

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

DEGRADACIÓN DE KETOPROFENO MEDIANTE FOTOCATÁLISIS
HETEROGÉNEA

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Técnico Universitario en
QUIMICA CON MENCIÓN EN
QUÍMICA ANALÍTICA

Alumno:

Daniel Andrés Núñez Vistoso

Profesores Guías:

Mario Ollino Órdenes

*Dedicada a mi familia,
especialmente a mi Papá que con su
incansable esfuerzo y preocupación,
lo dio todo para mi bienestar y
felicidad. ¡Gracias Papá!*

“Todo lo puedo en Cristo

Que me fortalece...”

Filipenses 4:13

RESUMEN

KEYWORDS: ANTIINFLAMATORIO – FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA – FÁRMACOS – KETOPROFENO

Se considera que en un futuro cercano la contaminación del agua por vertimiento de residuos farmacéuticos puede llegar a ser un peligro grave para el desarrollo del ecosistema.

El ketoprofeno es un antiinflamatorio no esteroideo, que se manifiesta en el organismo a través de la inhibición de la actividad de la enzima ciclooxygenasa, provocando una disminución de la formación de precursores de las prostaglandinas y de los tromboxanos a partir del ácido araquidónico.

El siguiente trabajo tiene por objetivo analizar la eficiencia de la degradación de ketoprofeno disuelto en solución acuosa. Los experimentos se realizaron en fotorreactores tipo columna diseñados en la UTFSM. Los objetivos generales de este estudio fueron:

- a. Establecer la factibilidad de degradar fotocatalíticamente el antiinflamatorio ketoprofeno desde soluciones acuosas, usando ya sea el semiconductor irradiado dióxido de titanio (TiO_2), o el semiconductor irradiado óxido de zinc (ZnO).
- b. Evaluar el impacto que tienen en la eficiencia de la fotocátalisis las siguientes condiciones de operación:
 - pH de la solución.
 - Presencia de otros agentes oxidantes (peróxido de hidrógeno, aire, oxígeno puro).
- c. Establecer la factibilidad de degradar vía ozonación el antiinflamatorio ketoprofeno desde soluciones acuosas.
 - Evaluar la influencia que la irradiación UV-C pueda tener en la eficiencia del proceso de ozonación.
- d. Establecer el grado de adsorción de ketoprofeno en la superficie de los semiconductores TiO_2 y ZnO .

El trabajo de prospección realizado para degradar ketoprofeno desde soluciones acuosas en concentración aproximada de 10 [ppm], preparadas desde el fármaco comercial disponible en Chile, condujo a la conclusión que la fotocátalisis permite abatir este fármaco en un período de dos horas hasta nivel de trazas. Por otra parte, la

ozonación también es una alternativa interesante, ya que permite degradar el ketoprofeno en tiempos de sólo 50 minutos.

ÍNDICE

RESUMEN

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTO TEÓRICO

- 1.1. EL AGUA: UN RECURSO INDISPENSABLE
- 1.2. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES
 - 1.2.1. Función del agua en los procesos industriales
 - 1.2.2. Clasificación de los RILES
 - 1.2.3. Disposición final de los RILES
- 1.3. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES
- 1.4. CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR VERTIMIENTO DE RESIDUOS FARMACÉUTICOS
 - 1.4.1. Fuentes de generación de residuos farmacéuticos
- 1.5. KETOPROFENO
 - 1.5.1. Biocinética
- 1.6. METODOS DE OXIDACIÓN AVANZADOS
- 1.7. PROPIEDADES DEL DIÓXIDO DE TITANIO Y ÓXIDO DE ZINC
- 1.8. FUNDAMENTO DE TRABAJO CON AMBOS FOTOCATALIZADORES

CAPÍTULO 2 PARTE EXPERIMENTAL

- 2.1. ANTECEDENTES.
- 2.2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO FOTOQUÍMICO
- 2.3. LIMPIEZA Y MANTENCIÓN DEL FOTORREACTOR
- 2.4. RECUBRIMIENTO DE LOS ANILLOS RASCHIG CON DIÓXIDO DE TITANIO Y ÓXIDO DE ZINC
- 2.5. PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN ACUOSA DE KETOPROFENO 10[PPM]
- 2.6. PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN DILUÍDA DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO 0,097 M, A PARTIR DE SOLUCIÓN CONCENTRADA DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO 9,71 M
- 2.7. DETERMINACIÓN DE LONGITUD DE ONDA MÁXIMA DE ABSORCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE KETOPROFENO 10 [PPM]

- 2.8. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] CON ANILLOS RASCHIG DE VIDRIO PYREX
- 2.8.1. Experiencia 1: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar
- 2.8.2. Experiencia 2: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10
- 2.8.3. Experiencia 3: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4
- 2.8.4. Experiencia 4: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 1:1
- 2.8.5. Experiencia 5: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 5:1
- 2.8.6. Experiencia 6: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 10:1
- 2.8.7. Experiencia 7: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 1:1
- 2.8.8. Experiencia 8: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 5:1
- 2.8.9. Experiencia 9: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 10:1
- 2.8.10. Experiencia 10: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con H₂O₂ en razón molar 1:1
- 2.8.11. Experiencia 11: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con H₂O₂ en razón molar 5:1
- 2.8.12. Experiencia 12: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con H₂O₂ en razón molar 10:1
- 2.8.13. Experiencia 13: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire burbujeado
- 2.8.14. Experiencia 14: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire burbujeado
- 2.8.15. Experiencia 15: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con aire burbujeado
- 2.8.16. Experiencia 16: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]
- 2.8.17. Experiencia 17: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]

