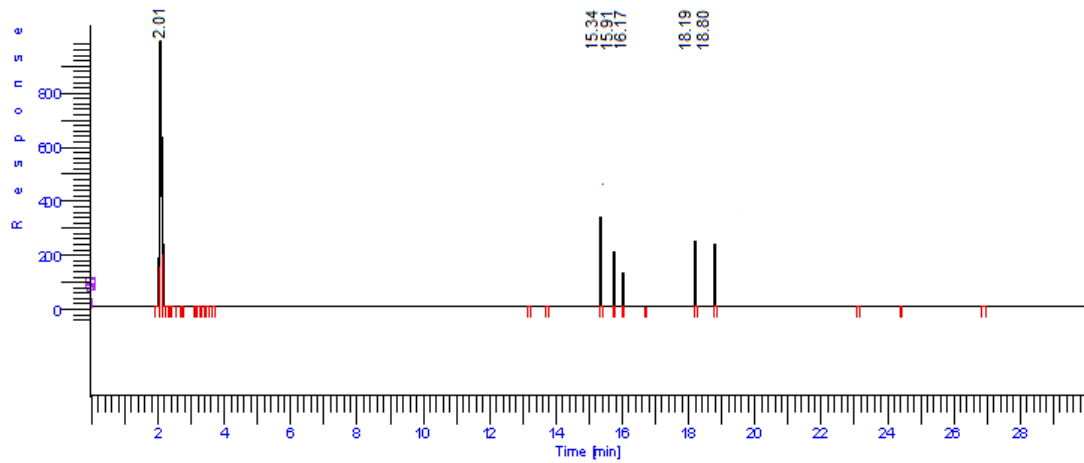


Figura AVI.23. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 6

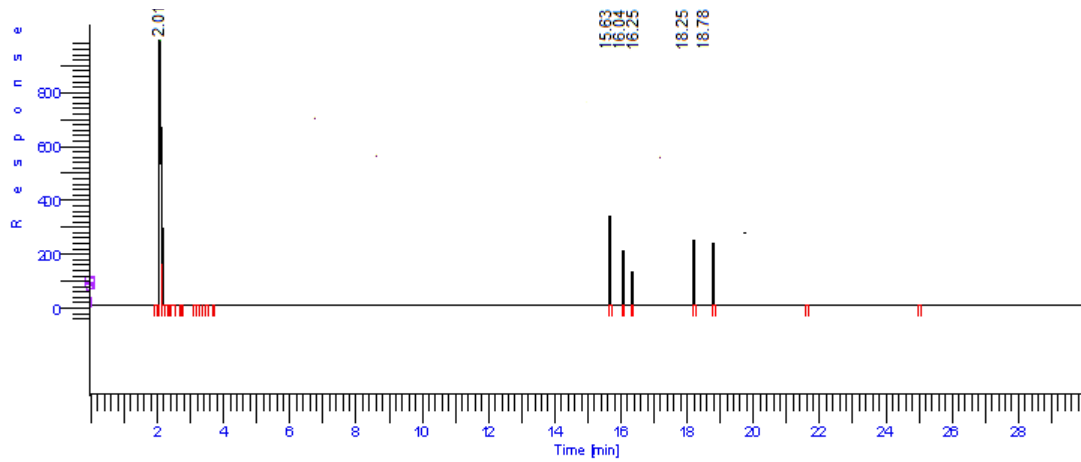


Figura AVI.24. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 6 paralelo

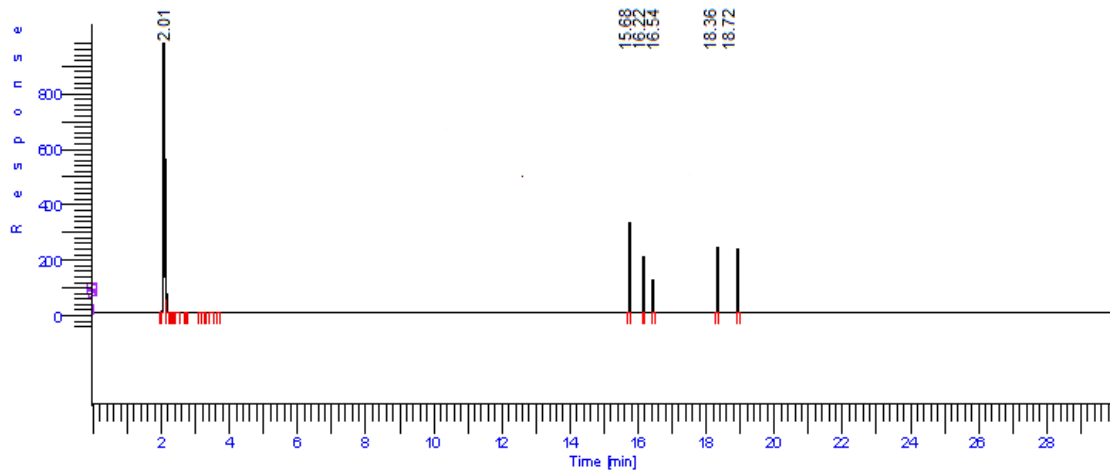


Figura AVI.25. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 9

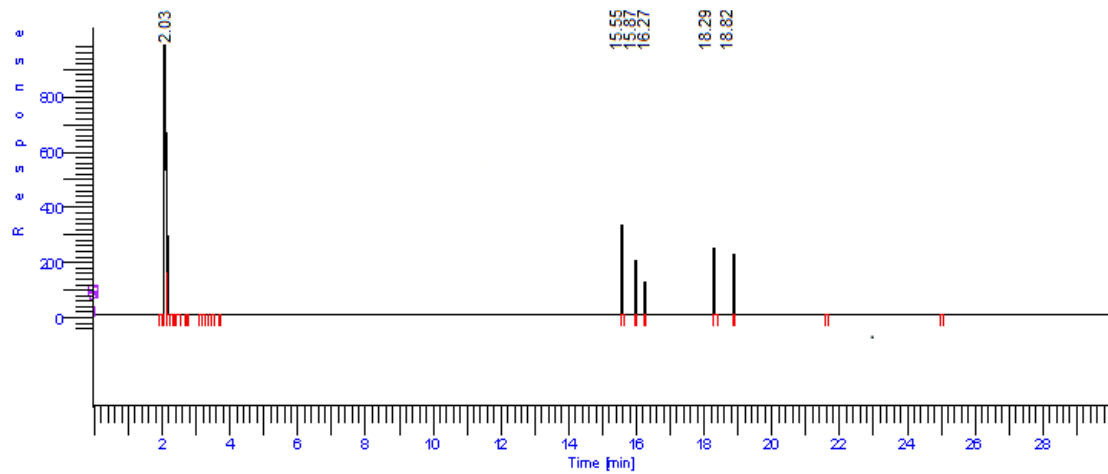


Figura AVI.26. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 9 paralelo

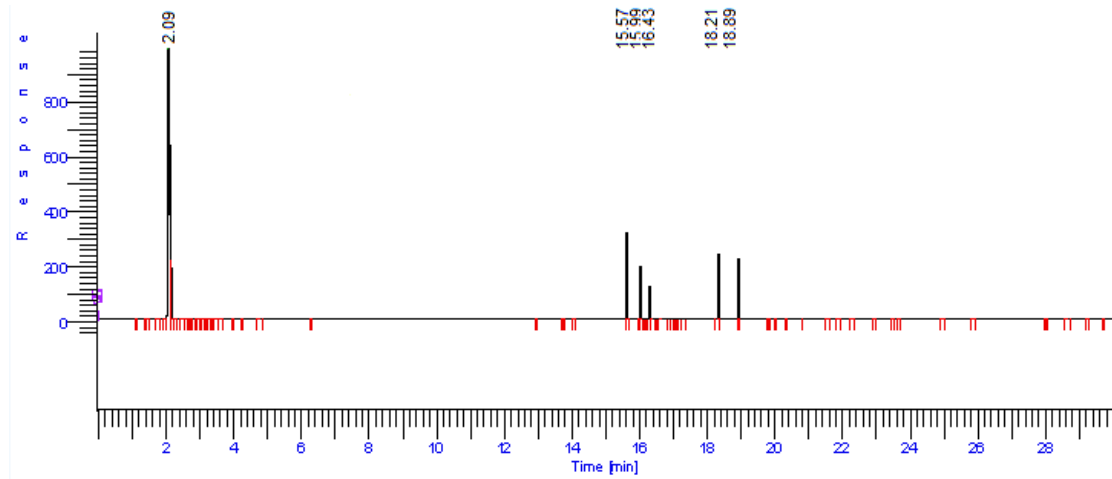


Figura AVI.27. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 12

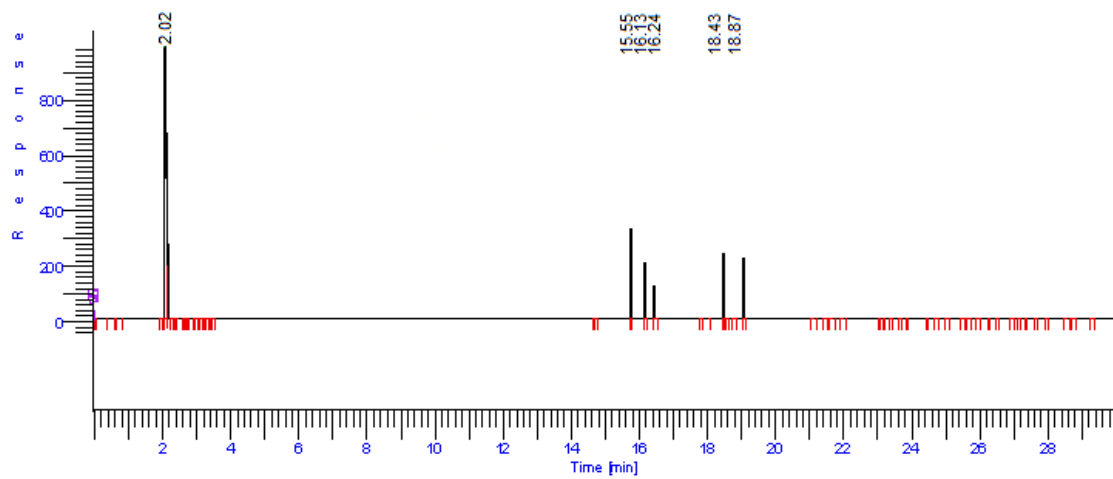


Figura AVI.28. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 12 paralelo

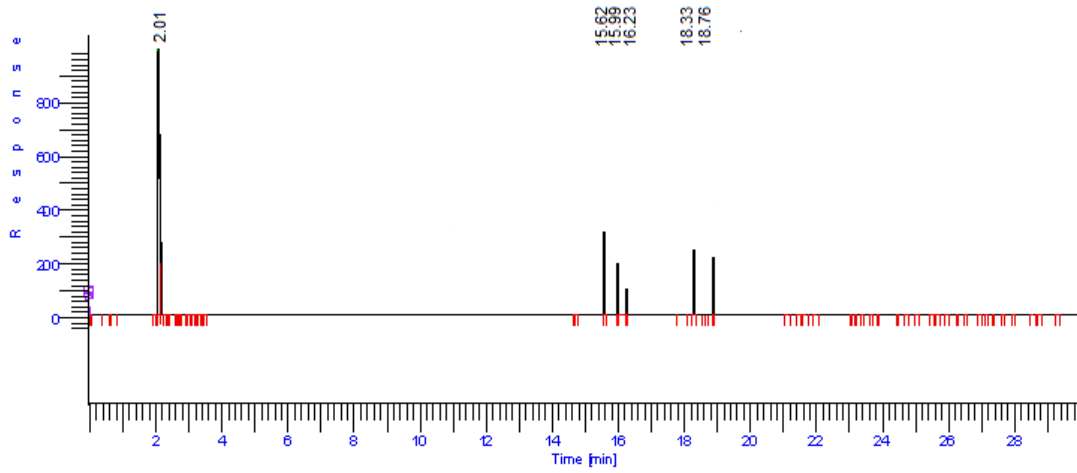


Figura AVI.29. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 15

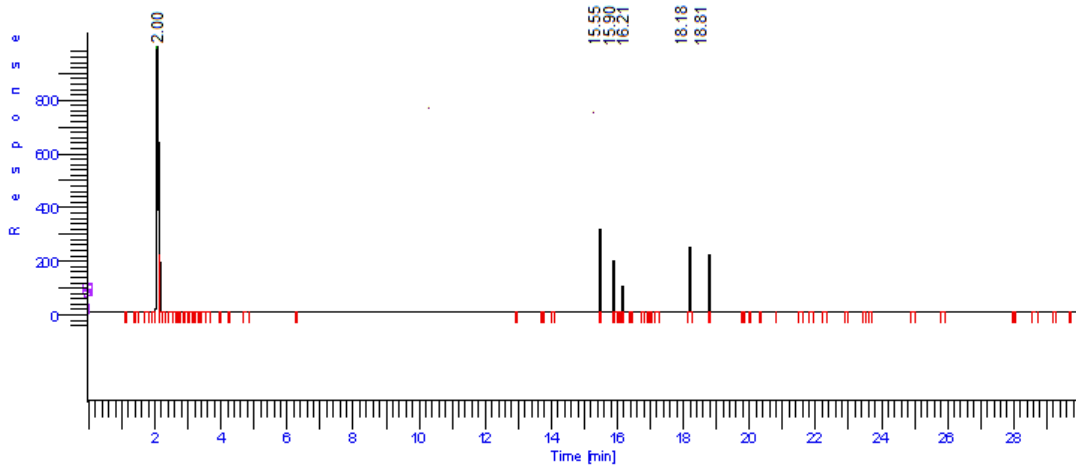


Figura AVI.30. Cromatograma reactor aerobio 3, semana 15 paralelo

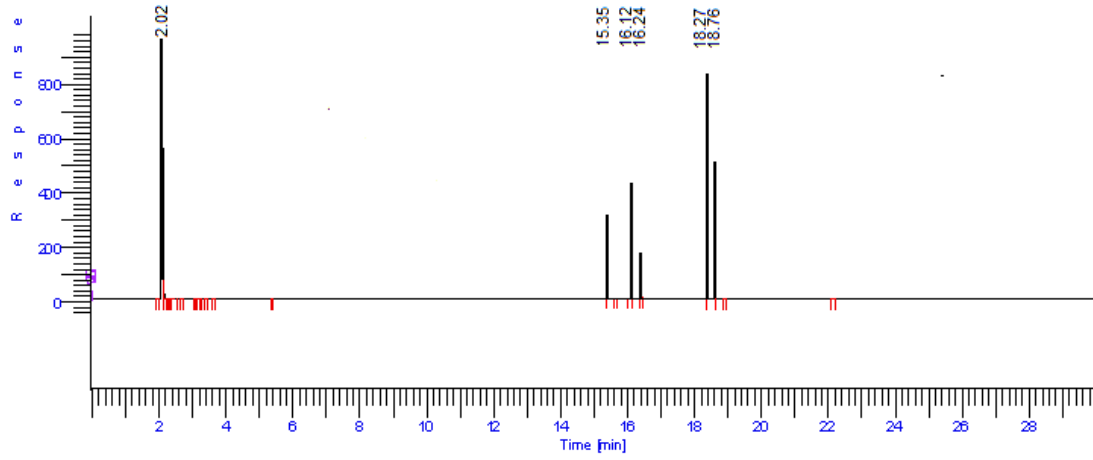


Figura AVI.31. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 3

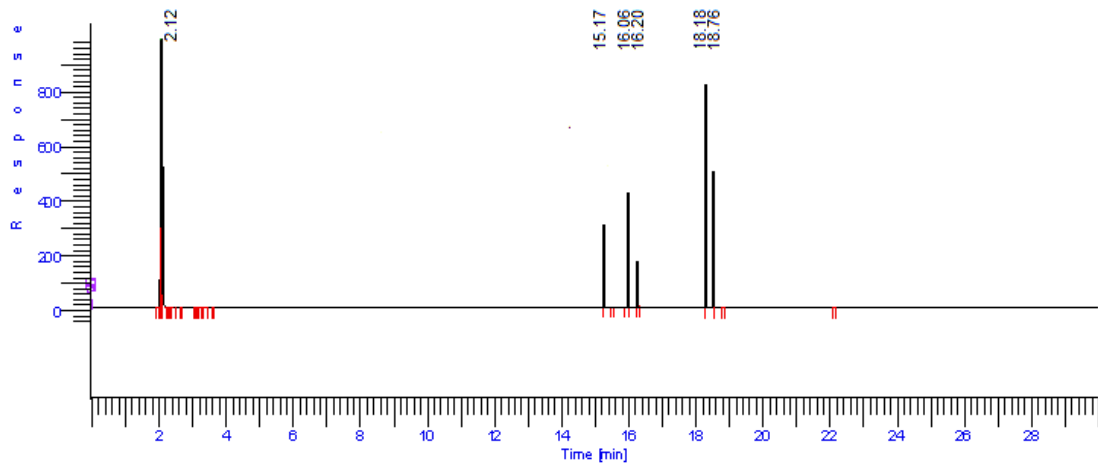


Figura AVI.32. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 3 paralelo

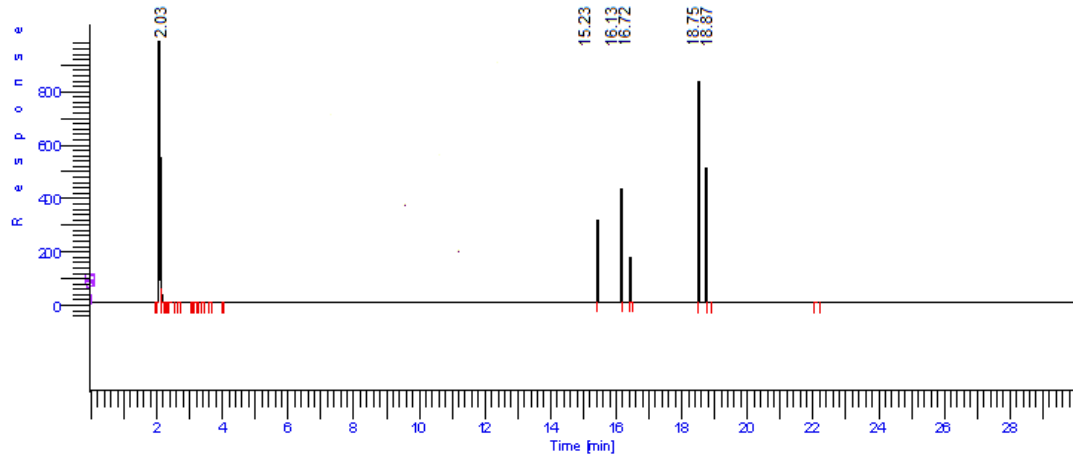


Figura AVI.33. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 6

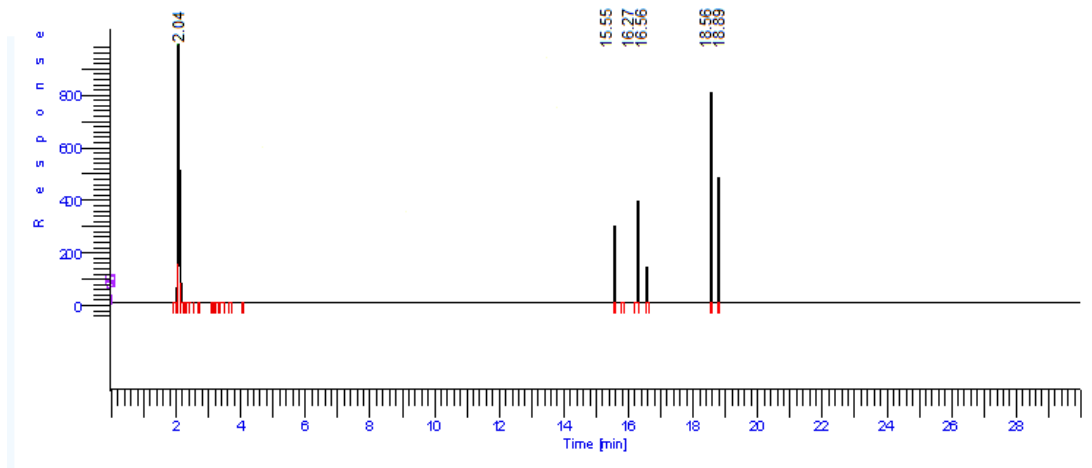


Figura AVI.34. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 6 paralelo

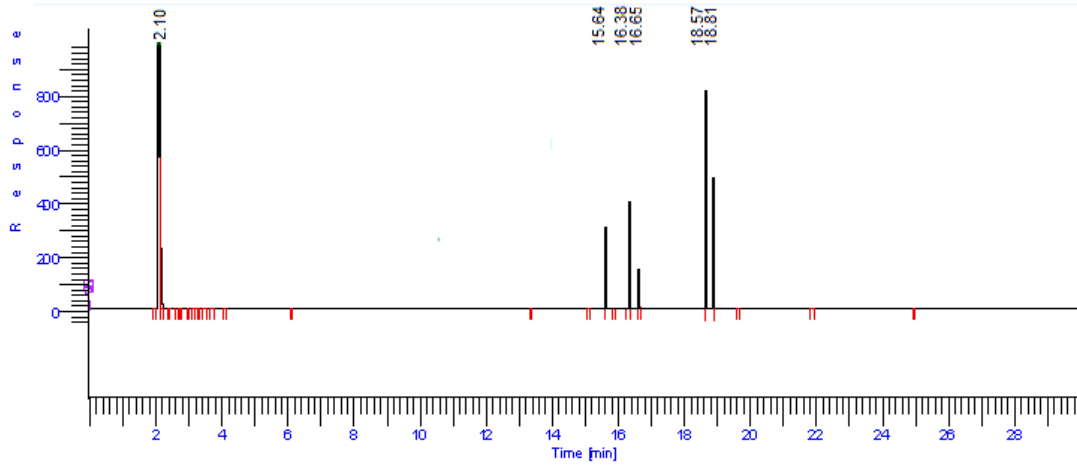


Figura AVI.35. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 9

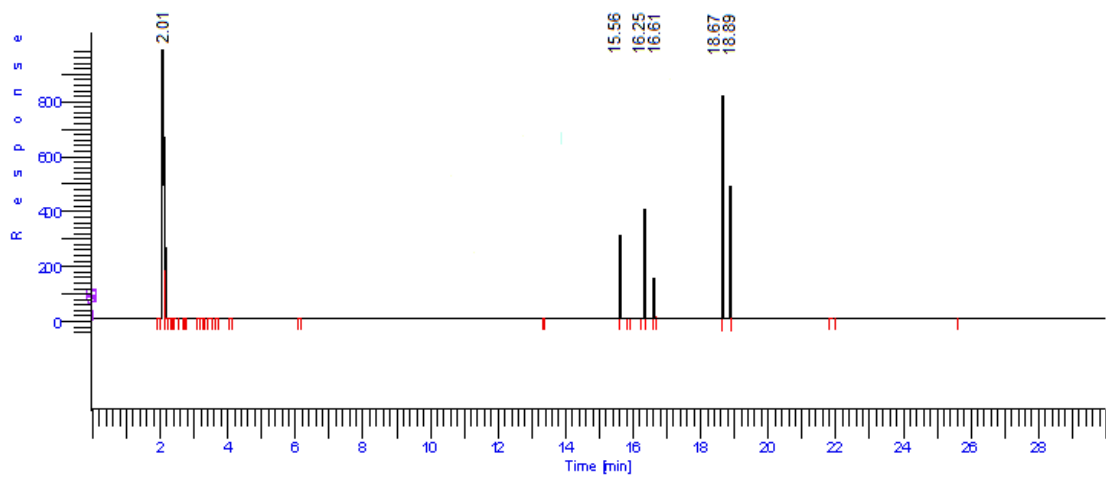


Figura AVI.36. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 9 paralelo

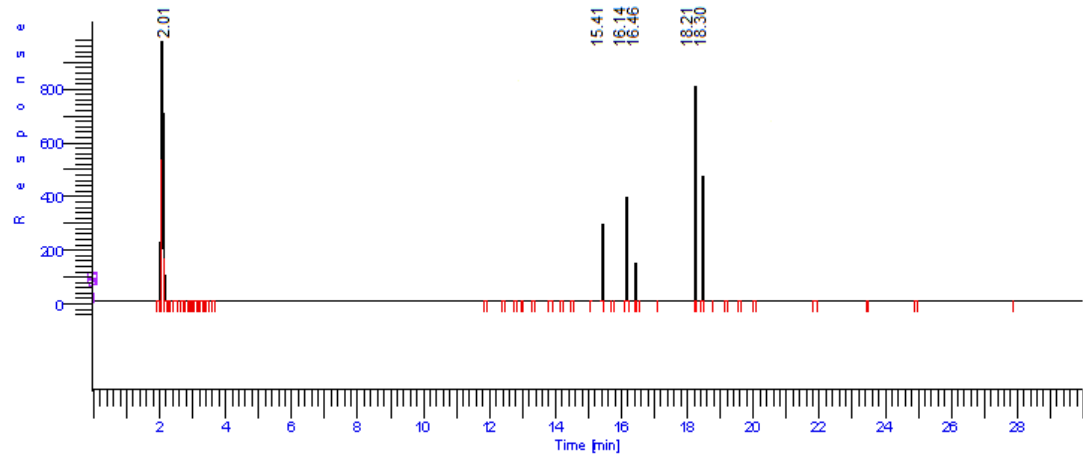


Figura AVI.37. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 12

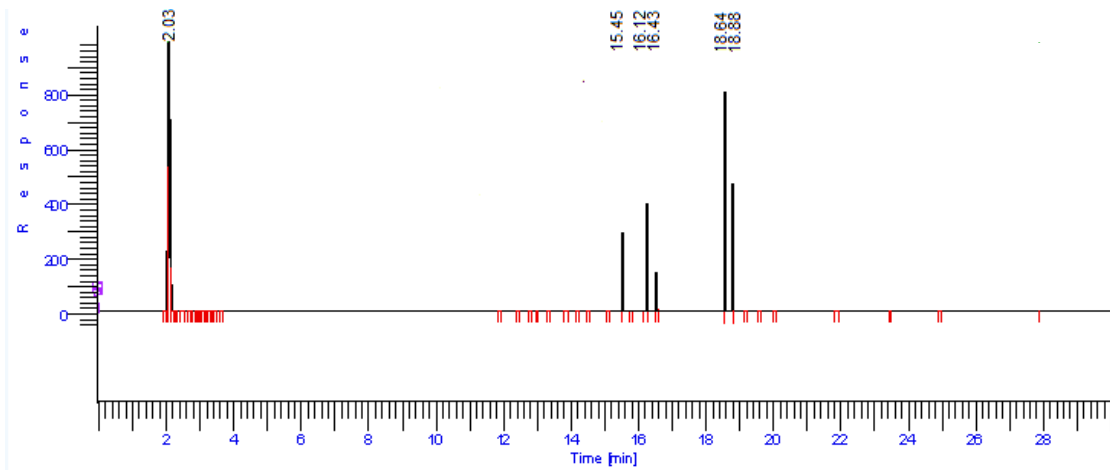


Figura AVI.38. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 12 paralelo

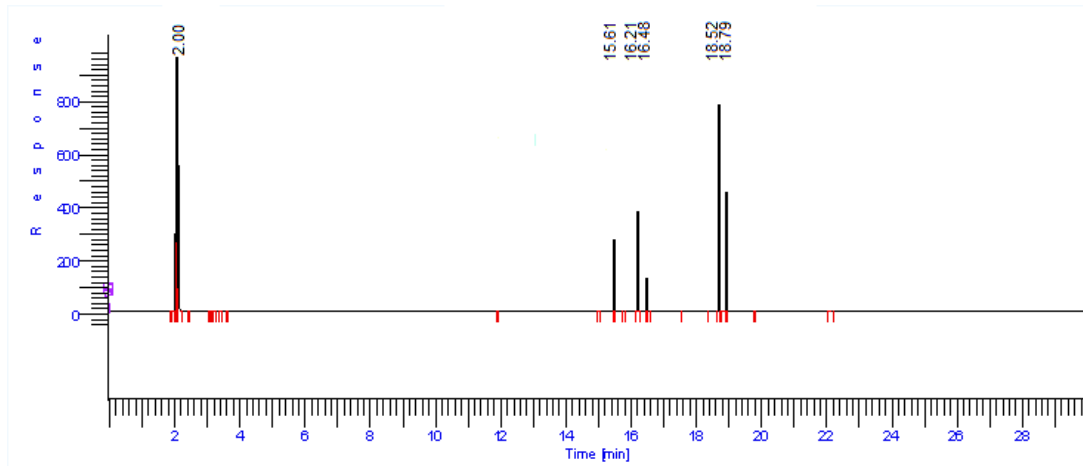


Figura AVI.39. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 15

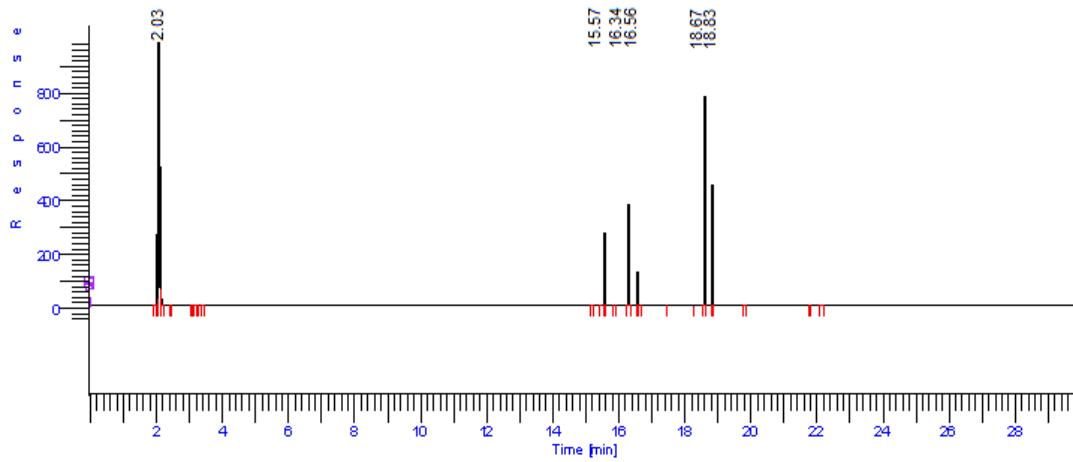


Figura AVI.40. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 15 paralelo

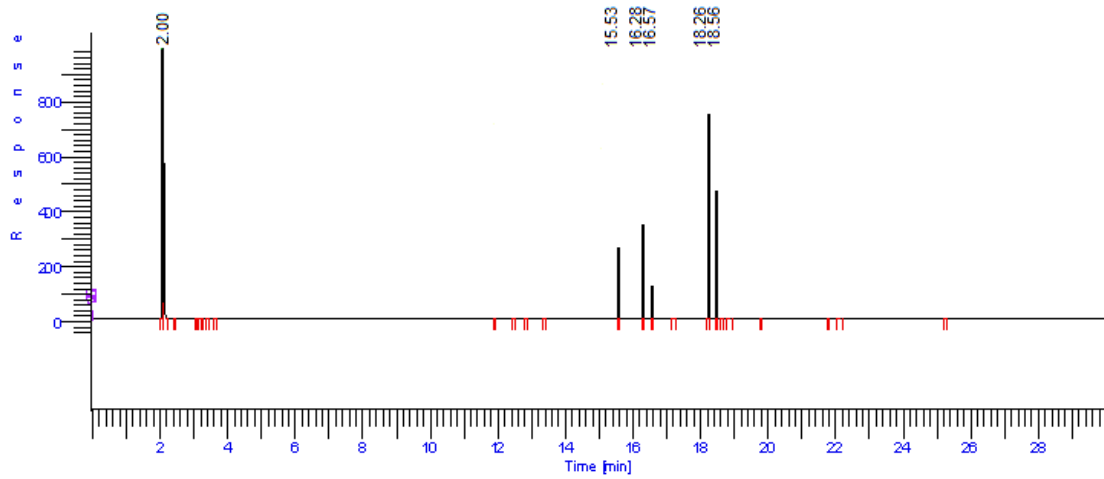


Figura AVI.41. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 20

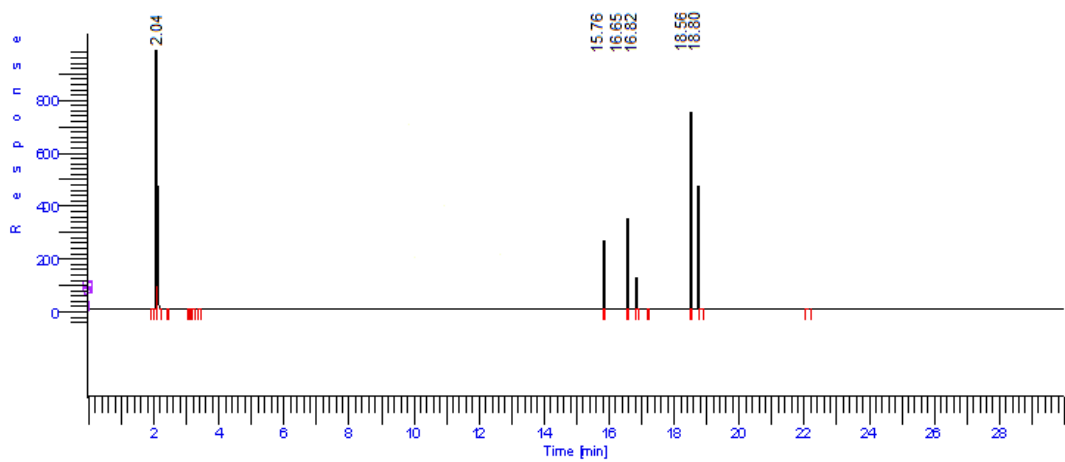


Figura AVI.42. Cromatograma reactor anaerobio 1, semana 20 paralelo

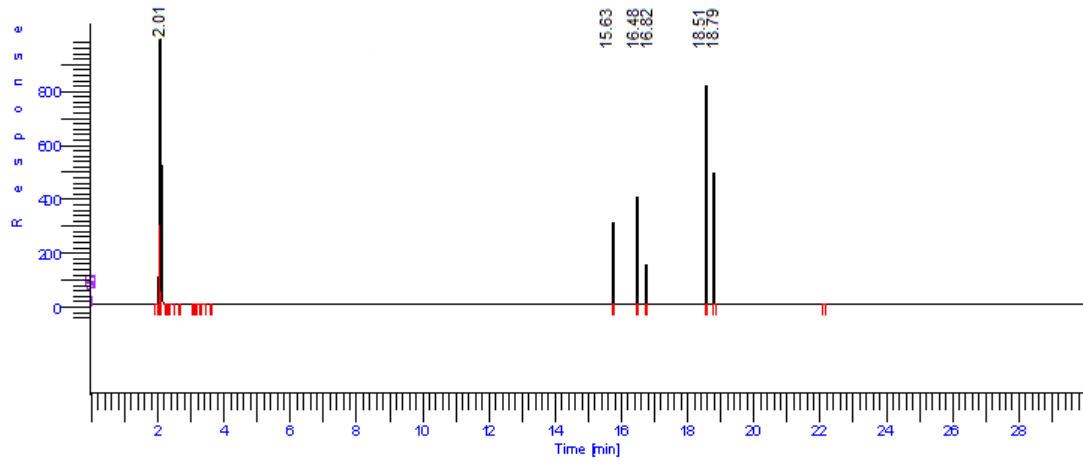


Figura AVI.43. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 3

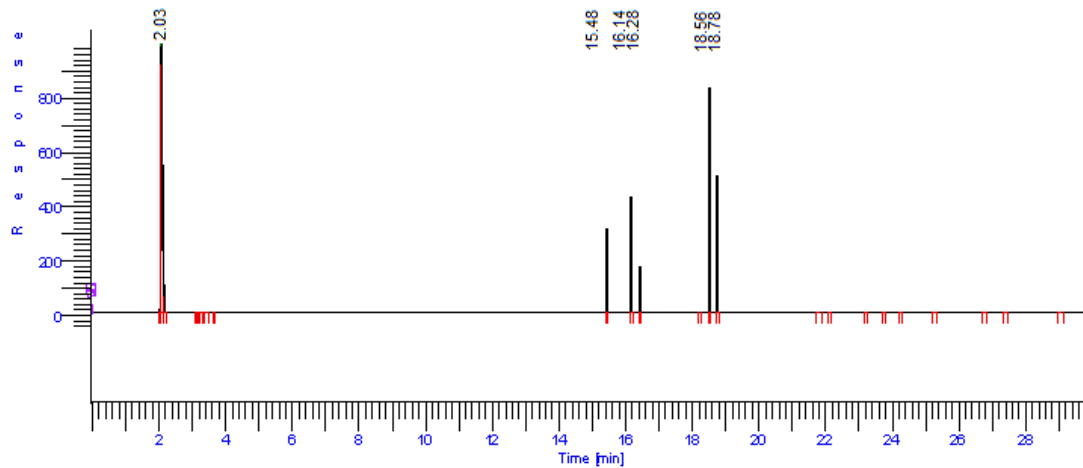


Figura AVI.44. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 3 paralelo

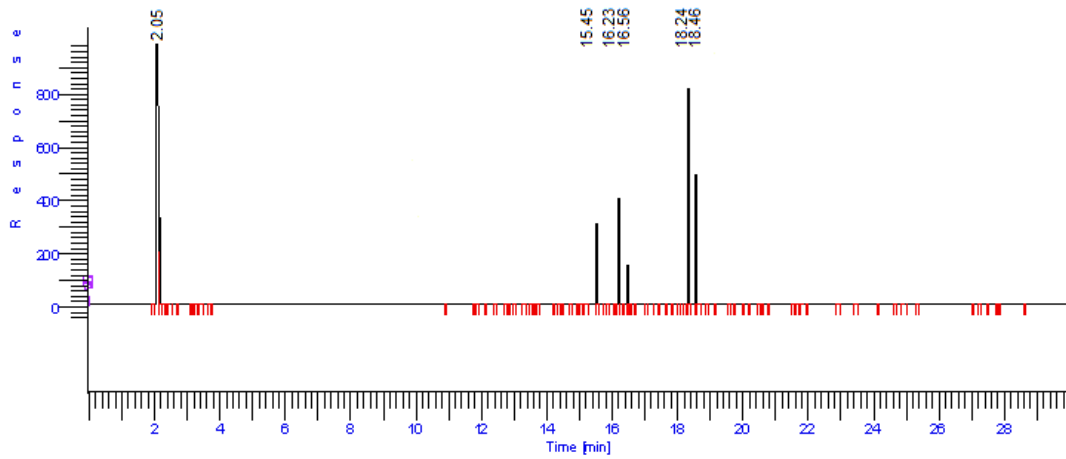


Figura AVI.45. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 6

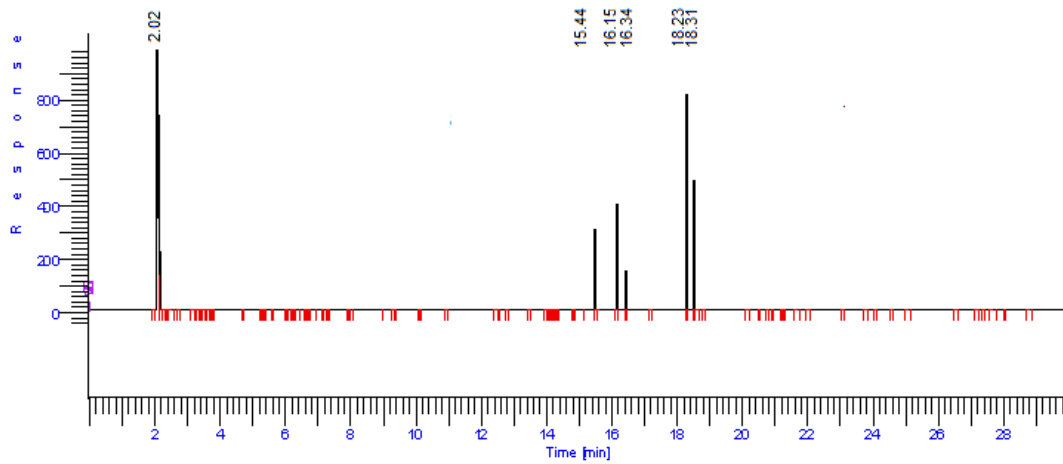


Figura AVI.46. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 6 paralelo

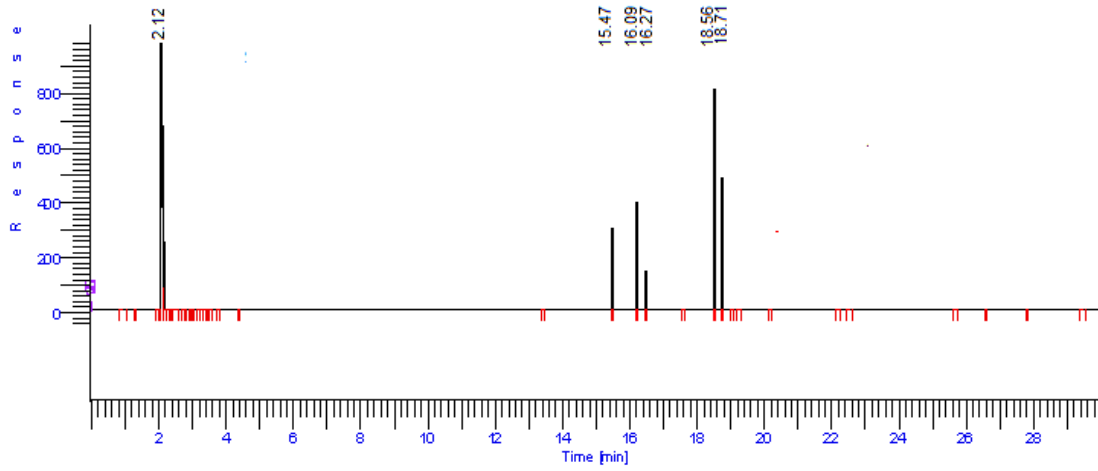


Figura AVI.47. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 9

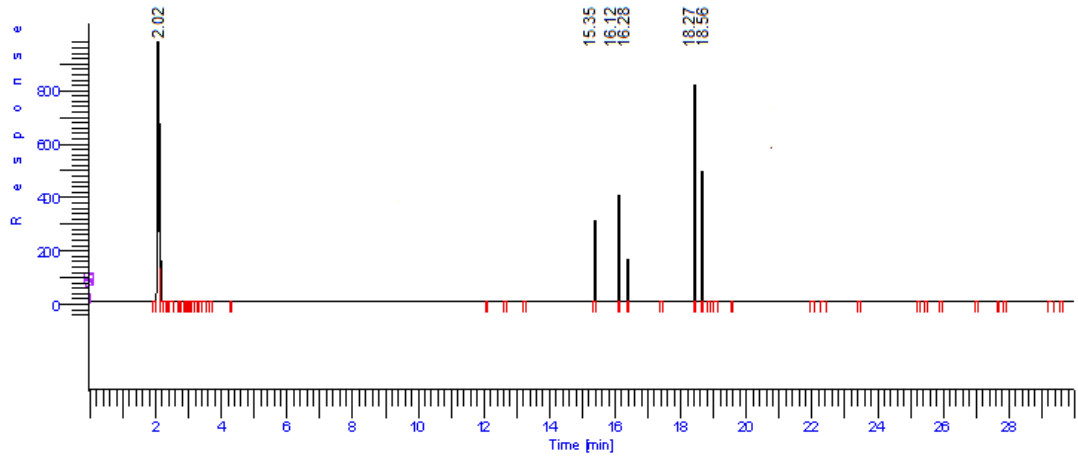


Figura AVI.48. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 9 paralelo

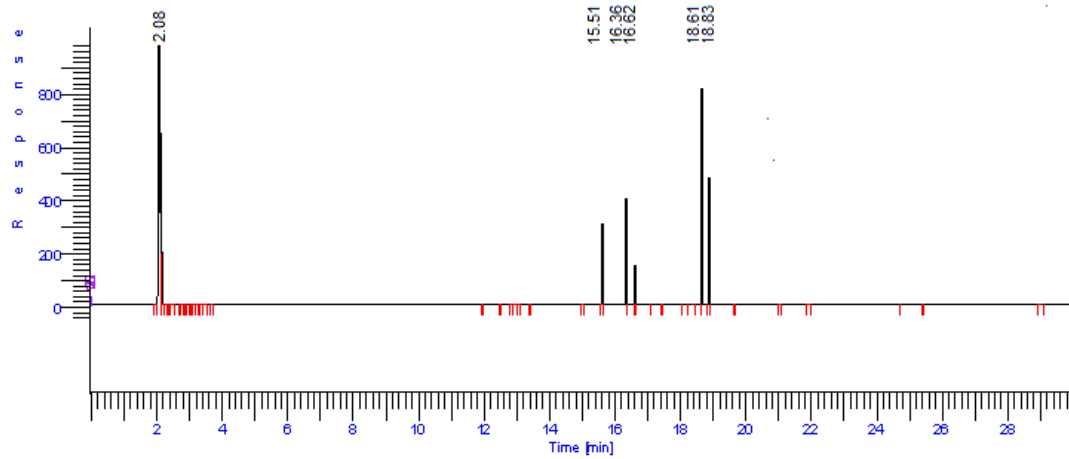


Figura AVI.49. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 12

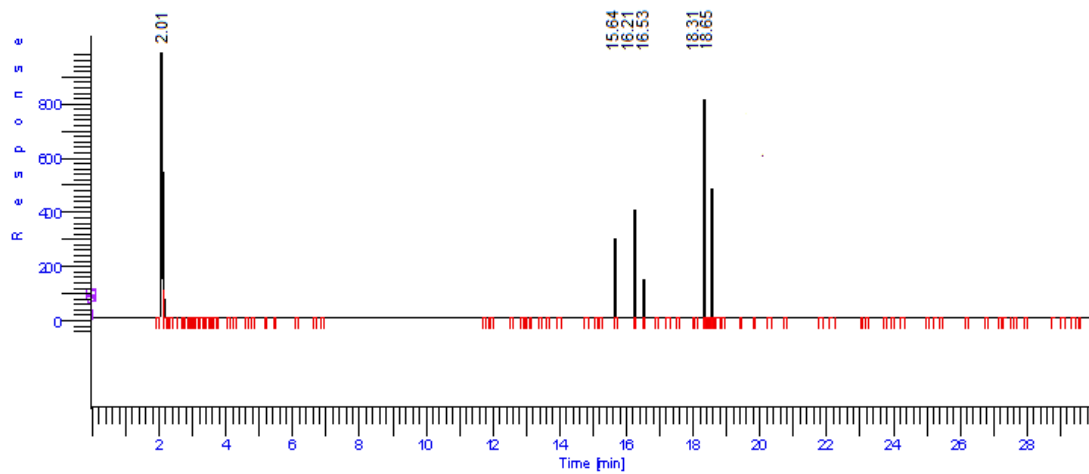


Figura AVI.50. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 12 paralelo