- 2.8.18. Experiencia 18: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]
- 2.8.19. Experiencia 19: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]
- 2.8.20. Experiencia 20: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]
- 2.8.21. Experiencia 21: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]
- 2.9. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] USANDO TiO_2 INMOVILIZADO EN ANILLOS RASCHIG
 - 2.9.1. Experiencia 22: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando TiO_2 adherido a anillos Raschig
 - 2.9.2. Experiencia 23: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, usando TiO_2 adherido a anillos Raschig
 - 2.9.3. Experiencia 24: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, usando TiO_2 adherido a anillos Raschig
 - 2.9.4. Experiencia 25: Adsorción de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando TiO_2 adherido a anillos Raschig y en ausencia de luz UV
 - 2.9.5. Experiencia 26: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO_2 adherido a anillos Raschig
 - 2.9.6. Experiencia 27: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire y TiO_2 adherido a anillos Raschig
 - 2.9.7. Experiencia 28: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con aire y TiO_2 adherido a anillos Raschig
 - 2.9.8. Experiencia 29: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO_2 adherido a anillos Raschig
 - 2.9.9. Experiencia 30: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10 con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO_2 adherido a anillos Raschig
 - 2.9.10. Experiencia 31: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO_2 adherido a anillos Raschig
 - 2.9.11. Experiencia 32: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO_2 adherido a anillos Raschig

- 2.9.12. Experiencia 33: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10 con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig
- 2.9.13. Experiencia 34: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig
- 2.10. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] USANDO ZNO INMOVILIZADO EN ANILLOS RASCHIG
 - 2.10.1. Experiencia 35: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando ZnO adherido a anillos Raschig
 - 2.10.2. Experiencia 36: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, usando ZnO adherido a anillos Raschig
 - 2.10.3. Experiencia 37: Adsorción de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar usando ZnO adherido a anillos Raschig y en ausencia de luz UV
 - 2.10.4. Experiencia 38: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y usando ZnO adherido a anillos Raschig
 - 2.10.5. Experiencia 39: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire y usando ZnO adherido a anillos Raschig
 - 2.10.6. Experiencia 40: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y usando ZnO adherido a anillos Raschig
 - 2.10.7. Experiencia 41: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y usando ZnO adherido a anillos Raschig
 - 2.10.8. Experiencia 42: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y usando ZnO adherido a anillos Raschig
 - 2.10.9. Experiencia 43: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y usando ZnO adherido a anillos Raschig.
- 2.11. PUESTA A PUNTO DE EQUIPO OZONIZADOR PARA DEGRADACIONES CON OZONO
 - 2.11.1. Preparación de 1 [L] de solución estándar de Na₂S₂O₃ 0,1 N
 - 2.11.2. Preparación de 100 [mL] de solución de KIO₃ 0,1 N
 - 2.11.3. Estandarización de la solución de Na₂S₂O₃ frente a KIO₃
 - 2.11.4. Preparación de 1 [L] de solución tampón pH 7
 - 2.11.5. Determinación volumétrica de ozono

- 2.12. DEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] CON OZONO Y ANILLOS RASCHIG DE VIDRIO PYREX
 - 2.12.1. Experiencia 44: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con ozono
 - 2.12.2. Experiencia 45: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con ozono
 - 2.12.3. Experiencia 46: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con ozono
 - 2.12.4. Experiencia 47: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con ozono y ausencia de luz UV
 - 2.12.5. Experiencia 48: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con ozono y ausencia de luz UV
 - 2.12.6. Experiencia 49: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con ozono y ausencia de luz UV
- 2.13. PREPARACIÓN DE CURVA DE CALIBRACIÓN KETOPROFENO
- 2.14. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO
- 2.15. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, DBO₅
- 2.16. DETERMINACIÓN DE TOXICIDAD AGUDA
- 2.17. DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL

CAPÍTULO 3 RESULTADOS OBTENIDOS

- 3.1. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL ANÁLISIS POR ESPECTROFOTOMETRÍA ULTRAVIOLETA PARA KETOPROFENO
- 3.2. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] CON ANILLOS RASCHIG DE VIDRIO PYREX.
- 3.3. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] USANDO TiO₂ INMOVILIZADO EN ANILLOS RASCHIG
- 3.4. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] USANDO ZnO INMOVILIZADO EN ANILLOS RASCHIG
- 3.5. DEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] CON OZONO Y ANILLOS RASCHIG DE VIDRIO PYREX
- 3.6. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO
- 3.7. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, DBO₅

- 3.8. DETERMINACIÓN DE TOXICIDAD AGUDA
- 3.9. DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

- ANEXO A: IMÁGENES DE REACTORES EMPLEADOS
- ANEXO B: GRÁFICOS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1-1. Fórmula estructural del ketoprofeno
- Figura 1-2. Reactor con lámpara UV
- Figura 1-3. Reactor UV visto desde arriba
- Figura 2-1. Operación del analizador de toxicidad aguda, MICROTOX modelo 500 Analyzer

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 3-1. Curva de calibración para el análisis por espectrofotometría ultravioleta para ketoprofeno
- Tabla 3-2. Experiencia 1: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno (**KET**), pH sin modificar
- Tabla 3-3. Condiciones usadas en Experiencia 1
- Tabla 3-4. Experiencia 2: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10
- Tabla 3-5. Condiciones usadas en Experiencia 2
- Tabla 3-6. Experiencia 3: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4
- Tabla 3-7. Condiciones usadas en Experiencia 3
- Tabla 3-8. Experiencia 4: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 1:1
- Tabla 3-9. Condiciones usadas en Experiencia 4

- Tabla 3-10. Experiencia 5: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 5:1
- Tabla 3-11. Condiciones usadas en Experiencia 5
- Tabla 3-12. Experiencia 6: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 10:1
- Tabla 3-13. Condiciones usadas en Experiencia 6
- Tabla 3-14. Experiencia 7: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 1:1
- Tabla 3-15. Condiciones usadas en Experiencia 7
- Tabla 3-16. Experiencia 8: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 5:1
- Tabla 3-17. Condiciones usadas en Experiencia 8
- Tabla 3-18. Experiencia 9: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 10:1
- Tabla 3-19. Condiciones usadas en Experiencia 9
- Tabla 3-20. Experiencia 10: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con H₂O₂ en razón molar 1:1
- Tabla 3-21. Condiciones usadas en Experiencia 10
- Tabla 3-22. Experiencia 11: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con H₂O₂ en razón molar 5:1
- Tabla 3-23. Condiciones usadas en Experiencia 11
- Tabla 3-24. Experiencia 12: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con H₂O₂ en razón molar 10:1
- Tabla 3-25. Condiciones usadas en Experiencia 12
- Tabla 3-26. Experiencia 13: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire
- Tabla 3-27. Condiciones usadas en Experiencia 13
- Tabla 3-28. Experiencia 14: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire
- Tabla 3-29. Condiciones usadas en Experiencia 14
- Tabla 3-30. Experiencia 15: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con aire
- Tabla 3-31. Condiciones usadas en Experiencia 15
- Tabla 3-32. Experiencia 16: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]
- Tabla 3-33. Condiciones usadas en Experiencia 16
- Tabla 3-34. Experiencia 17: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]