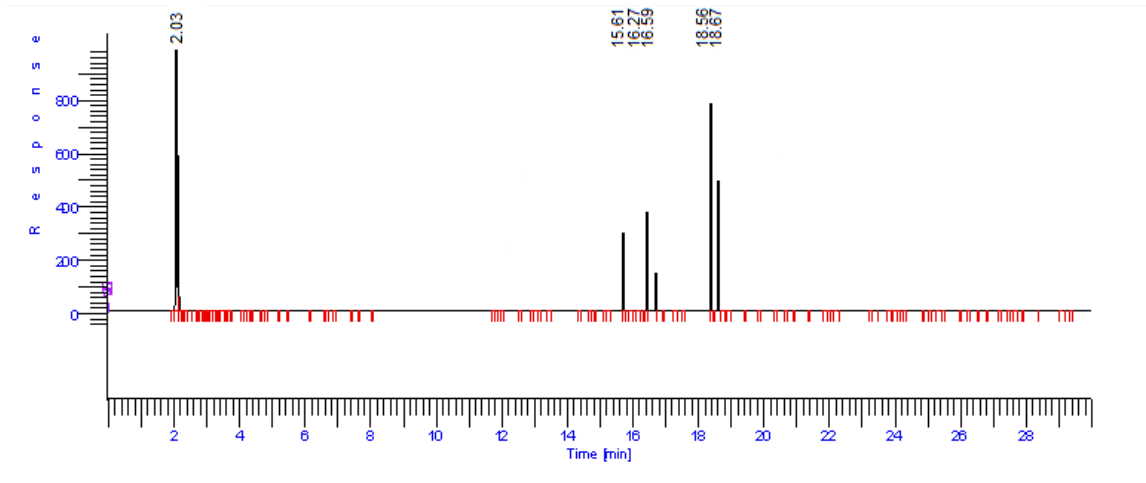


Figura AVI.51. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 15

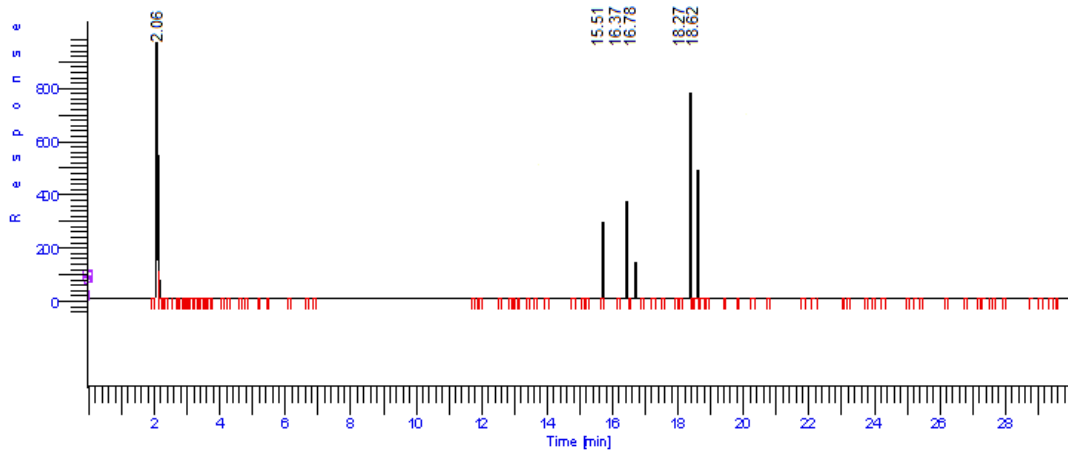


Figura AVI.52. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 15 paralelo

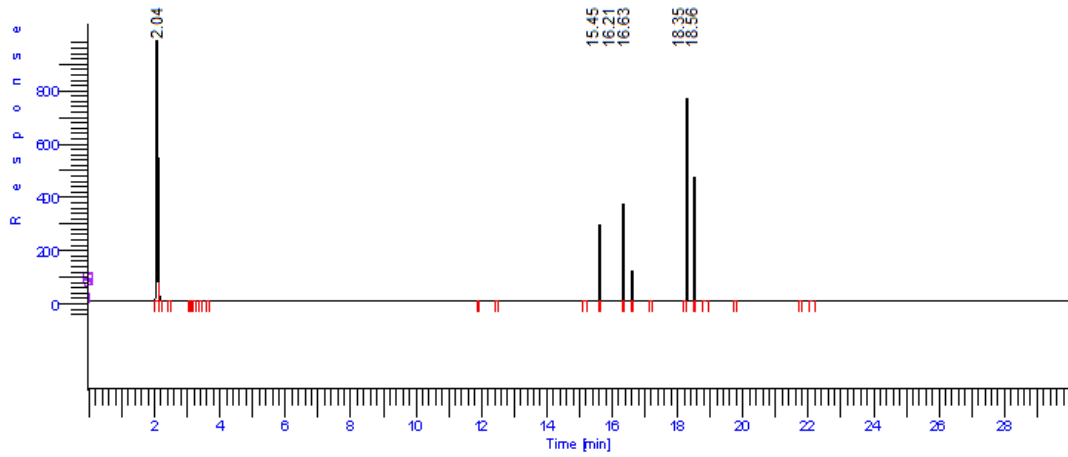


Figura AVI.53. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 20

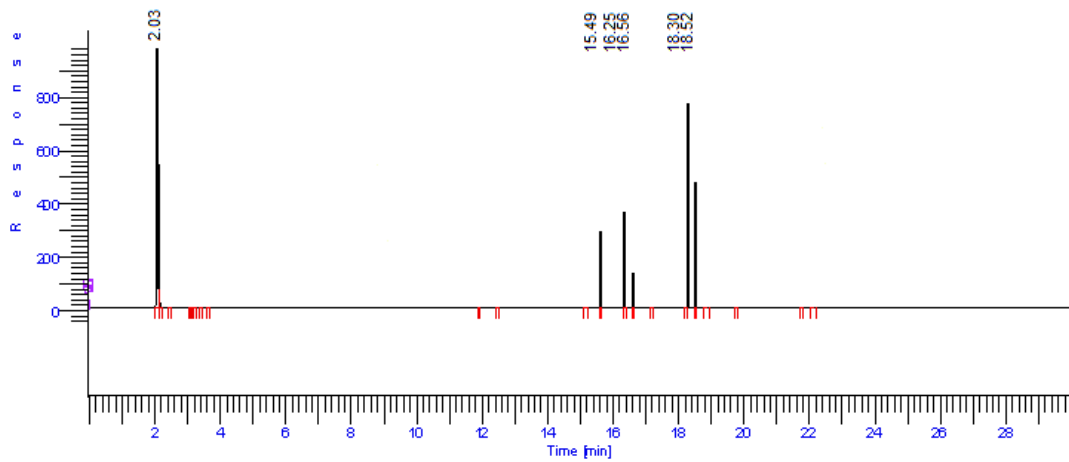


Figura AVI.54. Cromatograma reactor anaerobio 2, semana 20 paralelo

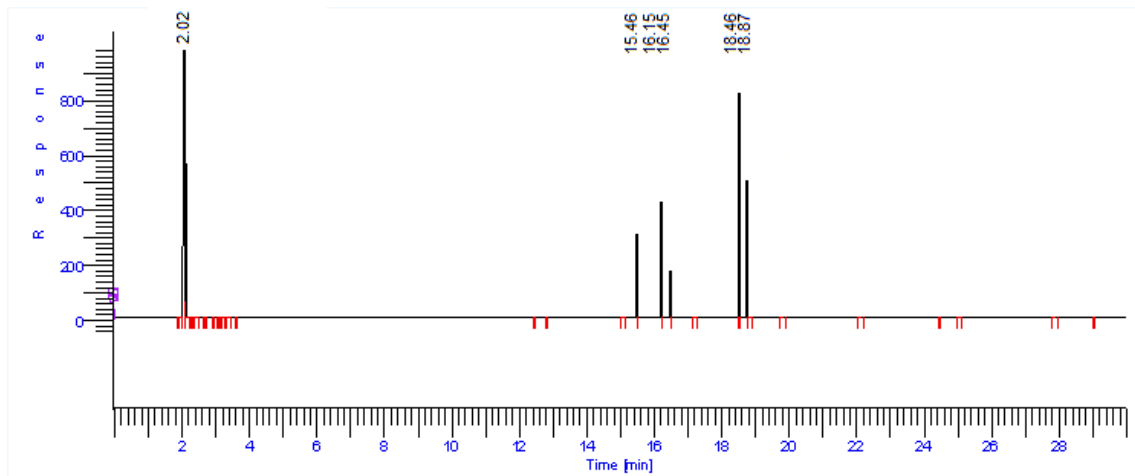


Figura AVI.55. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 3

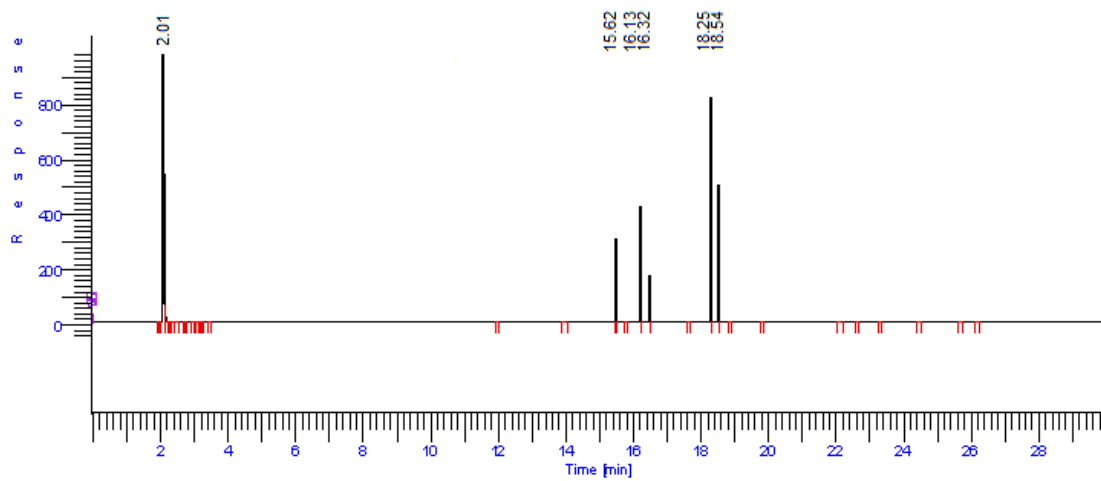


Figura AVI.56. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 3 paralelo

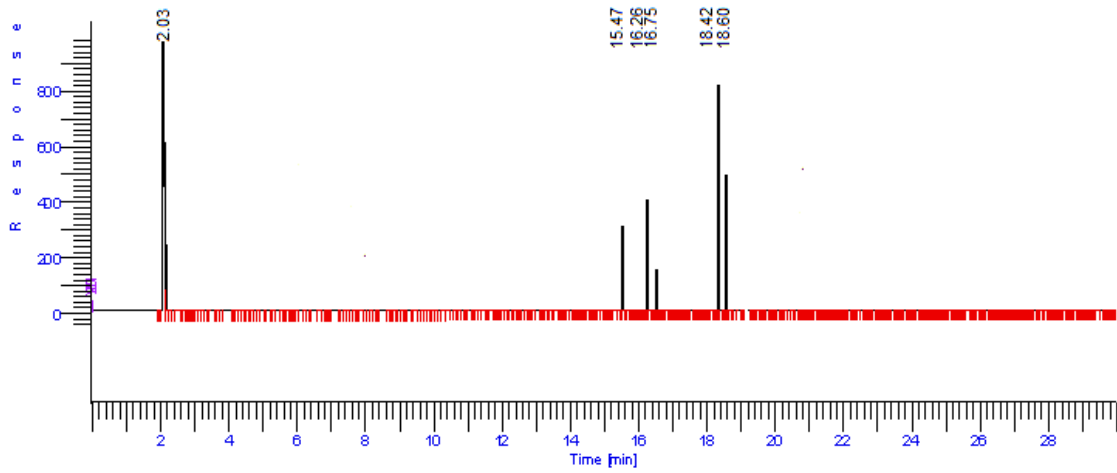


Figura AVI.57. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 6

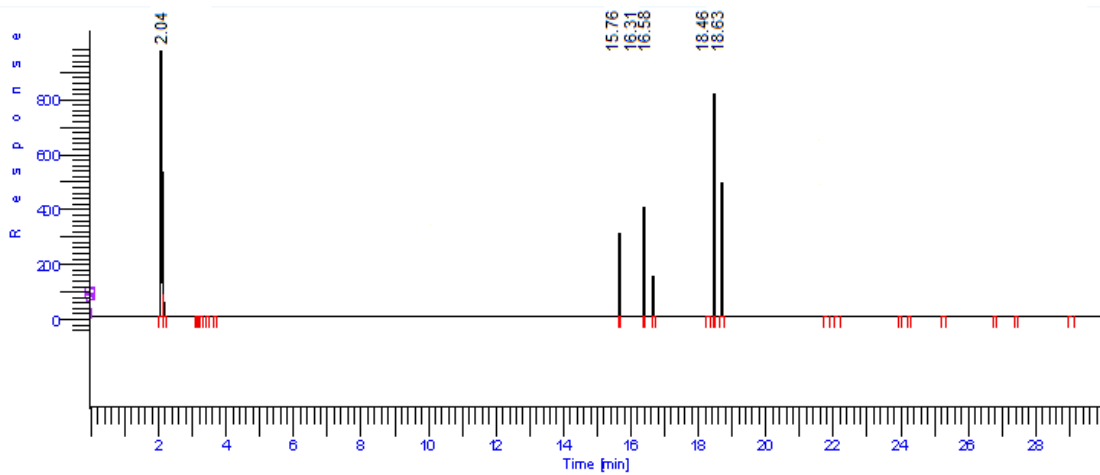


Figura AVI.58. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 6 paralelo

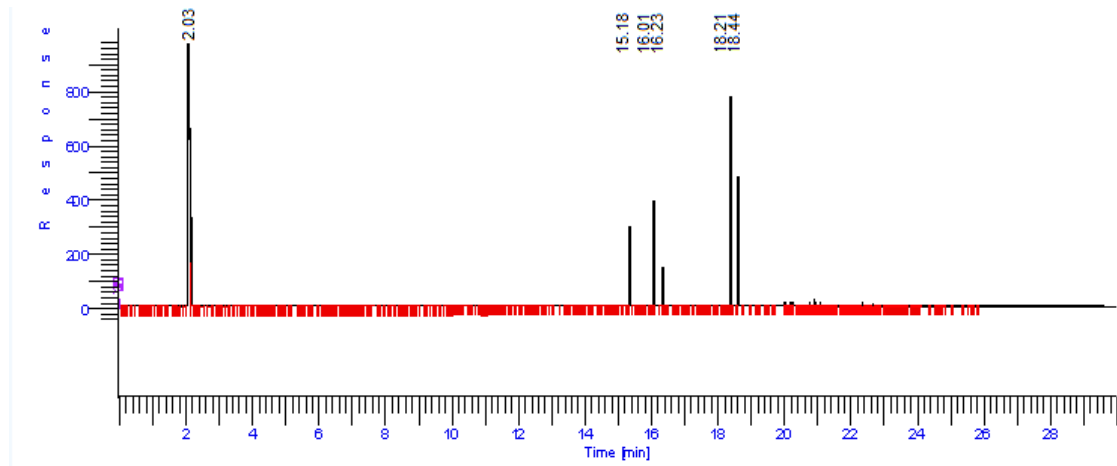


Figura AVI.59. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 9

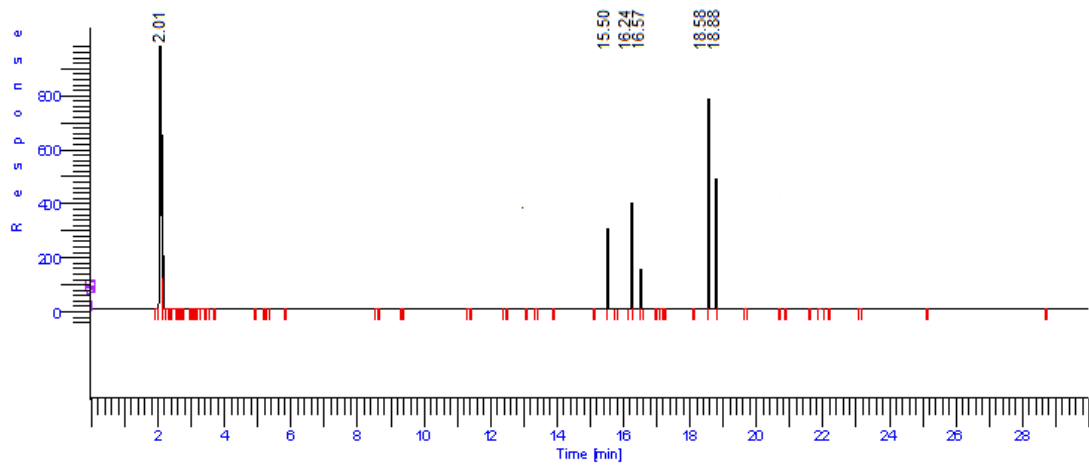


Figura AVI.60. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 9 paralelo

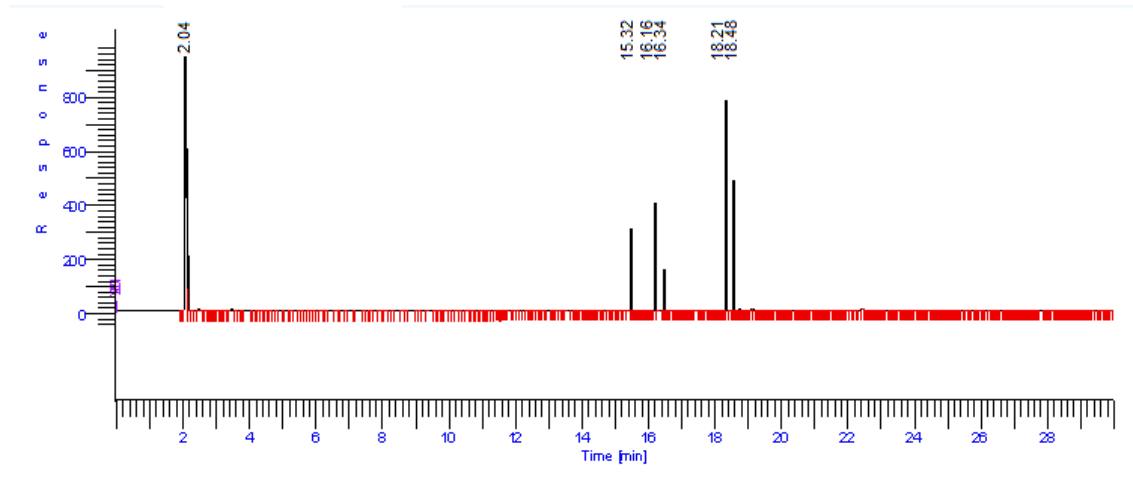


Figura AVI.61. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 12

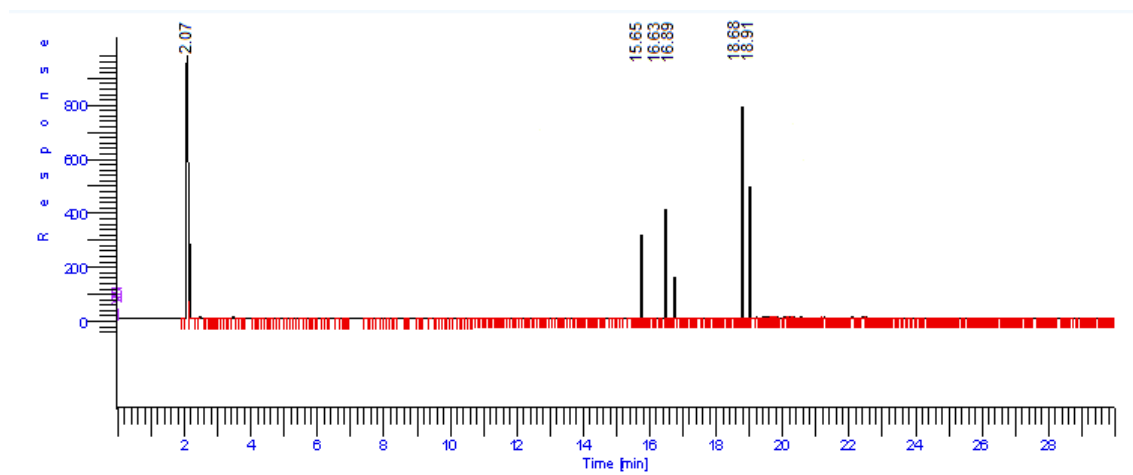


Figura AVI.62. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 12 paralelo

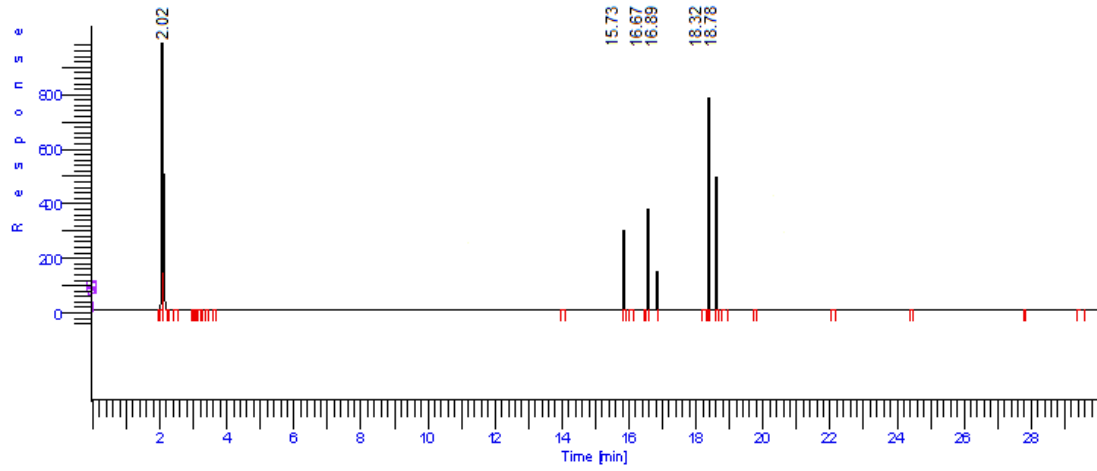


Figura AVI.63. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 15

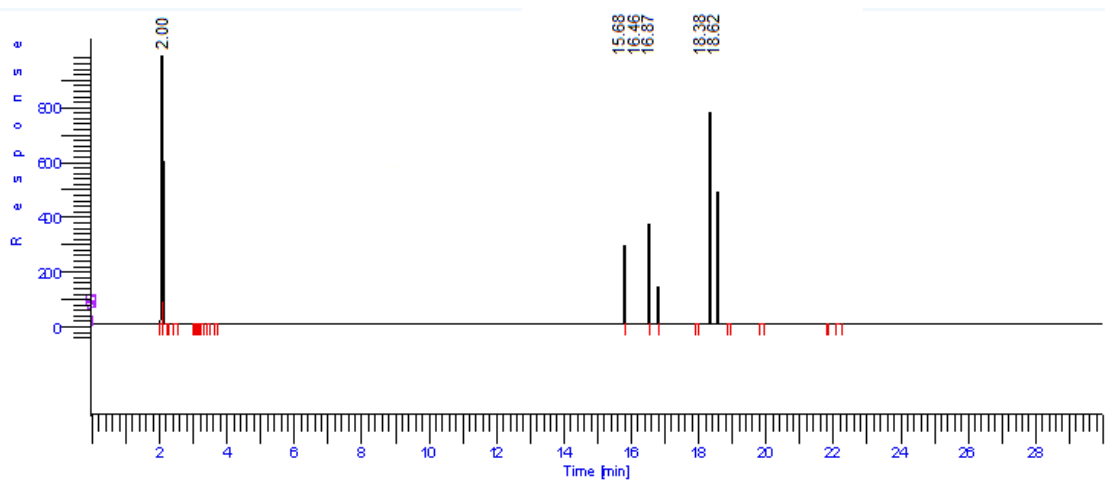


Figura AVI.64. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 15 paralelo

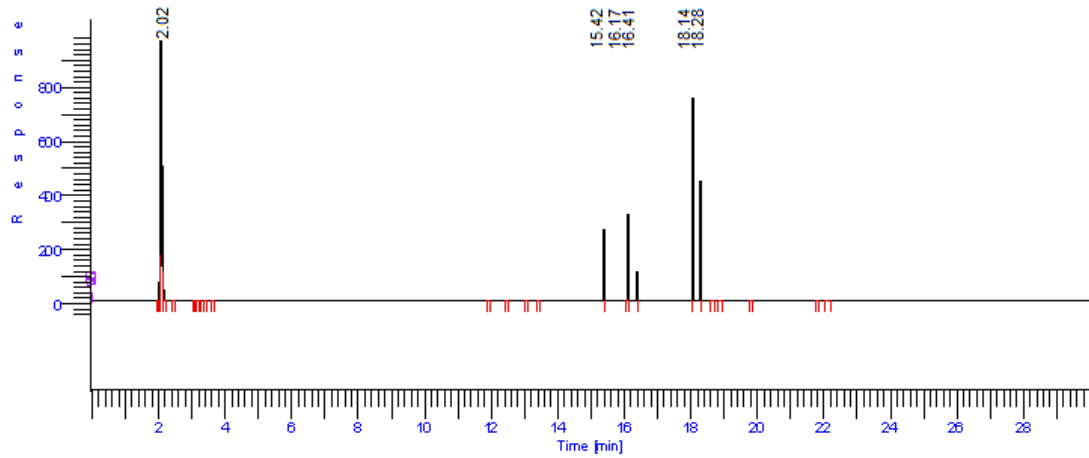


Figura AVI.65. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 20

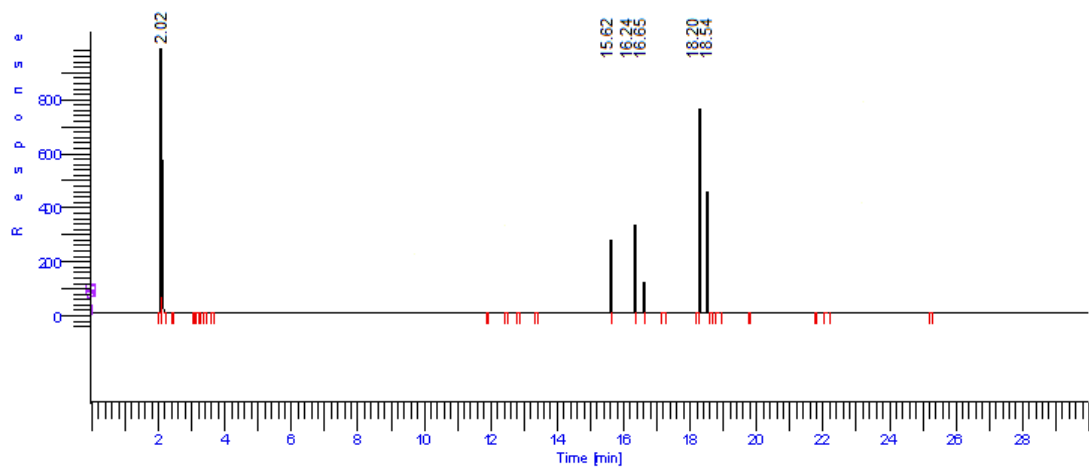


Figura AVI.66. Cromatograma reactor anaerobio 3, semana 20 paralelo

ANEXO VII

CÁLCULOS DE LAS CONCENTRACIONES OBTENIDAS PARA LOS REACTORES AEROBIOS Y ANAEROBIOS A PARTIR DE LOS CROMATOGRAMAS

Los cromatogramas obtenidos para cada muestra a lo largo de la degradación fueron evaluados de manera que permiten determinar la disminución de PCB's con el tiempo, cada cromatograma expuesto en la sección 3.

Ejemplo de cálculo para encontrar la concentración de PCB's presentes en el cromatograma del reactor anaerobio 3 muestra paralela del 8 de julio 2014.

Se calculó el área de los picos de los cromatogramas de cada muestra analizada, como indica la norma, y se muestra en la ecuación AVII.1.

$$A_p = \frac{b \times h}{2} \quad \text{[AVII.1]}$$

$$A_{p1} = \frac{1 \times 1,3}{2} = 0,65$$

$$A_{p2} = \frac{1 \times 0,8}{2} = 0,4$$

$$A_{p3} = \frac{1 \times 0,5}{2} = 0,25$$

$$A_{p4} = \frac{1 \times 1}{2} = 0,5$$

$$A_{p5} = \frac{1 \times 0,9}{2} = 0,45$$

Donde:

- A_p : Area del pico del componente
 b : base del pico del componente
 h : altura del pico del componente

Se realizó la suma de áreas, y se obtuvo el valor final del contaminante, con la ecuación AVII.2.

$$\text{Total suma de áreas} = A_{p1} + A_{p2} + A_{p3} + A_{p4} + A_{p5} = 2,25\text{cm}^2 \quad [\text{AVII.2}]$$

El método desarrollado y la norma ASTM D 4059-00 concuerdan en que el valor total de las áreas se debe multiplicar por el factor 10^6 y con los datos de la curva de calibración se obtuvieron las concentraciones de PCB's en las muestras. El cromatógrafo también sugiere que las muestras deben multiplicarse por el factor mencionado. Es así como se obtiene el área total de los contaminantes de cada cromatograma reportado.

$$\text{Área total de PCB's} = 2,25 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

Parámetros de curva de calibración para los reactores aerobios que trabajaron con aceite de concentración 702 ppm

Las curvas de concentración mostradas en la sección 3, de resultados y discusión fueron obtenidas a partir Tabla AVII.1.

Tabla AVII.1. Datos obtenidos para la curva de calibración del aceite con concentración 700 ppm

Concentración [mg/L]	Área [mm ²]	Concentración. corregida [mg/L]	RSD
50	2 755 330	53,529	107,100
250	8 890 212	273,437	109,400
500	13 928 780	454,048	90,800
600	16 982 172	563,498	93,900
702	22 338 181	755,488	107,900

La Tabla AVII.1. fue empleada para obtener la curva de calibración del aceite contaminado con concentración de 702 ppm, curva mostrada en el ítem 3.3.2.1. para la cual se realizaron diluciones en aceite libre de contaminantes y se obtuvieron los ensayos a las concentraciones de 50, 250, 500, 600 y 700 ppm de PCB's contaminantes. La curva tiene como datos los parámetros presentados en la Tabla AVII.2.

Tabla AVII.2. Parámetros obtenidos para la curva de calibración del aceite con concentración 700 ppm

Parámetro	Valor
Pendiente	27 897,441
Intersección	1 262 009,636
Coefficiente de Correlación (r^2)	0,987

Parámetros de curva de calibración para los reactores aerobios que trabajaron con aceite de concentración 1 918 ppm

Los mismos pasos realizados para calcular la curva de calibración del aceite con concentración de 702 ppm fue empleada en el cálculo de la curva de calibración del aceite con concentración de 1 918 ppm, tomando como datos los valores de las concentraciones 50, 500, 750, 1 000, y 1 918 ppm, como se muestra en la Tabla AVII.3. Y a partir la Tabla AVII.3. se obtiene la Tabla All.4.

Tabla AVII.3. Datos obtenidos para la curva de calibración del aceite con concentración de 1 918 ppm

Concentración [mg/L]	Área [mm ²]	Concentración. corregida [mg/L]	RSD
50	2 592 181	53,526	107,100
500	33 101 582	490,487	98,100
750	51 300 198	751,131	100,200
1000	69 094 215	1005,980	100,600
2000	138 419 995	1998,876	99,900

Tabla AVII.4. Parámetros obtenidos para la curva de calibración del aceite con concentración 2 000 ppm

Parámetro	Valor
Pendiente	69 821,789
Intersección	-1 145 104,006
Coefficiente de Correlación (r^2)	0,999

ANEXO VIII

DISEÑO DE LOS TANQUES DE LOS REACTORES DE BIODEGRADACIÓN DE ACEITE DIELECTRICO CON PCB's

Los ejemplos de cálculo realizados en esta sección se tomaron a partir de las relaciones enunciadas según McCabe y Smith (2003) que fueron mencionadas en el ítem 2.2.8. Es así como se tienen las Ecuaciones AVIII.1, AVIII.2, AVIII.3, AVIII.4, AVIII.5, AVIII.6, y AVIII.7 (p. 260-276).

Ejemplo de cálculo realizado para obtener el diámetro del agitador del reactor aerobio

$$D_a = \frac{1}{3} \times D_r \quad \text{[AVIII.1]}$$

$$D_a = 0,108 \text{ m}$$

Ejemplo de cálculo realizado para obtener la altura entre el reactor y el agitador

$$h_{f-r} = D_r$$

$$h_{f-r} = 0,036 \text{ m}$$