- Tabla 3-35. Condiciones usadas en Experiencia 17
- Tabla 3-36. Experiencia 18: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]
- Tabla 3-37. Condiciones usadas en Experiencia 18
- Tabla 3-38. Experiencia 19: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]
- Tabla 3-39. Condiciones usadas en Experiencia 19
- Tabla 3-40. Experiencia 20: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]
- Tabla 3-41. Condiciones usadas en Experiencia 20
- Tabla 3-42. Experiencia 21: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]
- Tabla 3-43. Condiciones usadas en Experiencia 21
- Tabla 3-44. Experiencia 22: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-45. Condiciones usadas en Experiencia 22
- Tabla 3-46. Experiencia 23: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-47. Condiciones usadas en Experiencia 23
- Tabla 3-48. Experiencia 24: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-49. Condiciones usadas en Experiencia 24
- Tabla 3-50. Experiencia 25: Adsorción de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig y en ausencia de luz UV
- Tabla 3-51. Condiciones usadas en Experiencia 25
- Tabla 3-52. Experiencia 26: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-53. Condiciones usadas en Experiencia 26
- Tabla 3-54. Experiencia 27: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-55. Condiciones usadas en Experiencia 27
- Tabla 3-56. Experiencia 28: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-57. Condiciones usadas en Experiencia 28
- Tabla 3-58. Experiencia 29: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

- Tabla 3-59. Condiciones usadas en Experiencia 29
- Tabla 3-60. Experiencia 30: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-61. Condiciones usadas en Experiencia 30
- Tabla 3-62. Experiencia 31: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-63. Condiciones usadas en Experiencia 31
- Tabla 3-64. Experiencia 32: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig.
- Tabla 3-65. Condiciones usadas en Experiencia 32
- Tabla 3-66. Experiencia 33: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-67. Condiciones usadas en Experiencia 33
- Tabla 3-68. Experiencia 34: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-69. Condiciones usadas en Experiencia 34
- Tabla 3-70. Experiencia 35: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando ZnO adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-71. Condiciones usadas en Experiencia 35
- Tabla 3-72. Experiencia 36: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, usando ZnO adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-73. Condiciones usadas en Experiencia 36
- Tabla 3-74. Experiencia 37: Adsorción de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando ZnO adherido a anillos Raschig y en ausencia de luz UV
- Tabla 3-75. Condiciones usadas en Experiencia 37
- Tabla 3-76. Experiencia 38: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-77. Condiciones usadas en Experiencia 38
- Tabla 3-78. Experiencia 39: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-79. Condiciones usadas en Experiencia 39

- Tabla 3–80. Experiencia 40: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y ZnO adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-81. Condiciones usadas en Experiencia 40
- Tabla 3–82. Experiencia 41: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y ZnO adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-83. Condiciones usadas en Experiencia 41
- Tabla 3–84. Experiencia 42: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y ZnO adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-85. Condiciones usadas en Experiencia 42
- Tabla 3–86. Experiencia 43: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y ZnO adherido a anillos Raschig
- Tabla 3-87. Condiciones usadas en Experiencia 43
- Tabla 3–88. Experiencia 44: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con ozono
- Tabla 3-89. Condiciones usadas en Experiencia 44
- Tabla 3–90. Experiencia 45: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con ozono
- Tabla 3-91. Condiciones usadas en Experiencia 45
- Tabla 3–92. Experiencia 46: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con ozono
- Tabla 3-93. Condiciones usadas en Experiencia 46
- Tabla 3–94. Experiencia 47: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con ozono y en ausencia de luz UV
- Tabla 3-95. Condiciones usadas en Experiencia 47
- Tabla 3–96. Experiencia 48: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con ozono y en ausencia de luz UV
- Tabla 3-97. Condiciones usadas en Experiencia 48
- Tabla 3–98. Experiencia 49: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con ozono y en ausencia de luz UV
- Tabla 3-99. Condiciones usadas en Experiencia 49
- Tabla 3-100. Determinación de DQO a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 26 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig)

- Tabla 3-101. Determinación de DQO a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 38 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig)
- Tabla 3-102. Determinación de DBO₅ a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 26 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig)
- Tabla 3-103. Determinación de DBO₅ a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 38 (Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig)
- Tabla 3-104. Determinación de toxicidad a la muestras 0, 60 y 120 [min] correspondientes a la experiencia 26 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig)
- Tabla 3-105. Determinación de toxicidad aguda a los 15 [min]
- Tabla 3-106. Determinación de toxicidad a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 38 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig)
- Tabla 3-107. Determinación de toxicidad aguda a los 15 [min]
- Tabla 3-108. Determinación de TOC a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 26 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig)

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

SIGLAS

Abs	Absorbancia
COX	Ciclooxigenasa
DQO	Demanda química de oxígeno
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
EC	Effective Concentration (Concentración efectiva)
KET	Ketoprofeno
OBS	Observación
p.a.	Para análisis
PG	Prostaglandinas
RILES	Residuos industriales líquidos
TOC	Carbono orgánico total
TU	Toxicity Units (Unidades de toxicidad)
UTFSM	Universidad Técnica Federico Santa María
UV	Ultra violeta

SIMBOLOGÍA

λ	Longitud de onda
%	Porcentaje
° C	Grados Celsius
cm	Centímetros
e^-/h^+	Electrón hueco
g	Gramo
h	Hora
L	Litro
M	Molar
mg	Miligramo
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetro

nm	Nanómetro
OH*	Radical hidroxilo
ppm	Parte por millón
μL	Micro litro

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha ido creciendo la importancia de la contaminación del agua por emisión de residuos farmacéuticos. Si bien, a nivel nacional, por ahora no representa un peligro muy alto este tipo de descargas, debido al proceso de manufactura de fármacos en Chile; se prevé que dentro de algunos años más algunos laboratorios implementarán plantas con procesos más contaminantes, como es el caso de los medicamentos radiactivos y el desarrollo de organismos genéticamente modificados, lo que conllevaría un control aún más estricto de la calidad de las aguas residuales. Por otro lado, no debe descartarse el efecto acumulativo de fármacos eliminados por la población a través de la orina.

Lo más grave aún es que las estructuras químicas de muchos fármacos son complejas y muy reactivas, que pueden generar en el agua otros compuestos aún más agresivos y que pueden alterar el ecosistema y por consiguiente nuestra calidad de vida. Otra consecuencia es que la exposición constante de los microorganismos del ecosistema (en el agua hay infinidad de virus y bacterias) a los fármacos disueltos en el agua residual puede generar patógenos resistentes a ellos, poniendo en peligro el tratamiento a futuras infecciones. No menos importantes son los efectos, todavía difíciles de prever, que tienen los residuos de las píldoras anticonceptivas y de terapias hormonales, que siguen activas al llegar al medio ambiente, y pueden alterar el sistema endocrino de los organismos.

El objetivo de este trabajo es eliminar estos contaminantes del agua mediante la técnica de fotocátalisis y/o ozonización de la muestra contaminada, específicamente contaminada por el fármaco Talflex, cuyo agente activo es ketoprofeno, además de varios excipientes. Ambas técnicas consisten básicamente en la oxidación de la estructura a eliminar, lo que incluye también en su eficiencia diferentes variables como el pH, tipo de irradiación, el uso de catalizadores u otros reactivos. Idealmente, al producirse esta oxidación el agua queda depurada y por lo tanto apta para el consumo.

Se eligió este proyecto porque es una de las pocas técnicas que permite remover y eliminar estos contaminantes del agua y además porque los resultados que entregan los análisis posteriores, son bastante confiables para poder categorizar finalmente que el agua ya purificada puede ser suministrada para sus diversos usos. Además que es necesario conocer que es lo que se está bebiendo.

Las experiencias efectuadas en este trabajo fueron a escala de laboratorio, para posteriormente desarrollarlo para su implementación a nivel industrial en las empresas para el proceso de tratamiento terciario de aguas residuales.

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTO TEÓRICO

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. EL AGUA: UN RECURSO INDISPENSABLE

El agua es un recurso natural renovable. La atmósfera la produce en forma de lluvia, nieve, granizo, niebla y condensación, y regresa a la misma por evaporación y transpiración. Al caer a la superficie, se desplaza sobre el suelo hacia lagos, ríos, arroyos y océanos, y se filtra en la tierra para ser absorbida por las plantas en crecimiento y pasar a formar parte de reservas subterráneas que eventualmente alimentan a las corrientes, lagos y océanos. El agua forma así un ciclo continuo, impulsado en su mayor parte por la radiación solar.

El agua pura es un líquido insípido, inodoro e incoloro, que en grandes volúmenes aparece de color azul-verdoso debido a las sustancias que normalmente tiene disueltas o en suspensión, por ejemplo, el carbonato ferroso y las sales de calcio dan al agua un característico color verde.

Es el componente principal de la materia viva. Constituye desde un 50 a un 90% de la masa de los organismos vivos. En la naturaleza el agua actúa como solvente transportando, combinando y descomponiendo químicamente una gran gama de sustancias, participando así de un equilibrio entre los ecosistemas.

El agua puede presentarse en la naturaleza en los tres estados de la materia. La calidad del agua es muy variable dependiendo del uso que a ésta se le vaya a dar, o del lugar del cual proceda.

El agua se encuentra clasificada en varias formas. Están las aguas subterráneas donde se encuentran manantiales, pozos poco profundos y galerías de infiltración, y pozos profundos. Generalmente son aguas muy limpias, sin muchos contaminantes disueltos.

Las aguas de tipo superficiales son las que fluyen libremente en contacto con el suelo y el ambiente exterior, formando ríos, lagos, lagunas, arroyos, canales, embalses y otros. Estas aguas reciben generalmente su caudal de lugares habitados y frecuentemente tienen contaminaciones producidas por el escurrimiento superficial de las tierras erosionadas. En muchos casos, los desperdicios industriales y las aguas negras (aguas residuales provenientes de la comunidad) pueden ser descargados directamente a muchas de estas corrientes sin un tratamiento previo; por esta razón es importante conocer las características en términos de contaminantes que contienen dichas aguas.

1.2. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Los residuos industriales líquidos (RILES) son mezclas muy complejas cuyo componente principal es el agua, además de diversas sustancias provenientes de las distintas operaciones que se realizan en una industria. Muchas de estas operaciones son básicas en una industria, como por ejemplo la transferencia de calor, la generación de energía y otras en las que el agua actúa directamente como en la extracción, lixiviación, sedimentación, precipitación, flotación, coagulación, etc.

1.2.1. Función del agua en los procesos industriales

En los procesos industriales, el agua realiza importantes funciones: se utiliza para transportar materiales, en procedimientos de lavado, como materia prima y una extensa variedad de otras aplicaciones que pueden ser exclusivas de una sola industria, e incluso de una sola planta.

1.2.2. Clasificación de los RILES

Los RILES pueden dividirse en 4 clases:

- Orgánicos, altos en demanda bioquímica de oxígeno (DBO) pero usualmente dóciles en los tratamientos de aguas residuales
- Orgánicos, contienen sustancias que no pueden eliminarse por procedimientos ordinarios
- Tóxicos
- Ácidos, alcalinos o salinos.

Dependiendo de las características específicas de un determinado RIL, debe definirse el tipo de tratamiento que debe ser utilizado.

La contaminación física del agua puede manifestarse como depósitos de lodo, desechos flotantes, espumas, turbidez, color, sabor, olor y temperatura.

La contaminación química del agua viene dada por la presencia de compuestos que le confieran acidez, basicidad, aumentos de la dureza, salinidad, metales pesados como cromo, cobre, plomo, etc., presencia de compuestos orgánicos y otras sustancias nocivas disueltas, con potenciales efectos tóxicos para los organismos vivos.