Ejemplo de cálculo realizado para obtener la altura del reactor

$$V_r = \pi \times R_r^2 \times h_r \quad \text{[AVIII. 2]}$$

$$2L \times \frac{1\,000\text{cm}^3}{1L} \times \frac{1\text{m}^3}{100^3\text{cm}^3} = \pi \times (r)^2 \times (4r)$$

$$r = \left(\frac{0,002}{\pi \times 4} \right)^{1/3} = 0,054 \text{ m} ; D = 0,108 \text{ m} ; h_r = 0,220 \text{ m}$$

Donde:

D_r : Diámetro interno del reactor [m]

H : Altura del líquido en el tanque [m]

h_r : Altura del reactor [m]

D_a : Diámetro de la paleta del agitador [m]

W : Altura de la paleta del agitador [m]

E : Altura de la base del tanque al agitador [m]

J : Ancho del deflector [m]

L : Largo de la paleta del agitador [m]

h_{f-r} : Altura entre el nivel del líquido dentro del reactor y la paleta del agitador [m]

Ejemplo de cálculo realizado para obtener la longitud del agitador

Se trata de la consideración de la altura del reactor h_r menos la distancia entre el reactor y el rodete, Ecuación AVIII.2 que reemplazando los valores se obtiene el dato de la longitud del agitador (L).

$$L = h_r - h_{f-r} \quad \text{[AVIII.3]}$$

$$L = 0,180 \text{ m}$$

Ejemplo de cálculo realizado para obtener el largo de la paleta del agitador

El largo de la paleta es considerado como la cuarta parte del diámetro del reactor y se representa su relación en la Ecuación AVIII.4.

$$L_p = \frac{1}{4} \times D_a \quad \text{[AVIII.4]}$$

$$L_p = 0,009 \text{ m}$$

Ejemplo de cálculo realizado para obtener la altura de la paleta del agitador

La altura de la paleta mide la quinta parte de la longitud del diámetro del reactor, dato tomado según McCabe y Smith (2003), y se denota en la Ecuación AVIII.5 (p. 268-276).

$$W = \frac{1}{5} \times D_a \quad \text{[AVIII.5]}$$

$$W = 0,006 \text{ m}$$

Ejemplo de cálculo realizado para obtener la potencia del agitador

La potencia del agitador fue calculada a partir de la variable adimensional del número de Reynolds de acuerdo a la Ecuación AVIII.6 y a su vez de acuerdo a la Figura 2.7. siguiendo las relaciones mencionas en el ítem 2.2.8 se tiene:

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 \times N \times \delta}{\mu} \quad \text{[AVIII.6]}$$

Donde:

- D_a : Diámetro del agitador
- N : Número de revoluciones por minuto (rpm)
- μ : Viscosidad dinámica de la mezcla
- δ : Densidad de la mezcla

$$N_{Re} = \frac{\left(\frac{D_r}{2}\right)^2 \times N \times \delta}{\mu} \quad \text{[AVIII.7]}$$

Para la Ecuación AVIII.7. se requieren los datos de la densidad que serán calculados a partir de las ecuaciones AVIII.8. La densidad de la mezcla fue calculada de acuerdo a las fracciones de los componentes líquidos constituyentes en la solución.

$$\delta = \frac{M_T}{V_T} \quad [\text{AVIII.8}]$$

$$\delta = \frac{M_T}{V_T} = \frac{M_A + M_B + M_C + \dots}{V_A + V_B + V_C + \dots} \quad [\text{AVIII.9}]$$

$$\delta = \frac{M_T}{V_T} = \frac{M_A \times V_A + M_B \times V_B + M_C \times V_C + \dots}{V_A + V_B + V_C + \dots} \quad [\text{AVIII.10}]$$

$$\delta = 1,000 \frac{g}{ml}$$

Al obtener el dato de la densidad de la mezcla fue reemplazada en la Ecuación AVIII.8 del número de Reynolds, para lo cual se considera la viscosidad del agua a temperatura de 20°C, dato obtenidos en Tablas del manual de Perry (Perry R., Green D., 2001, p. 2-10).