1.2.3. Disposición final de los RILES

El agua se contamina cuando la descarga de los residuos perjudica la calidad del agua o cuando se perturba el equilibrio ecológico natural. Los contaminantes que causan problemas comprenden organismos causantes de enfermedades (agentes patógenos), materia orgánica disuelta, sólidos, nutrientes, sustancias tóxicas, color, espuma, calor y materiales radiactivos.

En la mayoría de las industrias se hace indispensable un tratamiento previo de sus RILES para eliminar ciertos contaminantes, antes de disponer cual será su vertido final.

En casos más aislados, este tratamiento no es necesario ya que las aguas residuales presentan parámetros de calidad aceptables para su vertido sin tratamiento previo.

1.3. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

La purificación del agua luego de su uso industrial puede ser muy compleja o relativamente simple dependiendo del tipo de industria que la desecha y del uso que ésta le da al agua. La calidad del agua puede variar inclusive en industrias que fabriquen el mismo producto.

El primer paso en un tratamiento de aguas residuales es conocer la calidad del agua que se descarga, estableciendo los valores de parámetros tales como: sólidos, metales pesados, color, temperatura, pH, DBO, DQO, etc. Si todos o parte de estos análisis superan lo permitido por la normativa se requerirá de un tratamiento previo antes de la descarga del efluente.

Se emplean muchos métodos y combinaciones de ellos para tratar las aguas residuales, los que pueden ser de tipo físico, químico o biológico.

Los tratamientos se clasifican en tratamientos primarios, tratamientos secundarios y tratamientos terciarios.

- **Pretratamiento:**

Toda planta de tratamiento de aguas residuales debe contar con un conjunto de elementos estáticos o dinámicos que permitan eliminar los sólidos de gran tamaño y finos (arenas). El conjunto de operaciones que constituye el pretratamiento cumple dos

objetivos: eliminar parte de la contaminación y permitir el buen desarrollo de los procesos que siguen.

Algunos elementos que se emplean en el pretratamiento son: rejas y tamices, aliviaderos de caudal, desarenadores, desengrasadores y medidores de caudal.

Un esquema de funcionamiento de un pretratamiento puede realizarse de la siguiente forma:

By-pass → Tamices → Medidor de caudal → Desarenado → Desengrasado

- **Tratamiento Primario:**

El tratamiento primario lo constituye el conjunto de procesos que tienen como misión la separación por medios físicos de las partículas en suspensión no retenidas en el pretratamiento. También se incluyen aquí los tratamientos que requieran la utilización de productos químicos o coagulantes que rompen el estado coloidal de las partículas y forman flóculos de gran tamaño de forma que decantan más rápidamente.

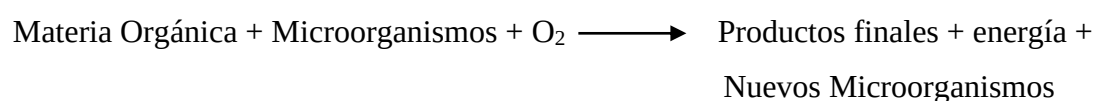
Los procesos que pueden incluirse en el tratamiento primario son: sedimentación primaria, flotación con aire, coagulación–floculación, neutralización y otros.

- **Tratamiento Secundario:**

Este tratamiento es el encargado de reducir la demanda biológica de oxígeno de las aguas residuales, ya sean industriales o urbanas. Este tratamiento recibe también el nombre de tratamiento biológico, ya que se emplean procesos de oxidación biológica.

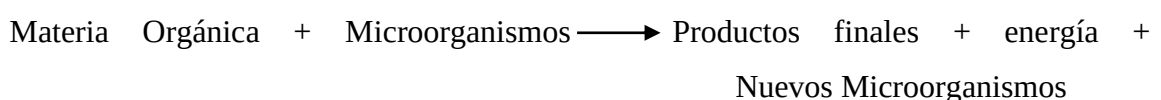
El mecanismo de oxidación biológica consiste en la asimilación de la materia orgánica degradable biológicamente por la acción de microorganismos, en presencia o ausencia de oxígeno y nutrientes.

➤ Proceso aeróbico, la reacción general es:



Los productos finales del metabolismo aerobio son CO₂ y H₂O.

➤ Proceso anaeróbico, en este caso la reacción general es:



Los productos finales del metabolismo anaerobio son CH_4 y CO_2 .

Los procesos biológicos anaerobios más utilizados son: los lodos activados, los lechos bacterianos y los filtros percoladores.

- ***Tratamiento Terciario:***

Cuando las aguas residuales tienen concentraciones, como por ejemplo fosfato, amonio, sustancias recalcitrantes, etc, que exceden los máximos niveles de contaminación permitidos, es necesario un tratamiento de tipo terciario. Estos tratamientos en general son de costo elevado, no se utilizan en todas las plantas de tratamiento de aguas residuales a no ser que se requiera una calidad del agua muy pura o el contaminante sea muy difícil de eliminar. Algunos de estos procesos son: adsorción, ultrafiltración o microfiltración, osmosis inversa, electrodiálisis, procesos de separación por membrana y en la última década se han comenzado a desarrollar los métodos avanzados de oxidación.

1.4. CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR VERTIMIENTO DE RESIDUOS FARMACÉUTICOS

En general, el proceso de manufactura de fármacos en Chile (Formulación: proceso que consiste en la mezcla de compuestos ya sintetizados para formar un producto específico) es muy poco contaminante al medio ambiente, a excepción de una pequeña cantidad de residuos muy tóxicos. Sin embargo, se estima que en los próximos años, algunos laboratorios implementarán plantas con procesos más contaminantes, como es el caso de los medicamentos radiactivos y el desarrollo de organismos genéticamente modificados, procesos que en países desarrollados tienen reglamentaciones muy estrictas con respecto al tratamiento y disposición de los residuos generados.

1.4.1. Fuentes de generación de residuos farmacéuticos

1.4.1.1. Residuos líquidos

La generación de residuos líquidos ocurre principalmente en la producción de jarabes, cremas y ungüentos, producto del lavado de las máquinas y reactores donde se preparan los medicamentos; también en el agua del lavado de pisos, en el Departamento

de control de calidad y en la producción de agua desmineralizada. Otra fuente de generación de residuos líquidos es el vertimiento al sistema de alcantarillado de los medicamentos líquidos y semilíquidos vencidos.

1.4.1.2. Residuos sólidos

Los residuos sólidos son generados principalmente en la producción de medicamentos secos en las secciones de pesaje, mezclado y compresión; en el sistema de extracción de polvos y los medicamentos vencidos que retornan a la industria.

1.4.1.3. Emisiones a la atmósfera

En estas industrias, las emisiones a la atmósfera están dadas básicamente por las calderas. Otra fuente de emisión se produce en las secciones de mezclado de algunos comprimidos. En algunos casos, el medio ambiente laboral de la planta industrial es contaminante, debido a que la materia prima en polvo se encuentra en suspensión en las secciones donde se llevan a cabo algunos procesos, principalmente en compresión directa.

Las concentraciones de estos residuos no suponen un riesgo para la salud humana, pero el problema es el efecto acumulativo que deriva la acumulación de concentraciones de estas sustancias en el organismo y también en el ecosistema. Esto significa que la exposición constante de los microorganismos del ecosistema (en el agua hay infinidad de virus y bacterias) a los fármacos puede generar patógenos resistentes a ellos, poniendo en peligro el tratamiento a futuras infecciones. No menos importantes son los efectos, todavía difíciles de prever, que tienen los residuos de las píldoras anticonceptivas y de terapias hormonales, que siguen activas al llegar al medio ambiente y pueden alterar el sistema endocrino de los organismos.

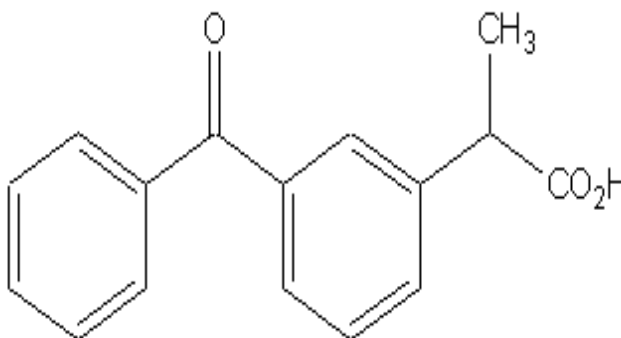
Los fármacos, desde el punto de vista medioambiental, presentan una serie de características que los hace diferentes a los contaminantes químicos industriales convencionales. Estas son:

- Incluyen compuestos formados por moléculas grandes y químicamente complejas, pero muy diferentes en peso molecular, estructura, funcionalidad y forma.
- Son moléculas polares y tienen más de un grupo ionizable. El grado de ionización y sus propiedades dependen del pH de la solución.

- Su persistencia en el medio ambiente es mayor a 1 año en algunos casos, así como de varios años para otros, estos fármacos se acumulan alcanzando niveles biológicamente activos.

1.5. KETOPROFENO

Es un antiinflamatorio no esteroideo, derivado del ácido fenilpropiónico, su nombre es ácido (RS)-2-3benzofenil propanoico. Tiene una estructura similar al ibuprofeno, principalmente se absorbe por vía oral, con un porcentaje cerca del 90%, estando en comprimidos en el mercado, también está en ampolla inyectable, la cual contiene 100 [mg] de ketoprofeno, sus excipientes contienen arginina, alcohol bencílico (25 [mg/ml]), ácido cítrico monohidrato, agua para preparaciones inyectables. También está en cápsulas y supositorios. Su fórmula química es $C_{16}H_{14}O_3$



Fuente: Anestesia México

Figura 1-1. Fórmula estructural del ketoprofeno

El ketoprofeno inhibe la actividad de la enzima ciclooxigenasa para provocar una disminución en la formación de precursores de las prostaglandinas y de los tromboxanos a partir del ácido araquidónico.

1.5.1. Biocinética

Como ya se mencionó anteriormente, el principal mecanismo de acción del ketoprofeno es la inhibición de la ciclooxigenasa (COX), lo cual conduce a un bloqueo

de la biosíntesis de las prostaglandinas (PG), a partir del ácido araquidónico. Este mecanismo explica las propiedades del ketoprofeno como actividad analgésica, antiinflamatoria y antipirética.

A nivel periférico, el ketoprofeno actúa sobre el dolor mediante un potente efecto antiinflamatorio relacionado con la inhibición de la ciclooxygenasa y, por lo tanto, la biosíntesis de las prostaglandinas. Éstas, en particular las PGE₂, no generan dolor por sí mismas, pero sensibilizan los nociceptores de las terminaciones nerviosas a la acción de las sustancias algógenas, como la bradicinina, que se vuelven susceptibles de desencadenar sensaciones dolorosas a partir de estímulos dolorosos.

A nivel central, el ketoprofeno actúa sobre el dolor porque atraviesa rápidamente la barrera hematoencefálica, gracias a su liposolubilidad, además de que sugiere un efecto central directamente a nivel espinal, o bien, a nivel suprasegmentario.

Se distribuye rápidamente en todos los tejidos. La vida media en el organismo es de 2 horas. Se une en un 99% a proteínas plasmáticas. La biotransformación del ketoprofeno se lleva a cabo en dos procesos: hidroxilación (en menor proporción) y conjugación del ácido glucurónico (predominando este proceso). Al administrar una dosis de ketoprofeno, menos del 1% es eliminado a través de la orina sin cambios y el glucuroconjugado representa alrededor del 65 al 75%.

1.6. MÉTODOS DE OXIDACIÓN AVANZADOS

Como ya se mencionó anteriormente, la contaminación por fármacos no produce inmediatamente efectos negativos en los seres humanos, pero su efecto acumulativo es de suma importancia, ya que genera patógenos resistentes a los antimicrobianos por ejemplo. Además, estas sustancias corren también el riesgo de reaccionar con otras sustancias presentes en el agua, otros fármacos o sustancias tóxicas lo que produce un riesgo al consumir dicha agua.