Para el radio del agitador se toman los siguientes criterios para el diseño típico de un agitador tipo turbina. Se consideró únicamente una paleta en el reactor, ya que se trata de un reactor de laboratorio, reemplazando las variables de densidad y viscosidad se obtiene la Ecuación AVIII.12 y el valor del número de Reynolds.

$$N_{Re} = \frac{\left(\frac{0,03}{3} m\right)^2 \times 150 \frac{rev}{min} \times (1000) \frac{kg}{m^3}}{1,102 \times 10^{-3} \frac{kg}{m.s}} \quad [\text{AVIII.11}]$$

$$N_{Re} = 2\,041,7463 = 2,041 \times 10^3$$

Se analizó el N_{Re} , en los criterios $10 < N_{Re} < 10\ 000$, y se pudo determinar que se trató de un líquido con flujo laminar y lo que llevó a encontrar la variable N_p referida al número de potencia de la Figura 2.7. pudiendo así encontrar el valor de la potencia de la bomba para la agitación reemplazando en la fórmula de N_p . Obteniendo el valor de N_p , se reemplaza en la fórmula de la Ecuación AVII.12, desglosada en la Ecuación AVIII.13 y se obtiene la potencia del agitador.

$$N_p = \frac{P}{\delta \times N^3 \times D_a^5} \quad [\text{AVIII.12}]$$

$$P = N_p \times \delta \times N^3 \times D_a^5 \quad [\text{AVIII.13}]$$

$$P = 0,9 \times 1\ 000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{2,5 \text{ rev}^3}{\text{s}} \times (0,03 \text{ m})^5$$

$$P = 0,040 \text{ W}$$

Ejemplo de cálculo realizado para obtener la temperatura de operación de los reactores aerobios y anaerobios.

La temperatura de operación que se empleó en este trabajo fue la temperatura correspondiente a las condiciones experimentales de cada biorreactor, en los que se manejó una temperatura ambiente de 22 °C.

La Ecuación AVIII.14 y AVIII.15 se muestra el ejemplo cálculo de las temperaturas promedio de las temperaturas en los biorreactores.

$$T_{\text{media/reactor}} = \frac{\sum T}{\# \text{ días monitoreadas} \times 3} \quad [\text{AVIII.14}]$$

$$T_{\text{media proceso}} = \frac{\sum T_{\text{media/reactor}}}{6 \text{ biorreactores}} \quad [\text{AVIII.15}]$$

Donde:

- T : Temperaturas medidas periódicamente [°C]
 $T_{media/reactor}$: Temperatura media de cada biorreactor [°C]
 $T_{media/proceso}$: Temperatura media de todo el proceso [°C]

Resolviendo las Ecuaciones AVIII.14 y AVIII.15 se tiene:

$$T_{media\ proceso} = \frac{\sum[22,0 + 22,0 + 22,0 + 22,0 + 22,0 + 22,1]}{6}$$

$$T_{media\ proceso} = 22,0\ ^\circ C$$

Ejemplo de cálculo realizado para obtener la presión de operación de los reactores aerobios y anaerobios

La presión de operación de los biorreactores fueron calculados dependiendo del sistema aerobio o anaerobio.

- Reactor aerobio

En el cual la presión de operación es igual a la presión hidrostática más la presión atmosférica, como se muestra en la Ecuación AVIII.16.

$$P_{O_a} = P_{a_a} + P_{h_a} \quad [AVIII.16]$$

$$P_{O_a} = 540\ mmHg + [\delta \times g \times h]$$

$$P_{O_a} = 71994,07\ Pa + \left[\frac{1000\ kg}{m^3} \times \frac{9,8\ m}{s^2} \times 0,2564\ m \right]$$

$$P_{O_a} = 71994,07\ Pa + [2\ 512,72]\ Pa$$

$$P_{O_a} = 74\ 506,79\ Pa$$

Donde:

- P_{o_a} : Presión de operación reactor aerobio [Pa]
 P_{a_a} : Presión atmosférica reactor aerobio [Pa]
 P_{h_a} : Presión hidrostática reactor aerobio [Pa]
 δ : Densidad de la solución en el reactor [kg/m^3]
 g : gravedad [m/s^2]
 h : altura del reactor [m]

- **Reactor anaerobio**

La presión del reactor anaerobio siguió las relaciones mostradas en la sección 2.2.8. del Diseño de los biorreactores, donde la presión de operación únicamente tendrá el aporte de la presión hidrostática que ejerce el líquido sobre la base del tanque (León, 2001, p. 10). Se calcula de acuerdo a la Ecuación AVIII.17.

$$P_{o_{an}} = P_{h_{an}} \quad \text{[AVIII.17]}$$

$$P_{o_{an}} = [\delta \times g \times h]$$

$$P_{o_{an}} = \left[\frac{1\,000\text{ Kg}}{\text{m}^3} \times \frac{9,8\text{ m}}{\text{s}^2} \times 0,2564\text{ m} \right]$$

$$P_{o_{an}} = 2\,512,72\text{ Pa}$$

Donde:

$P_{o_{an}}$: Presión de operación reactor anaerobio [Pa]

P_{h_a} : Presión hidrostática reactor anaerobio [Pa]

δ : Densidad de la solución en el reactor [kg/m^3]

g : gravedad [m/s^2]

h : altura del reactor [m]

Ejemplo de cálculo realizado para obtener la presión de diseño de los reactores aerobios y anaerobios.

La presión de diseño que se empleó satisface la relación de ser el 10% más que

la presión de operación del biorreactor (León, 2001, p. 10). Los cálculos de esta variable en los dos sistemas se muestran en la Ecuación AVIII.18. y AVIII.19 respectivamente.

- **Reactor Aerobio**

$$Pd_a = (0,1) \times Po_a + Po_a \quad \text{[AVIII.18]}$$

$$Pd_a = (0,1 \times 74\,506,9) \text{ Pa} + 74\,506,79 \text{ Pa}$$

$$Pd_a = 81\,957,46 \text{ Pa}$$

- **Reactor Anaerobio**

$$Pd_{an} = 10\% \times Po_{an} + Po_{an} \quad \text{[AVIII.19]}$$

$$Pd_{an} = 10\% \times 2\,512,72 \text{ Pa} + 2\,512,72 \text{ Pa}$$

$$Pd_{an} = 2\,763,99 \text{ Pa}$$

Donde:

Po_{an} : Presión de operación reactor anaerobio [Pa]

Pd_a : Presión de diseño reactor anaerobio [Pa]

Po_a : Presión de operación reactor aerobio [Pa]

Pd_a : Presión de diseño reactor aerobio [Pa]

ANEXO IX

**TABLAS DE pH Y TEMPERATURA DE LOS BIORREACTORES
AEROBIOS Y ANAEROBIOS**

Tabla AIX. 1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
1	1	22,2	6,0
	2	22,1	6,1
	3	21,3	6,2
2	4	20,7	6,0
	5	21,8	6,2
	6	20,1	6,4
3	7	23,0	6,1
	8	22,5	6,4
	9	23,6	6,2
4	10	20,9	6,0
	11	22,9	6,2
	12	23,7	6,3
5	13	20,9	6,2
	14	21,6	6,1
	15	21,4	6,3
6	16	23,8	6,1
	17	20,8	6,1
	18	20,9	6,3
7	19	20,4	6,5
	20	21,8	6,4
	21	21,3	6,3
8	22	21,7	6,2
	23	23,7	6,1
	24	22,5	6,4
9	25	20,1	6,2
	26	20,8	6,2
	27	21,3	6,1

Tabla AIX.1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
10	28	21,6	6,0
	29	21,6	6,3
	30	23,1	6,3
11	31	20,8	6,3
	32	23,5	6,4
	33	20,6	6,2
12	34	22,4	6,3
	35	22,8	6,5
	36	21,7	6,4
13	37	23,6	6,2
	38	23,9	6,2
	39	23,2	6,2
14	40	22,7	6,0
	41	23,8	6,3
	42	21,9	6,1
15	43	22,0	6,1
	44	23,4	6,2
	45	20,5	6,4
16	46	21,2	6,4
	47	23,8	6,4
	48	21,3	6,2
17	49	20,6	6,1
	50	21,8	6,0
	51	22,1	6,4
18	52	23,9	6,2
	53	20,8	6,0
	54	20,1	6,3
19	55	21,8	6,1
	56	21,6	6,0
	57	22,5	6,2
20	58	22,9	6,2
	59	23,7	6,3
	60	22,2	6,1

Tabla AIX.1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
21	61	20,4	6,1
	62	20,6	6,4
	63	22,0	6,0
22	64	23,5	6,0
	65	23,8	6,1
	66	24,0	6,4
23	67	20,9	6,0
	68	22,3	6,4
	69	21,9	6,0
24	70	23,0	6,3
	71	20,1	6,0
	72	21,7	6,1
25	73	20,7	6,2
	74	22,1	6,3
	75	21,8	6,1
26	76	22,3	6,0
	77	21,7	6,1
	78	23,4	6,3
27	79	23,2	6,3
	80	20,5	6,3
	81	23,3	6,1
28	82	23,2	6,1
	83	21,5	6,2
	84	20,8	6,1
29	85	21,4	6,1
	86	23,4	6,4
	87	20,9	6,1
30	88	22,4	6,0
	89	20,1	6,3
	90	20,6	6,4
31	91	21,7	8,1
	92	21,9	8,8
	93	23,3	6,4

Tabla AIX.1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
32	94	21,5	7,2
	95	20,8	7,7
	96	20,2	9,0
33	97	23,0	8,4
	98	23,5	8,4
	99	21,7	8,5
34	100	22,8	8,1
	101	21,6	7,3
	102	22,3	7,4
35	103	21,8	8,1
	104	20,5	6,2
	105	23,5	8,8
36	106	22,8	7,6
	107	21,9	6,6
	108	23,8	7,3
37	109	23,9	7,5
	110	21,4	8,7
	111	22,2	6,9
38	112	21,9	8,6
	113	20,7	7,5
	114	21,7	6,1
39	115	24,0	8,4
	116	22,8	6,3
	117	22,8	7,0
40	118	20,3	7,4
	119	20,7	7,4
	120	23,7	8,3
41	121	20,2	6,3
	122	23,7	6,4
	123	21,4	7,8
42	124	20,9	6,7
	125	23,2	8,9
	126	23,9	7,9

Tabla AIX.1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
43	127	21,0	6,7
	128	21,7	6,2
	129	23,4	6,1
44	130	20,5	8,5
	131	23,3	8,4
	132	22,4	8,2
45	133	22,5	8,2
	134	20,2	8,2
	135	23,9	7,1
46	136	23,5	6,0
	137	23,3	6,1
	138	23,1	7,1
47	139	21,5	8,9
	140	21,0	8,3
	141	22,4	6,4
48	142	22,2	7,5
	143	23,1	6,6
	144	22,9	8,7
49	145	22,4	6,5
	146	22,5	6,9
	147	22,1	7,1
50	148	21,5	7,7
	149	22,7	6,1
	150	20,3	7,6
51	151	22,8	6,6
	152	22,7	7,5
	153	21,1	8,5
52	154	23,9	8,0
	155	23,7	8,6
	156	21,8	8,0
53	157	21,1	6,0
	158	22,1	8,8
	159	23,2	6,1

Tabla AIX.1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
54	160	21,0	6,0
	161	22,4	6,5
	162	20,0	8,4
55	163	20,3	7,8
	164	21,8	8,9
	165	21,1	6,3
56	166	22,9	7,1
	167	22,9	7,7
	168	20,9	8,0
57	169	22,2	6,4
	170	20,3	8,5
	171	22,7	8,6
58	172	23,9	6,3
	173	21,1	8,9
	174	23,0	7,6
59	175	23,5	7,6
	176	23,0	8,0
	177	21,5	7,8
60	178	20,7	6,6
	179	22,9	7,1
	180	23,4	8,9
61	181	22,3	7,7
	182	22,0	6,1
	183	22,3	8,1
62	184	22,7	6,4
	185	20,2	6,6
	186	23,1	6,1
63	187	20,2	6,6
	188	21,9	7,6
	189	22,4	8,3
64	190	21,6	6,8
	191	22,0	8,6
	192	20,2	6,7

Tabla AIX.1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
65	193	22,7	6,5
	194	22,3	7,3
	195	23,1	7,7
66	196	20,2	6,1
	197	21,1	8,6
	198	21,2	7,7
67	199	21,1	7,9
	200	20,5	8,6
	201	20,8	7,0
68	202	20,2	7,0
	203	21,1	6,5
	204	23,5	6,1
69	205	22,5	6,9
	206	21,8	7,6
	207	22,1	7,6
70	208	22,9	7,2
	209	23,0	8,6
	210	22,1	6,2
71	211	22,4	7,7
	212	23,2	8,4
	213	22,7	8,0
72	214	22,0	8,3
	215	21,1	8,3
	216	23,6	7,7
73	217	22,4	7,7
	218	22,0	7,5
	219	21,9	6,5
74	220	21,4	6,1
	221	23,4	8,4
	222	20,7	8,0
75	223	23,6	6,4
	224	21,1	6,6
	225	22,2	8,1

Tabla AIX.1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
76	226	23,3	6,2
	227	20,2	6,0
	228	20,2	6,4
77	229	24,0	6,1
	230	23,8	6,3
	231	22,1	6,1
78	232	20,3	6,3
	233	21,1	6,1
	234	20,6	6,3
79	235	22,4	6,2
	236	20,2	6,4
	237	20,9	6,3
80	238	23,3	6,3
	239	20,5	6,2
	240	20,9	6,2
81	241	21,5	6,1
	242	23,6	6,3
	243	20,0	6,3
82	244	21,7	6,2
	245	22,4	6,1
	246	22,5	6,4
83	247	23,0	6,3
	248	20,5	6,2
	249	21,9	6,3
84	250	20,0	6,2
	251	23,1	6,1
	252	20,4	6,4
85	253	20,3	6,2
	254	21,1	6,0
	255	23,1	6,3
86	256	22,7	6,0
	257	21,2	6,1
	258	20,3	6,3

Tabla AIX.1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
87	259	23,1	6,3
	260	22,3	6,4
	261	23,0	6,1
88	262	20,3	6,2
	263	22,2	6,0
	264	20,0	6,1
89	265	22,1	6,1
	266	23,6	6,4
	267	23,8	6,3
90	268	23,2	6,4
	269	23,4	6,1
	270	23,0	6,3
91	271	23,8	6,2
	272	23,4	6,3
	273	21,1	6,1
92	274	20,7	6,2
	275	20,9	6,2
	276	22,8	6,1
93	277	23,2	6,3
	278	20,4	6,2
	279	21,0	6,2
94	280	20,2	6,3
	281	22,3	6,3
	282	23,7	6,1
95	283	21,5	6,3
	284	22,9	6,2
	285	20,3	6,3
96	286	22,6	6,2
	287	23,3	6,2
	288	22,5	6,3
97	289	20,3	6,1
	290	20,9	6,2
	291	22,2	6,1

Tabla AIX.1. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 1 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
98	292	21,2	6,1
	293	23,7	6,0
	294	22,5	6,4
99	295	22,1	6,1
	296	22,6	6,3
	297	23,4	6,2
100	298	23,5	6,2
	299	21,9	6,3
	300	20,4	6,2
101	301	21,4	6,2
	302	20,0	6,0
	303	21,0	6,1
102	304	22,2	6,0
	305	20,3	6,3
	306	20,7	6,3
103	307	22,1	6,2
	308	21,9	6,3
	309	21,3	6,3
104	310	21,4	6,2
	311	23,7	6,4
	312	20,8	6,4
105	313	21,7	6,4
	314	21,7	6,4
	315	23,7	6,4

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
1	1	22,7	6,2
	2	20,2	6,6
	3	20,1	6,3

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
2	4	22,1	6,2
	5	21,7	6,4
	6	23,7	6,4
3	7	22,5	6,5
	8	22,0	6,0
	9	22,5	6,3
4	10	20,5	6,4
	11	20,4	6,5
	12	21,0	6,1
5	13	21,2	6,4
	14	23,5	6,2
	15	23,3	6,1
6	16	23,6	6,0
	17	23,3	6,4
	18	22,9	6,6
7	19	20,8	6,8
	20	21,4	6,4
	21	23,1	6,6
8	22	20,9	6,7
	23	21,2	6,2
	24	22,7	6,1
9	25	23,9	6,5
	26	21,5	6,0
	27	20,6	6,6
10	28	22,9	6,7
	29	21,2	6,5
	30	22,8	6,4
11	31	23,8	6,1
	32	23,8	6,5
	33	21,5	6,7
12	34	23,2	6,4
	35	21,5	6,4
	36	22,2	6,3

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
13	37	21,3	6,8
	38	22,1	6,0
	39	21,9	6,1
14	40	22,1	6,5
	41	22,2	6,2
	42	21,1	6,3
15	43	22,2	6,8
	44	20,2	6,5
	45	21,3	6,4
16	46	24,0	6,5
	47	20,8	6,3
	48	21,2	6,2
17	49	21,7	6,5
	50	21,0	6,2
	51	22,8	6,5
18	52	23,1	6,5
	53	23,0	6,1
	54	22,8	6,3
19	55	22,9	6,2
	56	21,6	6,8
	57	21,0	6,3
20	58	20,7	6,1
	59	21,7	6,3
	60	21,4	6,1
21	61	23,2	6,4
	62	20,9	6,2
	63	20,9	6,3
22	64	20,3	6,5
	65	21,7	6,0
	66	20,4	6,2
23	67	22,0	6,1
	68	21,8	6,5
	69	21,9	6,7

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
24	70	22,3	6,7
	71	22,0	6,4
	72	21,4	6,8
25	73	23,1	6,5
	74	24,0	6,1
	75	20,8	6,0
26	76	21,5	6,2
	77	21,5	6,2
	78	21,4	6,6
27	79	23,3	6,5
	80	23,3	6,5
	81	23,7	6,6
28	82	22,8	6,1
	83	21,4	6,7
	84	23,5	6,6
29	85	20,8	6,4
	86	22,9	6,3
	87	23,1	6,3
30	88	20,6	6,6
	89	21,7	6,8
	90	20,0	6,7
31	91	20,1	6,2
	92	22,6	8,4
	93	23,9	6,2
32	94	21,9	7,1
	95	23,3	8,4
	96	20,9	7,1
33	97	23,3	6,1
	98	21,4	7,4
	99	21,0	6,9
34	100	23,5	6,3
	101	21,1	8,9
	102	20,9	7,7

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
35	103	20,6	7,7
	104	22,2	8,0
	105	24,0	8,3
36	106	22,9	7,3
	107	24,0	7,8
	108	23,8	6,3
37	109	21,5	7,8
	110	20,6	7,0
	111	23,2	7,1
38	112	23,2	7,3
	113	23,3	8,2
	114	21,0	7,3
39	115	20,1	8,6
	116	21,6	7,0
	117	22,4	6,6
40	118	21,3	8,7
	119	22,4	7,9
	120	21,2	7,6
41	121	22,5	8,2
	122	21,9	8,5
	123	23,1	7,3
42	124	21,4	8,3
	125	23,6	7,3
	126	23,3	6,5
43	127	20,1	6,3
	128	22,0	7,3
	129	23,7	8,9
44	130	22,1	7,0
	131	21,9	6,1
	132	22,4	7,7
45	133	22,6	8,3
	134	20,6	7,5
	135	23,1	8,3

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
46	136	22,6	8,6
	137	21,6	8,8
	138	21,6	6,5
47	139	21,6	6,7
	140	23,4	8,3
	141	22,2	6,6
48	142	20,7	6,9
	143	23,5	7,8
	144	21,9	8,5
49	145	21,4	7,0
	146	22,1	8,0
	147	20,3	8,7
50	148	20,5	6,9
	149	20,5	8,2
	150	23,6	8,8
51	151	20,4	8,5
	152	21,2	6,9
	153	20,4	6,2
52	154	22,6	7,7
	155	22,2	8,3
	156	22,3	6,3
53	157	21,1	6,6
	158	20,2	7,0
	159	20,0	8,8
54	160	22,0	7,6
	161	20,2	8,0
	162	21,1	7,9
55	163	23,0	6,5
	164	23,0	6,4
	165	21,2	7,7
56	166	20,4	6,4
	167	21,8	7,6
	168	20,1	8,7