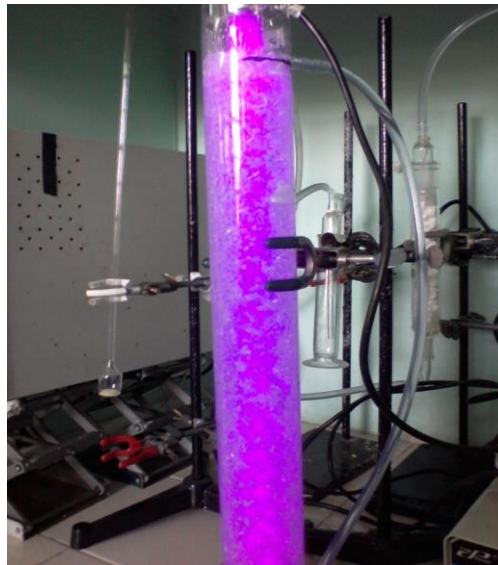
Como estos fármacos no pueden ser eliminados por los procesos convencionales de depuración, se han desarrollado nuevas técnicas para la remoción de estas estructuras. Es así como surgen los métodos de oxidación avanzados.

Los métodos de oxidación avanzados son técnicas relativamente nuevas, basadas en la destrucción de los contaminantes del agua usando una combinación de luz ultravioleta y oxidantes químicos. La luz UV es capaz por sí sola de degradar algunos compuestos orgánicos, pero esto se logra generalmente a una velocidad muy lenta, por lo que en la práctica se usa en conjunto con algunos oxidantes, formando sistemas combinados tales como:

- UV / peróxido de hidrógeno
- UV / peróxido de hidrógeno / ozono
- UV / Fotocatalizadores

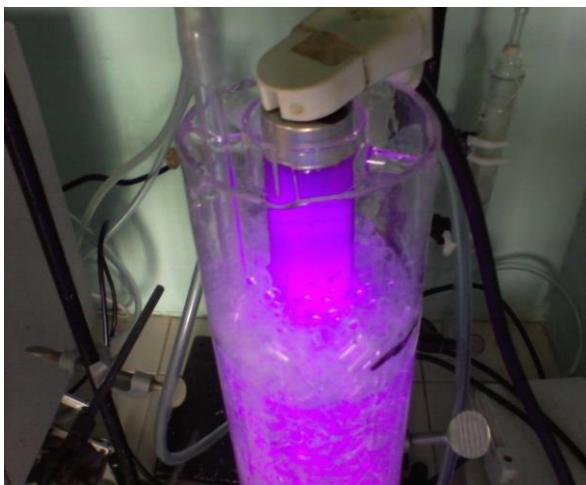
El fundamento de estos procesos es la formación de especies radicales libres con un alto poder oxidante, principalmente por el radical hidroxilo [OH*] que es capaz de destruir rápidamente una gran variedad de especies disueltas.

Para mejorar el proceso, se ha experimentado con el uso de diferentes materiales semiconductores en distintos procedimientos que se encuentran dentro del proceso general de fotocatálisis. El fundamento es que la radiación UV, de determinadas longitudes de onda, puede provocar la transferencia de un electrón desde la capa de valencia de un semiconductor hasta su capa de conducción produciendo un par electrón–hueco. De esta manera la superficie del semiconductor activa la formación de radicales OH*, los que oxidan variados compuestos orgánicos. Entre los semiconductores utilizados se encuentra el ZnO y TiO₂.



Fuente: Laboratorio Fotoquímica USM

Figura 1-2. Reactor con lámpara UV



Fuente: Laboratorio Fotoquímica USM

Figura 1-3. Reactor UV visto desde arriba

1.7. PROPIEDADES DEL DIÓXIDO DE TITANIO Y ÓXIDO DE ZINC

El **dióxido de titanio** es un polvo blanco ampliamente usado en la industria de la pintura como pigmento (colorante); estudiándose en la actualidad su utilización como filtro no químico para las radiaciones ultravioleta. Su utilización como fotocatalizador se basa tanto en sus propiedades de semiconductor así como la posibilidad de obtenerlo en forma de partículas de muy pequeño diámetro y de gran área superficial.

El TiO_2 es estable a temperaturas elevadas y es insoluble en agua, ácidos orgánicos y álcalis diluidos y en la mayoría de los ácidos inorgánicos. Por otra parte, los ácidos sulfúrico y fluorhídrico, concentrados y calientes disuelven el dióxido de titanio, así como también soluciones alcalinas concentradas.

El **óxido de zinc** es un polvo fino de color blanco con propiedades anfóteras, reacciona con ácidos orgánicos e inorgánicos. Tiene una amplia utilización en la fabricación de lubricantes, adhesivos y en la galvanización del acero. En la industria cosmética y farmacéutica es utilizado en la elaboración de pomadas, cremas cutáneas y cremas especiales para bebés.

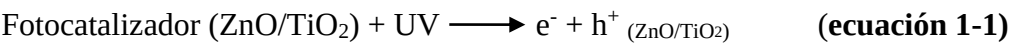
El óxido de zinc es un material semiconductor con aplicaciones importantes en varios campos, por ejemplo transductores, sensores químicos, cubiertas ópticas, celdas fotovoltaicas y fotocatalizadores.

Los semiconductores para reacciones fotocatalíticas deben tener condiciones tales como alta fotoactividad, alta fotoestabilidad, alta sensibilidad para la luz UV-visible y bajo costo de fabricación. Una característica muy importante de un semiconductor para ser usado como fotocatalizador es su energía de banda prohibida E_g

(región angosta de energía entre la banda de valencia electrónicamente poblada y la banda de conducción vacía). Ésta y otras propiedades químicas y electrónicas de un compuesto pueden cambiarse según el método de preparación. La transformación de las fases, su área específica y la morfología dependen de toda la historia de síntesis de la muestra. En cuanto a la solubilidad del ZnO, éste se considera completamente soluble en soluciones ácidas e insolubles en agua. A causa del comportamiento anfótero del zinc, la solubilidad del hidróxido de zinc es más baja a un valor de pH de alrededor de 8.