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
57	169	21,9	6,9
	170	23,7	6,1
	171	22,9	8,9
58	172	21,7	7,5
	173	23,7	7,4
	174	21,4	8,9
59	175	21,3	8,3
	176	20,1	6,1
	177	20,0	6,3
60	178	21,4	8,7
	179	21,2	7,8
	180	20,9	8,1
61	181	22,3	6,2
	182	20,9	6,3
	183	23,3	8,0
62	184	21,9	6,4
	185	20,9	8,7
	186	23,3	6,3
63	187	21,8	6,9
	188	20,2	8,1
	189	22,6	8,0
64	190	21,9	6,9
	191	22,7	8,5
	192	22,0	8,3
65	193	22,7	8,7
	194	20,9	7,1
	195	21,1	6,6
66	196	21,2	6,4
	197	20,4	7,0
	198	23,4	7,7
67	199	23,7	7,3
	200	22,5	6,0
	201	20,4	7,7

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
68	202	20,1	7,2
	203	21,9	7,9
	204	20,1	7,9
69	205	22,2	6,5
	206	23,1	7,6
	207	21,2	7,3
70	208	20,9	8,9
	209	22,8	8,8
	210	20,9	6,2
71	211	22,7	8,3
	212	23,5	7,7
	213	22,1	7,4
72	214	23,7	7,2
	215	23,4	9,0
	216	23,7	6,5
73	217	23,5	7,2
	218	22,2	6,1
	219	21,2	8,2
74	220	20,7	8,8
	221	20,8	7,5
	222	22,4	7,3
75	223	21,5	8,2
	224	23,3	7,6
	225	20,5	6,7
76	226	21,9	7,1
	227	23,2	8,8
	228	22,4	6,8
77	229	22,7	6,7
	230	21,4	7,1
	231	20,0	8,5
78	232	22,1	8,6
	233	21,5	8,1
	234	23,0	6,1

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
79	235	21,0	6,2
	236	23,3	6,4
	237	21,8	6,4
80	238	22,2	6,0
	239	23,0	6,1
	240	24,0	6,6
81	241	21,9	6,4
	242	22,0	6,1
	243	20,8	6,4
82	244	20,3	6,5
	245	23,9	6,7
	246	21,5	6,4
83	247	23,0	6,6
	248	22,5	6,5
	249	22,8	6,4
84	250	23,8	6,7
	251	24,0	6,4
	252	23,8	6,6
85	253	21,5	6,1
	254	21,0	6,7
	255	21,8	6,5
86	256	20,6	6,3
	257	22,9	6,6
	258	23,7	6,7
87	259	21,1	6,5
	260	22,8	6,7
	261	20,8	6,3
88	262	20,1	6,2
	263	21,5	6,5
	264	21,8	6,5
89	265	21,4	6,3
	266	22,3	6,4
	267	22,4	6,5

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
90	268	22,0	6,2
	269	20,4	6,4
	270	24,0	6,8
91	271	23,9	6,3
	272	21,0	6,5
	273	20,5	6,1
92	274	23,1	6,1
	275	21,5	6,2
	276	22,0	6,5
93	277	20,0	6,2
	278	22,4	6,1
	279	20,3	6,3
94	280	22,7	6,1
	281	21,8	6,5
	282	22,4	6,5
95	283	23,1	6,5
	284	22,9	6,3
	285	23,1	6,4
96	286	21,1	6,3
	287	21,5	6,4
	288	23,9	6,6
97	289	21,6	6,5
	290	20,3	6,6
	291	23,8	6,6
98	292	23,6	6,3
	293	21,1	6,5
	294	23,8	6,7
99	295	20,3	6,3
	296	21,5	6,6
	297	21,5	6,2
100	298	23,8	6,1
	299	23,8	6,4
	300	21,9	6,8

Tabla AIX.2. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 2		22±2 (°C)	6,8
Día	Medida	T (°C)	pH
101	301	23,5	6,2
	302	22,7	6,7
	303	21,9	6,1
102	304	22,8	6,7
	305	20,5	6,4
	306	23,3	6,7
103	307	20,3	6,5
	308	21,2	6,8
	309	23,4	6,7
104	310	21,8	6,8
	311	20,0	6,3
	312	22,4	6,8
105	313	20,7	6,5
	314	24,0	6,5
	315	23,4	6,5

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
1	1	22,2	6,3
	2	22,1	6,3
	3	21,3	6,4
2	4	20,7	6,0
	5	21,8	6,2
	6	20,1	6,2
3	7	23,0	6,1
	8	22,5	6,0
	9	23,6	6,1
4	10	20,9	6,0
	11	22,9	6,1
	12	23,7	6,3

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
5	13	20,9	6,4
	14	21,6	6,1
	15	21,4	6,4
6	16	23,8	6,0
	17	20,8	6,3
	18	20,9	6,3
7	19	20,4	6,2
	20	21,8	6,4
	21	21,3	6,0
8	22	21,7	6,3
	23	23,7	6,4
	24	22,5	6,4
9	25	20,1	6,3
	26	20,8	6,3
	27	21,3	6,2
10	28	21,6	6,0
	29	21,6	6,4
	30	23,1	6,1
11	31	20,8	6,3
	32	23,5	6,1
	33	20,6	6,1
12	34	22,4	6,1
	35	22,8	6,2
	36	21,7	6,1
13	37	23,6	6,3
	38	23,9	6,3
	39	23,2	6,3
14	40	22,7	6,1
	41	23,8	6,3
	42	21,9	6,0
15	43	22,0	6,2
	44	23,4	6,3
	45	20,5	6,4

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
16	46	21,2	6,4
	47	23,8	6,1
	48	21,3	6,2
17	49	20,6	6,1
	50	21,8	6,3
	51	22,1	6,3
18	52	23,9	6,3
	53	20,8	6,3
	54	20,1	6,3
19	55	21,8	6,3
	56	21,6	6,2
	57	22,5	6,1
20	58	22,9	6,3
	59	23,7	6,3
	60	22,2	6,3
21	61	20,4	6,1
	62	20,6	6,2
	63	22,0	6,4
22	64	23,5	6,1
	65	23,8	6,3
	66	24,0	6,0
23	67	20,9	6,2
	68	22,3	6,2
	69	21,9	6,4
24	70	23,0	6,0
	71	20,1	6,2
	72	21,7	6,3
25	73	20,7	6,4
	74	22,1	6,3
	75	21,8	6,2
26	76	22,3	6,3
	77	21,7	6,4
	78	23,4	6,2

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
27	79	23,2	6,2
	80	20,5	6,3
	81	23,3	6,4
28	82	23,2	6,2
	83	21,5	6,2
	84	20,8	6,4
29	85	21,4	6,0
	86	23,4	6,1
	87	20,9	6,0
30	88	22,4	6,2
	89	20,1	6,2
	90	20,6	6,1
31	91	23,5	7,7
	92	22,8	8,7
	93	20,7	6,7
32	94	22,4	7,8
	95	21,2	6,3
	96	22,7	7,1
33	97	20,1	7,1
	98	20,8	6,6
	99	20,4	7,3
34	100	21,9	6,5
	101	20,0	6,7
	102	20,7	7,5
35	103	24,0	8,1
	104	22,1	8,4
	105	23,1	8,2
36	106	23,0	6,2
	107	23,9	7,6
	108	20,3	7,3
37	109	23,1	6,0
	110	22,2	7,7
	111	20,4	7,8

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
38	112	20,3	6,6
	113	22,0	7,0
	114	20,6	8,5
39	115	20,6	7,6
	116	22,9	7,0
	117	20,5	8,6
40	118	21,9	7,6
	119	21,7	6,6
	120	22,6	7,6
41	121	20,9	7,3
	122	20,4	7,4
	123	20,9	6,5
42	124	20,4	8,8
	125	23,2	7,8
	126	22,6	6,1
43	127	23,5	6,2
	128	20,6	7,0
	129	22,2	8,9
44	130	21,8	6,5
	131	20,5	7,5
	132	20,4	8,2
45	133	22,4	6,6
	134	21,6	7,7
	135	21,6	6,0
46	136	22,7	8,8
	137	20,6	8,1
	138	21,2	6,2
47	139	20,1	6,7
	140	23,9	8,2
	141	23,9	8,1
48	142	21,7	6,5
	143	23,0	6,8
	144	23,1	8,7

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
49	145	22,9	6,7
	146	23,7	6,1
	147	22,3	7,5
50	148	22,8	8,1
	149	23,2	8,4
	150	20,7	7,0
51	151	21,4	8,3
	152	23,5	8,7
	153	23,1	6,0
52	154	22,9	6,7
	155	23,9	7,0
	156	20,1	7,4
53	157	20,2	7,1
	158	22,6	8,8
	159	21,3	7,0
54	160	21,8	6,4
	161	22,9	6,6
	162	22,2	8,5
55	163	24,0	8,8
	164	22,0	8,7
	165	20,2	7,1
56	166	22,6	7,2
	167	22,5	8,5
	168	22,5	6,5
57	169	21,1	6,0
	170	21,1	7,7
	171	20,8	7,4
58	172	22,0	7,5
	173	23,1	7,1
	174	20,7	6,0
59	175	22,1	6,6
	176	21,2	8,5
	177	23,0	7,8

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
60	178	23,3	8,4
	179	21,4	7,9
	180	21,7	8,6
61	181	23,4	6,9
	182	22,6	7,5
	183	21,1	6,0
62	184	20,4	8,9
	185	22,3	7,3
	186	21,8	6,5
63	187	22,4	8,9
	188	20,1	7,0
	189	22,3	7,5
64	190	23,7	7,4
	191	20,4	7,0
	192	22,9	7,5
65	193	23,7	8,8
	194	21,0	7,4
	195	22,5	7,8
66	196	22,8	6,3
	197	21,0	7,7
	198	23,4	8,6
67	199	22,2	7,6
	200	20,4	7,0
	201	20,5	8,2
68	202	23,3	8,3
	203	23,7	7,8
	204	21,6	7,5
69	205	21,9	6,9
	206	21,4	7,8
	207	23,2	7,5
70	208	20,7	6,7
	209	23,1	7,6
	210	22,0	8,2

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
71	211	21,2	6,5
	212	23,6	8,4
	213	23,0	7,1
72	214	22,1	7,1
	215	23,1	7,3
	216	22,5	8,9
73	217	23,6	7,6
	218	22,6	6,3
	219	22,6	7,7
74	220	20,6	6,3
	221	20,7	7,0
	222	23,0	8,0
75	223	23,6	6,3
	224	21,1	6,3
	225	22,2	6,3
76	226	23,3	6,1
	227	20,2	6,4
	228	20,2	6,3
77	229	24,0	6,3
	230	23,8	6,3
	231	22,1	6,3
78	232	20,3	6,1
	233	21,1	6,0
	234	20,6	6,4
79	235	22,4	6,2
	236	20,2	6,3
	237	20,9	6,4
80	238	23,3	6,1
	239	20,5	6,4
	240	20,9	6,3
81	241	21,5	6,3
	242	23,6	6,1
	243	20,0	6,2
82	244	21,7	6,4
	245	22,4	6,0
	246	22,5	6,0

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
83	247	23,0	6,2
	248	20,5	6,4
	249	21,9	6,3
84	250	20,0	6,1
	251	23,1	6,0
	252	20,4	6,2
85	253	20,3	6,2
	254	21,1	6,2
	255	23,1	6,2
86	256	22,7	6,1
	257	21,2	6,3
	258	20,3	6,4
87	259	23,1	6,3
	260	22,3	6,0
	261	23,0	6,2
88	262	20,3	6,3
	263	22,2	6,1
	264	20,0	6,3
89	265	22,1	6,3
	266	23,6	6,3
	267	23,8	6,1
90	268	23,2	6,2
	269	23,4	6,2
	270	23,0	6,1
91	271	23,8	6,1
	272	23,4	6,3
	273	21,1	6,2
92	274	20,7	6,2
	275	20,9	6,3
	276	22,8	6,2
93	277	23,2	6,3
	278	20,4	6,1
	279	21,0	6,3

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
94	280	20,2	6,1
	281	22,3	6,0
	282	23,7	6,1
95	283	21,5	6,3
	284	22,9	6,3
	285	20,3	6,3
96	286	22,6	6,3
	287	23,3	6,3
	288	22,5	6,1
97	289	20,3	6,1
	290	20,9	6,3
	291	22,2	6,3
98	292	21,2	6,2
	293	23,7	6,2
	294	22,5	6,3
99	295	22,1	6,3
	296	22,6	6,1
	297	23,4	6,0
100	298	23,5	6,3
	299	21,9	6,2
	300	20,4	6,1
101	301	21,4	6,2
	302	20,0	6,3
	303	21,0	6,1
102	304	22,2	6,2
	305	20,3	6,1
	306	20,7	6,2
103	307	22,1	6,0
	308	21,9	6,4
	309	21,3	6,3
104	310	21,4	6,1
	311	23,7	6,4
	312	20,8	6,1

Tabla AIX.3. Condiciones de operación de biorreactor aerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor aerobio 3		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
105	313	21,7	6,0
	314	21,7	6,0
	315	23,7	6,2

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
1	1	21,5	6,1
	2	23,8	6,3
	3	20,6	6,1
2	4	22,3	6,3
	5	21,8	6,4
	6	22,2	6,1
3	7	22,3	6,2
	8	21,7	6,3
	9	21,6	6,1
4	10	22,5	6,3
	11	21,3	6,1
	12	22,1	6,2
5	13	21,3	6,3
	14	20,2	6,2
	15	21,9	6,1
6	16	22,0	6,3
	17	20,5	6,1
	18	23,6	6,1
7	19	21,3	6,2
	20	21,4	6,3
	21	20,1	6,1
8	22	23,4	6,3
	23	21,9	6,0
	24	21,6	6,3

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
9	25	24,0	6,1
	26	23,9	6,4
	27	22,8	6,2
10	28	20,2	6,2
	29	23,5	6,3
	30	20,9	6,1
11	31	20,6	6,1
	32	20,0	6,1
	33	22,1	6,2
12	34	20,4	6,4
	35	23,9	6,1
	36	21,0	6,1
13	37	23,1	6,1
	38	22,6	6,2
	39	22,1	6,2
14	40	20,3	6,1
	41	23,6	6,3
	42	20,9	6,4
15	43	21,4	6,0
	44	22,5	6,3
	45	21,0	6,3
16	46	20,6	6,2
	47	21,9	6,2
	48	23,9	6,3
17	49	20,8	6,3
	50	20,7	6,3
	51	22,2	6,3
18	52	20,7	6,2
	53	22,4	6,1
	54	20,6	6,0
19	55	20,3	6,2
	56	21,8	6,4
	57	20,1	6,0

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
20	58	22,9	6,2
	59	20,6	6,4
	60	22,7	6,0
21	61	21,1	6,4
	62	22,4	6,1
	63	20,4	6,2
22	64	22,6	6,1
	65	23,1	6,3
	66	20,2	6,1
23	67	23,6	6,2
	68	22,4	6,0
	69	22,5	6,1
24	70	23,3	6,1
	71	21,0	6,1
	72	20,2	6,1
25	73	22,6	6,3
	74	22,4	6,1
	75	23,6	6,2
26	76	21,8	6,1
	77	20,7	6,3
	78	22,1	6,2
27	79	23,3	6,4
	80	23,0	6,4
	81	21,0	6,3
28	82	23,8	6,3
	83	23,8	6,1
	84	22,9	6,0
29	85	20,1	6,4
	86	22,7	6,3
	87	22,5	6,0
30	88	22,3	6,2
	89	20,0	6,3
	90	22,1	6,1

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
31	91	21,8	8,7
	92	21,4	7,3
	93	23,8	6,8
32	94	23,9	7,0
	95	20,9	7,0
	96	20,7	7,2
33	97	20,0	6,5
	98	22,3	7,0
	99	22,8	7,2
34	100	21,2	7,9
	101	23,3	8,5
	102	20,5	6,1
35	103	21,9	6,6
	104	23,0	6,8
	105	22,8	6,3
36	106	21,6	6,2
	107	21,8	7,8
	108	21,4	6,3
37	109	23,1	7,0
	110	23,7	6,2
	111	22,6	7,7
38	112	20,2	7,7
	113	23,8	7,9
	114	22,9	8,6
39	115	22,2	8,8
	116	22,9	7,0
	117	22,5	6,6
40	118	20,6	6,4
	119	23,0	7,3
	120	23,9	7,6
41	121	22,3	6,2
	122	23,5	7,7
	123	22,9	8,2

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
42	124	22,6	8,4
	125	23,8	7,6
	126	21,7	7,2
43	127	23,5	8,6
	128	23,5	6,5
	129	21,9	8,5
44	130	20,1	7,7
	131	22,3	8,8
	132	24,0	7,2
45	133	22,0	7,6
	134	23,6	8,1
	135	23,3	8,2
46	136	21,5	7,3
	137	23,7	8,4
	138	20,5	7,0
47	139	23,4	8,3
	140	22,4	8,1
	141	21,2	6,9
48	142	21,1	6,0
	143	22,6	8,3
	144	22,9	6,4
49	145	21,8	7,3
	146	23,9	6,7
	147	21,4	6,7
50	148	22,2	8,3
	149	22,5	7,2
	150	20,2	8,8
51	151	20,4	9,0
	152	23,8	8,6
	153	21,9	8,3
52	154	21,1	6,6
	155	22,3	7,1
	156	22,3	7,3

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
53	157	23,1	7,3
	158	21,6	7,7
	159	22,7	8,6
54	160	20,7	9,0
	161	22,1	8,6
	162	22,5	7,6
55	163	22,8	6,2
	164	21,0	7,1
	165	23,4	8,7
56	166	20,0	7,8
	167	23,4	6,4
	168	22,8	6,3
57	169	22,2	6,7
	170	21,0	6,8
	171	22,5	8,8
58	172	21,9	6,3
	173	22,0	6,8
	174	21,2	7,6
59	175	20,8	8,5
	176	20,2	7,8
	177	23,7	7,3
60	178	20,1	8,3
	179	23,2	8,5
	180	21,8	8,1
61	181	20,2	8,1
	182	23,1	6,3
	183	22,2	6,6
62	184	22,0	6,2
	185	21,6	7,4
	186	23,1	7,0
63	187	22,6	6,1
	188	23,8	6,1
	189	20,2	8,9

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
64	190	20,7	6,1
	191	21,1	7,6
	192	23,8	6,2
65	193	21,3	6,8
	194	21,6	8,6
	195	20,6	6,5
66	196	23,6	6,2
	197	23,8	8,8
	198	23,5	7,5
67	199	20,4	7,0
	200	23,5	8,1
	201	21,0	6,2
68	202	21,7	8,4
	203	20,3	6,5
	204	22,9	6,3
69	205	21,0	8,5
	206	23,1	8,4
	207	20,9	6,7
70	208	20,9	6,5
	209	20,0	8,3
	210	21,5	6,8
71	211	23,9	6,1
	212	20,5	6,0
	213	22,6	8,2
72	214	23,2	8,8
	215	23,0	6,3
	216	23,2	8,8
73	217	23,0	6,0
	218	23,1	7,1
	219	20,9	7,6
74	220	20,4	7,4
	221	20,9	8,3
	222	20,0	6,2

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
75	223	22,0	6,3
	224	22,5	7,2
	225	20,1	6,1
76	226	20,3	8,6
	227	23,5	8,3
	228	23,9	8,5
77	229	21,4	8,5
	230	23,7	7,1
	231	22,7	8,8
78	232	23,0	6,9
	233	23,1	6,2
	234	22,8	7,1
79	235	22,6	8,0
	236	21,0	7,2
	237	20,1	8,1
80	238	23,6	6,8
	239	24,0	7,0
	240	22,6	7,3
81	241	20,0	7,9
	242	23,3	7,0
	243	20,1	7,4
82	244	23,9	8,2
	245	20,5	6,6
	246	23,6	7,8
83	247	22,8	7,3
	248	21,9	8,4
	249	23,9	7,2
84	250	23,5	8,7
	251	23,0	7,8
	252	20,6	8,9
85	253	23,7	6,6
	254	21,2	7,4
	255	23,2	8,9

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
86	256	23,4	8,0
	257	23,0	8,0
	258	23,5	6,5
87	259	22,4	8,3
	260	20,2	7,7
	261	20,0	9,0
88	262	22,1	8,7
	263	23,3	8,4
	264	21,2	6,7
89	265	22,7	8,0
	266	22,6	7,3
	267	21,2	8,3
90	268	21,8	6,4
	269	20,9	7,9
	270	23,8	7,4
91	271	23,4	7,0
	272	21,4	8,1
	273	21,6	7,0
92	274	23,3	8,2
	275	21,1	8,8
	276	21,2	6,2
93	277	22,5	8,8
	278	23,8	6,0
	279	22,1	8,7
94	280	21,5	8,6
	281	22,9	8,0
	282	23,1	7,8
95	283	23,7	6,9
	284	21,4	7,2
	285	23,3	8,7
96	286	21,0	7,9
	287	23,7	6,9
	288	22,1	8,2

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
97	289	23,8	7,0
	290	22,4	8,9
	291	23,2	6,8
98	292	21,1	8,2
	293	20,2	7,3
	294	21,8	8,4
99	295	22,5	8,5
	296	23,1	6,7
	297	23,3	8,1
100	298	23,7	6,2
	299	22,0	6,2
	300	20,2	7,4
101	301	20,6	7,6
	302	23,4	6,8
	303	20,1	8,4
102	304	24,0	7,1
	305	22,5	8,7
	306	21,2	7,3
103	307	23,2	8,4
	308	21,5	7,7
	309	23,3	7,5
104	310	22,9	6,5
	311	20,8	7,5
	312	23,4	8,3
105	313	20,8	8,5
	314	22,9	7,4
	315	23,7	8,2
106	316	21,9	6,6
	317	22,4	6,9
	318	20,9	7,3
107	319	23,6	6,1
	320	21,1	6,3
	321	23,6	6,8

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
108	322	23,1	6,5
	323	23,7	6,3
	324	23,5	9,0
109	325	20,6	7,5
	326	23,4	6,7
	327	22,3	8,0
110	328	23,4	7,7
	329	21,6	6,2
	330	23,2	6,5
111	331	20,6	6,9
	332	20,8	8,5
	333	22,4	7,9
112	334	21,1	8,4
	335	23,8	6,4
	336	21,4	8,4
113	337	24,0	7,6
	338	23,7	8,2
	339	20,5	7,7
114	340	21,3	7,0
	341	21,5	6,7
	342	20,4	7,1
115	343	21,3	7,2
	344	23,0	7,3
	345	23,8	6,9
116	346	20,9	6,6
	347	21,2	7,1
	348	21,1	8,7
117	349	22,1	7,5
	350	21,7	8,2
	351	21,1	8,7
118	352	21,8	8,6
	353	21,9	6,6
	354	20,7	6,4

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
119	355	20,9	6,3
	356	23,7	6,1
	357	20,4	6,3
120	358	23,2	6,1
	359	20,4	6,0
	360	21,2	6,4
121	361	20,6	6,1
	362	22,9	6,1
	363	20,8	6,1
122	364	20,8	6,3
	365	20,8	6,1
	366	20,6	6,4
123	367	24,0	6,3
	368	23,5	6,1
	369	23,3	6,3
124	370	21,6	6,4
	371	21,6	6,2
	372	22,0	6,2
125	373	22,6	6,3
	374	20,0	6,1
	375	22,7	6,0
126	376	21,8	6,2
	377	22,9	6,0
	378	22,5	6,1
127	379	23,9	6,0
	380	21,8	6,3
	381	21,2	6,1
128	382	22,8	6,1
	383	20,6	6,4
	384	22,4	6,2
129	385	23,5	6,1
	386	21,1	6,2
	387	21,7	6,3

Tabla AIX.4. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 1 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 1		22±2 (°C)	6,2
Día	Medida	T (°C)	pH
130	388	23,1	6,3
	389	20,8	6,2
	390	22,8	6,1
131	391	21,5	6,1
	392	23,7	6,2
	393	23,0	6,3
132	394	22,2	6,2
	395	23,8	6,1
	396	20,9	6,3
133	397	23,4	6,2
	398	23,0	6,4
	399	22,2	6,3
134	400	23,3	6,3
	401	23,2	6,3
	402	23,7	6,2
135	403	21,7	6,0
	404	21,4	6,4
	405	23,9	6,1
136	406	23,8	6,2
	407	21,7	6,1
	408	22,4	6,4
137	409	21,3	6,3
	410	22,0	6,2
	411	22,8	6,3
138	412	23,9	6,4
	413	21,2	6,1
	414	23,8	6,2
139	415	23,2	6,2
	416	23,9	6,3
	417	21,4	6,2
140	418	22,2	6,2
	419	23,3	6,1
	420	22,4	6,1

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
1	1	21,5	6,5
	2	23,8	6,4
	3	20,6	6,1
2	4	22,3	6,0
	5	21,8	6,3
	6	22,2	6,2
3	7	22,3	6,0
	8	21,7	6,2
	9	21,6	6,1
4	10	22,5	6,0
	11	21,3	6,1
	12	22,1	6,3
5	13	21,3	6,3
	14	20,2	6,1
	15	21,9	6,1
6	16	22,0	6,2
	17	20,5	6,1
	18	23,6	6,4
7	19	21,3	6,4
	20	21,4	6,1
	21	20,1	6,3
8	22	23,4	6,1
	23	21,9	6,3
	24	21,6	6,1
9	25	24,0	6,0
	26	23,9	6,1
	27	22,8	6,0
10	28	20,2	6,3
	29	23,5	6,3
	30	20,9	6,3
11	31	20,6	6,1
	32	20,0	6,0
	33	22,1	6,4

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
12	34	20,4	6,4
	35	23,9	6,3
	36	21,0	6,3
13	37	23,1	6,0
	38	22,6	6,4
	39	22,1	6,2
14	40	20,3	6,2
	41	23,6	6,1
	42	20,9	6,2
15	43	21,4	6,0
	44	22,5	6,2
	45	21,0	6,2
16	46	20,6	6,4
	47	21,9	6,4
	48	23,9	6,3
17	49	20,8	6,3
	50	20,7	6,2
	51	22,2	6,2
18	52	20,7	6,2
	53	22,4	6,1
	54	20,6	6,4
19	55	20,3	6,3
	56	21,8	6,1
	57	20,1	6,0
20	58	22,9	6,2
	59	20,6	6,3
	60	22,7	6,3
21	61	21,1	6,1
	62	22,4	6,3
	63	20,4	6,2
22	64	22,6	6,4
	65	23,1	6,2
	66	20,2	6,0

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
23	67	23,6	6,3
	68	22,4	6,1
	69	22,5	6,0
24	70	23,3	6,0
	71	21,0	6,3
	72	20,2	6,1
25	73	22,6	6,3
	74	22,4	6,0
	75	23,6	6,4
26	76	21,8	6,0
	77	20,7	6,2
	78	22,1	6,2
27	79	23,3	6,3
	80	23,0	6,3
	81	21,0	6,3
28	82	23,8	6,4
	83	23,8	6,1
	84	22,9	6,3
29	85	20,1	6,1
	86	22,7	6,4
	87	22,5	6,3
30	88	22,3	6,2
	89	20,0	6,3
	90	22,1	6,1
31	91	20,1	7,4
	92	23,4	9,0
	93	21,1	8,1
32	94	21,5	8,4
	95	21,2	7,8
	96	23,8	8,2
33	97	22,7	8,1
	98	22,9	7,6
	99	20,0	7,0

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
34	100	21,6	7,2
	101	21,9	7,3
	102	22,5	7,2
35	103	22,8	8,2
	104	22,1	8,2
	105	21,0	6,5
36	106	23,5	7,6
	107	22,8	7,3
	108	20,8	6,6
37	109	23,1	8,9
	110	20,1	6,5
	111	21,9	8,6
38	112	22,2	7,1
	113	23,3	7,9
	114	20,3	6,9
39	115	23,1	8,9
	116	22,5	7,7
	117	21,4	7,1
40	118	23,6	6,3
	119	20,3	6,9
	120	22,4	8,2
41	121	23,4	6,8
	122	23,5	7,9
	123	22,3	7,8
42	124	21,3	8,1
	125	23,6	8,8
	126	20,3	8,1
43	127	23,0	8,7
	128	23,7	7,5
	129	20,8	8,0
44	130	22,2	7,1
	131	23,1	6,6
	132	20,5	8,7

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
45	133	20,4	8,6
	134	20,4	8,5
	135	20,7	8,6
46	136	22,2	7,5
	137	21,2	6,6
	138	21,9	6,4
47	139	21,1	6,8
	140	23,9	7,2
	141	22,3	8,9
48	142	22,0	7,7
	143	22,1	8,3
	144	21,0	8,9
49	145	23,4	8,0
	146	23,3	8,5
	147	21,1	7,0
50	148	22,1	6,3
	149	21,3	7,4
	150	23,4	6,3
51	151	23,5	7,9
	152	21,9	6,6
	153	22,9	7,2
52	154	21,2	6,3
	155	21,9	7,8
	156	21,6	6,9
53	157	21,4	6,2
	158	21,9	7,0
	159	23,0	8,9
54	160	21,5	8,1
	161	23,3	7,1
	162	22,8	7,0
55	163	20,9	7,4
	164	23,6	8,6
	165	22,1	6,0

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
56	166	20,4	6,8
	167	22,3	8,7
	168	21,4	8,4
57	169	23,6	7,7
	170	23,9	9,0
	171	21,4	8,3
58	172	20,3	7,9
	173	22,8	7,2
	174	22,5	6,9
59	175	20,4	7,8
	176	23,7	6,4
	177	22,9	8,4
60	178	23,9	6,3
	179	21,0	6,6
	180	20,6	7,7
61	181	22,5	7,9
	182	21,6	6,8
	183	23,6	6,3
62	184	20,8	6,5
	185	21,3	8,1
	186	22,5	7,8
63	187	20,1	6,6
	188	20,8	7,7
	189	21,7	8,5
64	190	21,3	6,4
	191	20,1	8,3
	192	20,1	6,7
65	193	23,2	7,3
	194	22,1	6,2
	195	23,0	8,0
66	196	23,5	7,5
	197	23,3	7,7
	198	23,5	6,4

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
67	199	23,9	7,0
	200	20,6	8,8
	201	22,9	7,3
68	202	22,2	7,9
	203	23,4	7,7
	204	22,1	6,4
69	205	21,5	8,8
	206	22,2	7,0
	207	21,1	8,4
70	208	22,8	7,2
	209	24,0	8,2
	210	23,7	6,9
71	211	20,8	8,9
	212	23,1	7,9
	213	22,2	8,3
72	214	22,2	8,2
	215	23,9	6,8
	216	23,9	7,7
73	217	22,1	6,1
	218	23,5	8,3
	219	22,4	8,8
74	220	23,8	6,2
	221	20,9	7,7
	222	22,0	6,9
75	223	23,8	6,4
	224	20,8	6,5
	225	20,9	8,5
76	226	21,3	8,3
	227	22,6	6,5
	228	22,0	6,6
77	229	21,5	6,2
	230	22,4	6,1
	231	21,6	8,7

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
78	232	24,0	8,8
	233	20,6	7,4
	234	21,8	8,1
79	235	23,7	8,8
	236	22,5	7,3
	237	22,2	6,4
80	238	22,2	6,0
	239	22,7	7,8
	240	22,4	6,9
81	241	21,5	9,0
	242	22,2	8,9
	243	22,6	6,3
82	244	21,8	6,9
	245	22,6	7,9
	246	23,3	7,7
83	247	21,9	6,7
	248	21,2	7,1
	249	22,6	7,8
84	250	21,0	8,1
	251	22,7	7,4
	252	24,0	7,7
85	253	21,1	8,4
	254	20,7	7,0
	255	21,7	7,8
86	256	22,8	7,4
	257	23,6	8,1
	258	23,5	7,8
87	259	21,7	8,8
	260	22,1	7,1
	261	23,1	7,6
88	262	20,5	7,6
	263	21,6	6,4
	264	23,7	8,3

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
89	265	23,1	7,4
	266	21,6	7,5
	267	20,6	7,7
90	268	21,1	6,3
	269	21,2	8,6
	270	20,4	6,6
91	271	20,6	8,4
	272	22,8	8,1
	273	20,7	8,4
92	274	21,2	7,9
	275	23,6	7,2
	276	22,0	7,7
93	277	22,2	7,0
	278	21,2	8,5
	279	23,3	7,0
94	280	20,4	7,4
	281	20,1	6,0
	282	22,1	8,9
95	283	21,1	7,4
	284	20,7	6,1
	285	21,9	9,0
96	286	20,6	6,3
	287	21,0	6,9
	288	23,9	8,3
97	289	23,2	6,5
	290	23,9	7,1
	291	22,9	6,1
98	292	21,9	7,6
	293	23,5	6,6
	294	20,7	7,7
99	295	23,1	8,8
	296	23,8	7,2
	297	21,9	6,1

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
100	298	20,7	6,7
	299	23,9	8,9
	300	21,7	8,7
101	301	21,4	7,5
	302	22,3	6,6
	303	20,2	8,2
102	304	20,4	6,0
	305	23,5	7,1
	306	21,0	6,4
103	307	20,2	7,8
	308	22,1	7,3
	309	22,1	6,6
104	310	21,1	7,5
	311	20,8	8,4
	312	20,8	7,0
105	313	23,7	6,5
	314	21,5	8,3
	315	23,9	6,9
106	316	23,9	6,0
	317	23,3	7,5
	318	21,2	7,9
107	319	22,6	8,5
	320	21,3	6,3
	321	20,7	7,5
108	322	22,8	8,8
	323	21,3	8,4
	324	21,0	8,0
109	325	20,6	9,0
	326	22,6	6,3
	327	20,8	7,6
110	328	20,8	8,9
	329	21,3	6,5
	330	21,4	6,9

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
111	331	23,8	8,5
	332	20,5	7,5
	333	21,2	6,5
112	334	22,6	7,1
	335	23,8	7,8
	336	21,1	7,3
113	337	21,2	7,6
	338	20,5	8,2
	339	23,5	7,2
114	340	20,3	6,1
	341	21,8	7,4
	342	21,3	8,9
115	343	21,3	6,2
	344	23,0	6,0
	345	23,8	6,3
116	346	20,9	6,3
	347	21,2	6,3
	348	21,1	6,1
117	349	22,1	6,1
	350	21,7	6,2
	351	21,1	6,1
118	352	21,8	6,3
	353	21,9	6,3
	354	20,7	6,0
119	355	20,9	6,0
	356	23,7	6,3
	357	20,4	6,3
120	358	23,2	6,2
	359	20,4	6,2
	360	21,2	6,1
121	361	20,6	6,2
	362	22,9	6,4
	363	20,8	6,4

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
122	364	20,8	6,0
	365	20,8	6,2
	366	20,6	6,4
123	367	24,0	6,1
	368	23,5	6,4
	369	23,3	6,1
124	370	21,6	6,1
	371	21,6	6,0
	372	22,0	6,2
125	373	22,6	6,2
	374	20,0	6,1
	375	22,7	6,0
126	376	21,8	6,1
	377	22,9	6,0
	378	22,5	6,2
127	379	23,9	6,1
	380	21,8	6,4
	381	21,2	6,3
128	382	22,8	6,1
	383	20,6	6,3
	384	22,4	6,1
129	385	23,5	6,4
	386	21,1	6,3
	387	21,7	6,3
130	388	23,1	6,2
	389	20,8	6,1
	390	22,8	6,4
131	391	21,5	6,1
	392	23,7	6,2
	393	23,0	6,4
132	394	22,2	6,1
	395	23,8	6,1
	396	20,9	6,0

Tabla AIX.5. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 2 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 2		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
133	397	23,4	6,2
	398	23,0	6,2
	399	22,2	6,1
134	400	23,3	6,2
	401	23,2	6,2
	402	23,7	6,1
135	403	21,7	6,2
	404	21,4	6,1
	405	23,9	6,1
136	406	23,8	6,0
	407	21,7	6,1
	408	22,4	6,3
137	409	21,3	6,3
	410	22,0	6,2
	411	22,8	6,4
138	412	23,9	6,0
	413	21,2	6,2
	414	23,8	6,0
139	415	23,2	6,3
	416	23,9	6,1
	417	21,4	6,2
140	418	22,2	6,1
	419	23,3	6,2
	420	22,4	6,0

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
1	1	21,5	6,3
	2	23,8	6,4
	3	20,6	6,2

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
2	4	22,3	6,4
	5	21,8	6,4
	6	22,2	6,2
3	7	22,3	6,3
	8	21,7	6,4
	9	21,6	6,4
4	10	22,5	6,1
	11	21,3	6,2
	12	22,1	6,3
5	13	21,3	6,2
	14	20,2	6,2
	15	21,9	6,1
6	16	22,0	6,1
	17	20,5	6,2
	18	23,6	6,2
7	19	21,3	6,0
	20	21,4	6,2
	21	20,1	6,1
8	22	23,4	6,2
	23	21,9	6,2
	24	21,6	6,1
9	25	24,0	6,0
	26	23,9	6,2
	27	22,8	6,4
10	28	20,2	6,1
	29	23,5	6,2
	30	20,9	6,3
11	31	20,6	6,3
	32	20,0	6,4
	33	22,1	6,3
12	34	20,4	6,0
	35	23,9	6,3
	36	21,0	6,2

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
13	37	23,1	6,1
	38	22,6	6,4
	39	22,1	6,4
14	40	20,3	6,3
	41	23,6	6,2
	42	20,9	6,2
15	43	21,4	6,2
	44	22,5	6,1
	45	21,0	6,2
16	46	20,6	6,1
	47	21,9	6,0
	48	23,9	6,2
17	49	20,8	6,1
	50	20,7	6,3
	51	22,2	6,1
18	52	20,7	6,3
	53	22,4	6,1
	54	20,6	6,4
19	55	20,3	6,2
	56	21,8	6,0
	57	20,1	6,0
20	58	22,9	6,3
	59	20,6	6,2
	60	22,7	6,1
21	61	21,1	6,2
	62	22,4	6,1
	63	20,4	6,4
22	64	22,6	6,0
	65	23,1	6,0
	66	20,2	6,2
23	67	23,6	6,1
	68	22,4	6,3
	69	22,5	6,1

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
24	70	23,3	6,3
	71	21,0	6,3
	72	20,2	6,4
25	73	22,6	6,0
	74	22,4	6,0
	75	23,6	6,1
26	76	21,8	6,2
	77	20,7	6,3
	78	22,1	6,1
27	79	23,3	6,3
	80	23,0	6,0
	81	21,0	6,2
28	82	23,8	6,4
	83	23,8	6,2
	84	22,9	6,3
29	85	20,1	6,0
	86	22,7	6,0
	87	22,5	6,3
30	88	22,3	6,2
	89	20,0	6,0
	90	22,1	6,0
31	91	21,9	8,9
	92	20,1	8,3
	93	22,8	6,4
32	94	24,0	8,9
	95	23,3	6,2
	96	22,4	6,7
33	97	23,8	7,1
	98	20,1	8,8
	99	23,5	6,8
34	100	21,2	6,4
	101	21,0	6,8
	102	21,6	6,2

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
35	103	21,4	8,3
	104	21,7	8,4
	105	21,2	6,1
36	106	20,8	7,1
	107	20,7	6,4
	108	21,7	6,6
37	109	20,8	7,3
	110	20,8	6,2
	111	23,9	7,4
38	112	23,7	6,7
	113	23,9	8,6
	114	21,3	8,2
39	115	24,0	8,5
	116	23,2	8,8
	117	23,6	7,8
40	118	20,6	7,1
	119	22,5	7,2
	120	20,6	7,2
41	121	22,4	8,9
	122	20,0	6,7
	123	23,1	7,1
42	124	23,3	7,0
	125	22,7	8,8
	126	22,8	8,4
43	127	22,6	7,6
	128	21,5	8,5
	129	21,3	6,7
44	130	22,3	7,5
	131	23,7	6,8
	132	22,6	6,2
45	133	21,6	8,6
	134	23,3	6,4
	135	22,1	6,5

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
46	136	20,9	7,5
	137	21,6	8,0
	138	22,5	6,6
47	139	22,3	7,1
	140	21,3	7,0
	141	23,4	6,0
48	142	23,6	8,1
	143	21,5	8,8
	144	24,0	8,3
49	145	23,5	8,9
	146	20,4	6,7
	147	22,9	6,9
50	148	22,3	7,3
	149	22,1	6,8
	150	21,1	8,0
51	151	21,9	7,5
	152	22,9	8,0
	153	21,8	6,5
52	154	23,1	8,6
	155	23,2	7,5
	156	23,5	8,5
53	157	23,7	7,8
	158	21,2	6,8
	159	22,0	8,6
54	160	20,6	6,6
	161	20,1	6,4
	162	21,6	8,4
55	163	22,7	8,3
	164	23,5	6,6
	165	21,4	7,1
56	166	22,5	6,2
	167	23,3	6,2
	168	22,6	7,3

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
57	169	20,1	7,8
	170	23,5	8,2
	171	20,6	6,8
58	172	20,1	7,6
	173	20,5	8,0
	174	22,4	8,8
59	175	21,2	6,2
	176	22,5	8,2
	177	21,5	7,1
60	178	21,4	8,4
	179	22,0	6,1
	180	21,6	8,1
61	181	22,8	6,1
	182	20,5	6,1
	183	21,2	6,2
62	184	23,1	7,2
	185	22,3	8,5
	186	23,3	6,7
63	187	20,2	7,3
	188	22,0	7,0
	189	20,4	6,2
64	190	20,8	6,2
	191	23,4	8,6
	192	23,3	7,4
65	193	21,5	6,5
	194	20,3	6,2
	195	21,0	6,5
66	196	21,6	6,3
	197	20,8	6,6
	198	20,7	6,1
67	199	22,9	7,4
	200	23,4	6,2
	201	22,3	7,0

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
68	202	20,2	8,7
	203	21,1	7,7
	204	22,1	6,9
69	205	22,5	7,2
	206	21,7	8,9
	207	22,6	7,6
70	208	20,4	8,0
	209	20,5	7,0
	210	22,3	7,2
71	211	23,7	8,1
	212	21,6	6,6
	213	22,2	6,3
72	214	20,3	6,7
	215	24,0	9,0
	216	23,3	7,3
73	217	21,9	7,5
	218	22,1	6,3
	219	20,1	7,7
74	220	21,7	6,7
	221	23,8	8,0
	222	21,8	8,1
75	223	22,0	6,6
	224	23,3	7,3
	225	22,4	6,8
76	226	22,6	7,4
	227	22,8	7,9
	228	23,9	6,4
77	229	22,8	8,8
	230	23,0	7,4
	231	22,0	7,9
78	232	23,5	6,5
	233	23,0	7,9
	234	21,2	6,7

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
79	235	22,5	7,6
	236	22,0	7,6
	237	20,1	8,9
80	238	22,2	8,6
	239	21,4	8,7
	240	21,2	7,7
81	241	21,1	8,6
	242	23,8	8,5
	243	22,1	7,5
82	244	22,5	8,8
	245	20,0	8,6
	246	22,6	8,7
83	247	21,3	6,4
	248	23,7	6,3
	249	23,0	7,7
84	250	22,3	8,7
	251	23,5	7,5
	252	21,7	6,6
85	253	20,9	8,3
	254	22,5	7,7
	255	23,3	8,0
86	256	22,6	8,1
	257	21,5	8,9
	258	22,5	7,1
87	259	21,5	7,5
	260	21,7	8,9
	261	23,9	7,7
88	262	22,5	6,1
	263	23,6	7,8
	264	20,1	7,5
89	265	23,8	8,2
	266	20,0	6,8
	267	21,7	7,4

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
90	268	21,5	6,8
	269	20,1	7,8
	270	20,7	6,0
91	271	21,4	8,4
	272	23,6	8,5
	273	21,2	8,3
92	274	20,9	8,9
	275	20,4	6,8
	276	22,2	6,8
93	277	20,9	7,8
	278	22,4	6,8
	279	20,2	9,0
94	280	21,7	7,5
	281	23,3	6,4
	282	20,1	6,7
95	283	20,6	6,4
	284	21,6	8,4
	285	23,7	9,0
96	286	22,0	6,3
	287	23,3	8,6
	288	23,3	7,4
97	289	21,4	8,3
	290	23,4	7,8
	291	20,3	6,5
98	292	22,3	6,9
	293	22,5	8,3
	294	22,7	6,0
99	295	22,6	7,9
	296	21,3	8,2
	297	23,4	6,9
100	298	22,4	7,1
	299	23,0	7,1
	300	22,3	8,8

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
101	301	22,1	8,3
	302	23,2	6,9
	303	22,6	8,8
102	304	20,3	8,9
	305	20,1	7,0
	306	21,1	8,2
103	307	20,2	8,5
	308	22,5	7,0
	309	21,5	7,0
104	310	21,8	7,2
	311	21,1	7,1
	312	22,3	6,6
105	313	21,3	8,9
	314	20,8	7,8
	315	23,5	6,4
106	316	23,1	8,6
	317	22,1	8,3
	318	23,1	6,4
107	319	20,8	8,1
	320	22,6	7,9
	321	21,9	8,8
108	322	20,4	8,9
	323	22,6	6,7
	324	22,8	6,3
109	325	21,1	7,8
	326	22,7	7,2
	327	20,9	8,8
110	328	23,9	6,3
	329	22,1	7,6
	330	23,5	7,8
111	331	20,7	8,3
	332	23,7	6,5
	333	21,4	9,0

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
112	334	21,1	6,2
	335	23,8	6,3
	336	21,4	6,4
113	337	24,0	6,1
	338	23,7	6,1
	339	20,5	6,0
114	340	21,3	6,2
	341	21,5	6,1
	342	20,4	6,2
115	343	21,3	6,0
	344	23,0	6,1
	345	23,8	6,1
116	346	20,9	6,3
	347	21,2	6,2
	348	21,1	6,3
117	349	22,1	6,1
	350	21,7	6,2
	351	21,1	6,2
118	352	21,8	6,3
	353	21,9	6,0
	354	20,7	6,1
119	355	20,9	6,2
	356	23,7	6,2
	357	20,4	6,2
120	358	23,2	6,2
	359	20,4	6,2
	360	21,2	6,2
121	361	20,6	6,1
	362	22,9	6,1
	363	20,8	6,0
122	364	20,8	6,1
	365	20,8	6,0
	366	20,6	6,3

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (continuación...)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
123	367	24,0	6,1
	368	23,5	6,2
	369	23,3	6,4
124	370	21,6	6,2
	371	21,6	6,3
	372	22,0	6,1
125	373	22,6	6,3
	374	20,0	6,1
	375	22,7	6,2
126	376	21,8	6,0
	377	22,9	6,2
	378	22,5	6,3
127	379	23,9	6,3
	380	21,8	6,3
	381	21,2	6,0
128	382	22,8	6,2
	383	20,6	6,2
	384	22,4	6,1
129	385	23,5	6,4
	386	21,1	6,3
	387	21,7	6,3
130	388	23,1	6,4
	389	20,8	6,1
	390	22,8	6,4
131	391	21,5	6,3
	392	23,7	6,4
	393	23,0	6,2
132	394	22,2	6,0
	395	23,8	6,4
	396	20,9	6,1
133	397	23,4	6,4
	398	23,0	6,1
	399	22,2	6,1

Tabla AIX.6. Condiciones de operación de biorreactor anaerobio 3 (**continuación...**)

Condiciones de operación biorreactor anaerobio 3		22±2 (°C)	6,4
Día	Medida	T (°C)	pH
134	400	23,3	6,1
	401	23,2	6,3
	402	23,7	6,3
135	403	21,7	6,2
	404	21,4	6,2
	405	23,9	6,1
136	406	23,8	6,1
	407	21,7	6,2
	408	22,4	6,2
137	409	21,3	6,3
	410	22,0	6,2
	411	22,8	6,1
138	412	23,9	6,0
	413	21,2	6,0
	414	23,8	6,3
139	415	22,3	8,3
	416	21,3	7,8
	417	20,9	7,9
140	418	21,7	8,8
	419	20,9	8,0
	420	23,9	8,3

ANEXO X

BALANCE DE MASA DE LOS REACTORES AEROBIOS Y ANAEROBIOS

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el Preinóculo aerobio

Agua + aceite + bacterias = Preinóculo aerobio

$$\left[1\,000\text{ mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{agua}} + \left[10\text{ mg} \times \frac{1\text{ g}}{1\,000\text{ mg}}\right]_{\text{aceite}} + \left[0,036\frac{\text{g}}{\text{L}} \times 1\text{L}\right]_{\text{bacterias}} = \text{Preinóculo aerobio}$$

Preinóculo aerobio = 1 000,046 g

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el Preinóculo anaerobio

Agua + aceite + bacterias = Preinóculo anaerobio

$$\left[1\,000\text{ mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{agua}} + \left[10\text{ mg} \times \frac{1\text{ g}}{1\,000\text{ mg}}\right]_{\text{ac}} + \left[0,0012\frac{\text{g}}{\text{L}} \times 1\text{L}\right]_{\text{bact}} = \text{Preinóculo anerob}$$

Preinóculo anaerobio = 1 000,011 g

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el Inóculo aerobio

Agua + aceite + preinóculo = Inóculo

$$\left[1000\text{ ml} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{agua}} + \left[10\text{ mg} \times \frac{1\text{ g}}{1\,000\text{ mg}}\right]_{\text{aceite}} + \left[10\text{ mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{prein}} = \text{Inóculo aerobio}$$

Inóculo aerobio = 1 010,010g

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el Inóculo anaerobio

Agua + aceite + preinóculo = Inóculo anaerobio

$$\left[1\,000\text{ mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{agua}} + \left[10\text{ mg} \times \frac{1\text{ g}}{1\,000\text{ mg}}\right]_{\text{aceite}} + \left[10\text{ mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{preinóculo}} = \text{Inóculo}$$

$$\text{Inóculo} = 1\,010,010\text{ g}$$

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el reactor aerobio

Agua + aceite + inóculo = masa total reactor aerobio

$$\left[2\,000\text{ mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{agua}} + \left[20\text{ mg} \times \frac{1\text{ g}}{1\,000\text{ mg}}\right]_{\text{aceite}} + \left[20\text{ mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{inóculo}} = \text{masa r. aerobio}$$

$$\text{masa total reactor aerobio} = 2\,020,020\text{ g}$$

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el reactor anaerobio Inicial

Agua + metanol + tween 80 + aceite + inóculo = m inicial reactor aer

$$\left[3\,000\text{ mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{ag}} + [3,003\text{ g}]_{\text{met}} + [38,4\text{ g}]_{\text{tw}} + [38,4\text{ g}]_{\text{ac}} + [2,1\text{ g}]_{\text{org}} = \text{masa r. aerobio}$$

$$\text{masa inicial reactor anaerobio} = 3\,081,903\text{ g}$$

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el reactor anaerobio Final

carga inicial + tasa de carga diaria = m final reactor anaerobio

$$3\,081,903 + \left[0,20 \frac{g}{L \times día} \times 20 \text{ sem} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ sem}} \times 3L\right] = \text{masa final reactor aerobio}$$

$$\text{masa final reactor anaerobio} = 3\,081,903 + 84$$

$$\text{masa final reactor anaerobio} = 3\,165,903 \text{ g}$$

Ejemplo de cálculo empleado para obtener el consumo de ácido clorhídrico y sosa cáustica (reguladores de pH)

Como ejemplo se realizará el cálculo para el biorreactor aerobio 2, que posee mayor remoción de contaminantes en el cual se ha empleado una cantidad de 20 mg de aceite dieléctrico; diariamente se obtuvo un gasto de 10 gotas promedio de agentes reguladores de pH en los monitoreos diarios.

Tal es el caso que para el ácido clorhídrico se regula el pH con 6 gotas y con sosa cáustica de 4 gotas, esta diferencia se debió a la poca variación de pH en los sistemas. Cada gota tiene un volumen de 0,05 mL, con lo que se obtiene un gasto de 0,20 mL de ácido clorhídrico y 0,30 mL de sosa cáustica por día.

Durante todo el proceso del reactor aerobio 2, se ha gastado:

- Sosa cáustica

$$V_{total} = \frac{0,20 \text{ mL sosa}}{día} \times 15 \text{ sem} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} = 21 \text{ mL}$$

- Ácido clorhídrico

$$V_{total} = \frac{0,30 \text{ mL ácido}}{día} \times 15 \text{ sem} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} = 31,500 \text{ mL}$$

Llevado el proceso a **escala piloto** se tiene un gasto de :

- Sosa cáustica

$$V_{total} = \frac{0,20 \text{ mL sosa}}{2 \text{ L mezcla} \times \text{día}} \times 20 \text{ L} \times 15 \text{ sem} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} = 210 \text{ mL}$$

- Ácido clorhídrico

$$V_{total} = \frac{0,30 \text{ mL ácido}}{2 \text{ L mezcla} \times \text{día}} \times 20 \text{ L} \times 15 \text{ sem} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} = 315 \text{ mL}$$

Llevado el proceso a **escala industrial** con volumen de reactor de 10 m³ se tiene un gasto de :

- Sosa cáustica

$$V_{total} = \frac{0,20 \text{ mL sosa}}{2 \text{ L mezcla} \times \text{día}} \times 10\,000 \text{ L} \times 15 \text{ sem} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} = 105 \text{ L sosa}$$

$$V_{total} \text{ de sosa cáustica} = 27,730 \text{ gal}$$

- Ácido clorhídrico

$$V_{total} = \frac{0,30 \text{ mL ácido}}{2 \text{ L mezcla} \times \text{día}} \times 10\,000 \text{ L} \times 15 \text{ sem} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} = 157 \text{ L ácido}$$

$$V_{total} \text{ de ácido clorhídrico} = 41,600 \text{ gal}$$

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el reactor aerobio 2 a escala de laboratorio en las 15 semanas de experimentación

El balance total de masa realizado para los reactores aerobios, más la adición de las sustancias reguladoras de pH, será:

$$masa = 2\,020,020\text{ g} + \left(21\text{ mL sosa} \times \frac{2,13\text{ g}}{\text{mL}}\right) + \left(31,5\text{ ml ácido} \times \frac{1,19\text{ g}}{\text{mL}}\right)$$

$$masa = 2\,020,020\text{ g} + (44,73\text{ g}) + (37,48\text{ g})$$

$$masa\text{ reactor aerobio a escala de laboratorio} = 2\,102,235\text{ g}$$

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el reactor aerobio 2 a escala piloto en las 15 semanas de experimentación

Agua + aceite + inóculo = masa reactor aerobio a escala piloto

$$masa = \left[20\,000\text{mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{agua}} + \left[200\text{ mg} \times \frac{1\text{ g}}{1\,000\text{ mg}}\right]_{\text{ac}} + \left[200\text{ mL} \times \frac{1\text{ g}}{\text{mL}}\right]_{\text{inóculo}}$$

$$masa = 20\,000 + 0,2 + 200 = 20\,200,200\text{ g}$$

Tomando en cuenta las adiciones de las sustancias reguladoras de pH se tuvo:

$$masa\text{ reactor aerobio} = 20\,200,2\text{ g} + \left(210\text{ mL} \times \frac{2,13\text{ g}}{\text{mL}}\right) + \left(315\text{ mL} \times \frac{1,19\text{ g}}{\text{mL}}\right)$$

$$masa\text{ reactor aerobio a escala piloto} = 21\,022,350\text{ g}$$

Ejemplo de cálculo para realizar el balance de masa para el reactor aerobio 2 a escala industrial en las 15 semanas de experimentación

Agua + aceite + inóculo = masa reactor aerobio a escala industrial

$$masa = \left[10\,000\,000 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ g}}{\text{mL}} \right]_{ag} + \left[100\,000 \text{ mg} \times \frac{1 \text{ g}}{1\,000 \text{ mg}} \right]_{ac} + \left[100\,000 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ g}}{\text{mL}} \right]_{in\acute{o}culo}$$

$$masa \text{ reactor aerobio} = 10\,000\,000 + 100 + 100\,000 = 10\,100\,100 \text{ g}$$

Tomando en cuenta las adiciones de las sustancias reguladoras de pH se tuvo:

$$masa \text{ reactor aerobio} = 10\,100\,100 \text{ g} + \left(105 \text{ L} \times \frac{2130 \text{ g}}{\text{L}} \right) + \left(157,5 \text{ L} \times \frac{1190 \text{ g}}{\text{L}} \right)$$

$$masa \text{ reactor aerobio a escala industrial} = 10\,511\,175 \text{ g}$$

ANEXO XI

HOJA DE ESPECIFICACIÓN DEL TANQUE DE BIODEGRADACIÓN AEROBIA

Tabla XI.1. Hoja de especificación del tanque para biodegradación aerobia a escala piloto

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 1													
Nombre del Equipo:	Biorreactor Aerobio												
Identificación:	BAE-102												
Fabricación:	Fabricante: Fabricación Nacional Número de equipos: 1												
Función:	Biodegradación de compuestos con microorganismos bajo condiciones específicas de temperatura, presión y pH. Permite agitación y mezcla de líquido												
Tipo de operación:	Batch												
Datos de diseño	Dimensiones: Diámetro [m]: 0,234 Altura [m]: 0,467 Volumen [L]: 20 Tanque de presión [MPa]: 0,25 – 0,5 Condiciones de operación: Potencia de motor [kW]: 7,5 Agitación [rpm]: 85												
Material de fabricación:	Acero inoxidable AISI 314												
Esquema del equipo:													
<table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">H</td> <td style="padding: 2px;">0,467 m</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Da</td> <td style="padding: 2px;">0,078 m</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">D</td> <td style="padding: 2px;">0,234 m</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">E</td> <td style="padding: 2px;">0,234 m</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">W</td> <td style="padding: 2px;">0,047 m</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">L</td> <td style="padding: 2px;">0,058 m</td> </tr> </tbody> </table>		H	0,467 m	Da	0,078 m	D	0,234 m	E	0,234 m	W	0,047 m	L	0,058 m
H	0,467 m												
Da	0,078 m												
D	0,234 m												
E	0,234 m												
W	0,047 m												
L	0,058 m												

ANEXO XII

CÁLCULOS Y CRITERIOS EMPLEADOS EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS SISTEMAS DE BIODEGRADACIÓN

El dimensionamiento de la planta de biorremediación de aceites dieléctricos con PCB's se lo hizo en función de las áreas que se requieren para todo el proceso. El proyecto tendrá un área de recepción del aceite dieléctrico, área de degradación (conformada por un cuarto de controles y una bodega de almacenamiento) y una área administrativa. El área total del proyecto es 302,61 m². A continuación se describe cada área:

- **Área administrativa**

En la que se tomó en cuenta oficinas, baterías sanitarias, y el espacio necesario para el personal que no opera dentro de planta.

- **Área de recepción**

Este espacio está orientado a la recepción de la materia prima o aceite dieléctrico, se tomó en cuenta la dimensión de furgones que llegarán con tanques metálicos de capacidad de 55 galones que contendrán el aceite. Por lo que la longitud total de la planta será 23,55 m con un ancho de 3,5 m en función de las dimensiones de los furgones de 5 toneladas de capacidad. También se recibirá los insumos requeridos para el proceso: sosa caustica y ácido clorhídrico.

- **Área de degradación**

El área es de 134,27 m². Aquí se llevará a cabo el proceso de biodegradación de aceites dieléctricos con PCB's, la dimensión del espacio de degradación será de 4.85 m de ancho y 19.85 m de largo. La superficie se determinó en función de las

dimensiones de los equipos que intervienen en el proceso, estos son: biorreactor (D = 1,85 m y L = 3,7 m) y compresor.

Se tomó en cuenta la distancia requerida entre equipos, según las Directrices GAPS en la Figura A.XII.1. se puede observar que la distancia entre un reactor y un compresor debe ser de 50 pies, equivalente a 15 m.

Dentro de este espacio también se encuentra un cuarto de controles de dimensiones: largo 6 m y ancho 3 m. La bodega para almacenamiento de: sosa caustica, ácido clorhídrico y aceite dieléctrico tendrá 5 m de largo y 4 m de ancho.

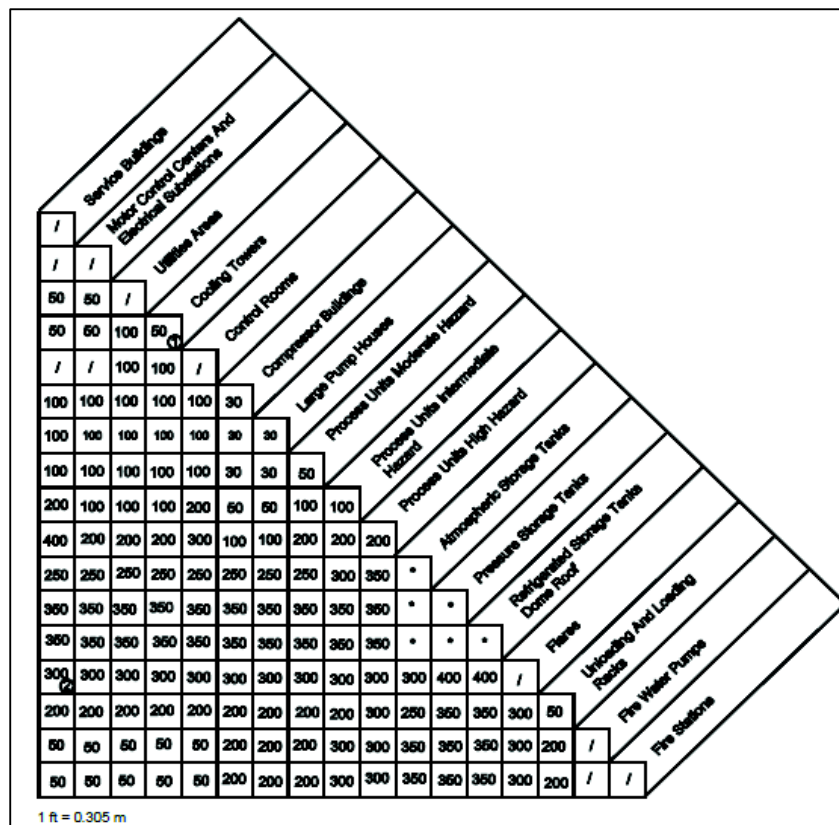


Figura AXII. 1. Espacios recomendados para plantas químicas (Directrices GAPS, 2008, p. 4).