1.8. FUNDAMENTO DE TRABAJO CON AMBOS FOTOCATALIZADORES

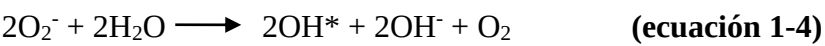
Para efectuar el tratamiento la solución acuosa se contacta con óxido de zinc o dióxido de titanio y se irradia con luz UV. En estas condiciones se transfiere un electrón desde la capa de valencia del semiconductor hasta la capa de conducción, produciéndose lo que se conoce como par electrón–hueco [e⁻/h⁺] dado por:



El hueco producido h⁺ conlleva a la formación de radicales OH* según:



La formación de los radicales OH* no sólo se debe al par [e⁻/h⁺] sino que también a la presencia de oxígeno disuelto, que al reaccionar con el electrón de la capa de conducción produce iones superóxidos que desproporcionan en radicales OH* dado por las reacciones:



Además de la luz UV y un semiconductor, es importante considerar en el procedimiento de fotodegradación catalítica factores como el pH, la temperatura, la velocidad de flujo y la aireación, ya que todos éstos inciden.

CAPÍTULO 2: PARTE EXPERIMENTAL

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. ANTECEDENTES.

Los objetivos de las experiencias realizadas fueron:

- a.** Establecer la factibilidad de degradar fotocatalíticamente el antiinflamatorio ketoprofeno desde soluciones acuosas, usando ya sea el semiconductor irradiado dióxido de titanio (TiO_2), o el semiconductor irradiado óxido de zinc (ZnO).
- b.** Evaluar el impacto que tienen en la eficiencia de la fotocatálisis las siguientes condiciones de operación:
 - pH de la solución.
 - Presencia de otros agentes oxidantes (peróxido de hidrógeno, aire, oxígeno puro).
- c.** Establecer la factibilidad de degradar vía ozonación el antiinflamatorio ketoprofeno desde soluciones acuosas.
 - Evaluar la influencia que la irradiación UV-C pueda tener en la eficiencia del proceso de ozonación.
- d.** Establecer el grado de adsorción de ketoprofeno en la superficie de los semiconductores TiO_2 y ZnO .

Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- a.** Fotodegradación de soluciones acuosas de ketoprofeno de concentración 10 [ppm], con variación de pH y bajo distintos agentes oxidantes (H_2O_2 , aire y oxígeno) en un reactor tipo columna, rellena con anillos Raschig de vidrio Pyrex usando lámpara UV-C. La evolución de estas experiencias fueron monitoreadas por espectroscopía UV-Visible.
- b.** Fotodegradación de soluciones acuosas de ketoprofeno de concentración 10 [ppm], con variación de pH en un reactor tipo columna con TiO_2 inmovilizado en anillos Raschig de vidrio Pyrex y usando lámpara UV-C. La evolución de estas experiencias fueron monitoreadas por espectroscopía UV-Visible.
- c.** Fotodegradación de soluciones acuosas de ketoprofeno de concentración 10 [ppm], con variación de pH en un reactor tipo columna con ZnO inmovilizado en anillos Raschig de vidrio Pyrex y usando lámpara UV-C. La evolución de estas experiencias fueron monitoreadas por espectroscopía UV-Visible.

- d. Fotodegradación de soluciones acuosas de ketoprofeno de concentración 10 [ppm], con burbujeo de ozono, con variación de pH en un reactor tipo columna rellena con anillos Raschig de vidrio Pyrex y usando lámpara UV-C. La evolución de estas experiencias fueron monitoreadas por espectroscopía UV-Visible.
- e. Realización de blancos de adsorción de soluciones acuosas de ketoprofeno de concentración 10 [ppm] en reactores tipo columna con TiO_2 y ZnO inmovilizados en anillos Raschig de vidrio Pyrex.

2.2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO FOTOQUÍMICO

La unidad de tratamiento fotoquímico diseñada en la U.T.F.S.M. consta de:

- Fotorreactor
- Bomba peristáltica
- Cilindro de oxígeno
- Bomba de aire
- Ozonizador

Fotorreactor:

Características generales de diseño

El reactor de tratamiento fotoquímico se encuentra constituido por una columna cilíndrica verticalmente dispuesta, fabricada en vidrio Pyrex. En su interior está provisto de una lámpara que emite luz UV en determinado rango del espectro ultravioleta. La parte inferior del cilindro y la lámpara se encuentran selladas con silicona. La columna consta de una entrada, ubicada en la parte inferior que permite el ingreso de la solución y una salida en la parte superior que permite el recirculamiento de la solución.

En las experiencias realizadas se utilizaron 3 reactores fotoquímicos, los cuales se detallan a continuación:

Fotorreactor I

- Altura: 57 [cm]
- Diámetro interno: 7 [cm]
- Capacidad con relleno: 1030 [mL]
- Capacidad sin relleno: 1540 [mL]
- Fuente de irradiación: 1 Lámpara de tubo ultravioleta BULENT F20T8/BLB. Proporciona radiación con un máximo de emisión centrado en torno a 365 [nm]
- Relleno: Anillos Raschig de 5 [mm] de diámetro de vidrio Pyrex.

Fotorreactor II

- Altura: 57 [cm]
- Diámetro interno: 7 [cm]
- Capacidad con relleno: 980 [mL]
- Capacidad sin relleno: 1540 [mL]
- Fuente de irradiación: 1 Lámpara de tubo ultravioleta BULENT F20T8/BLB. Proporciona radiación con un máximo de emisión centrado en torno a 365 [nm]
- Relleno: Anillos Raschig de 5 [mm] de diámetro de vidrio Pyrex, previamente recubiertos con dióxido de titanio.

Fotorreactor III

- Altura: 57 [cm]
- Diámetro interno: 7 [cm]
- Capacidad con relleno: 1000 [mL]
- Capacidad sin relleno: 1540 [mL]
- Fuente de irradiación: 1 Lámpara de tubo ultravioleta BULENT F20T8/BLB. Proporciona radiación con un máximo de emisión centrado en torno a 365 [nm]
- Relleno: Anillos Raschig de 5 [mm] de diámetro de vidrio Pyrex, previamente recubiertos con óxido de zinc.

Bomba peristáltica:

Este equipo transporta la solución a tratar desde la base del fotorreactor hacia la boca de entrada superior del fotorreactor, donde la solución es impulsada a través de la

columna hasta la base de salida y reciclada. El caudal constante de solución a tratar utilizado en los experimentos fue de 150 [mL/min].

Cilindro de oxígeno:

Este cilindro proporciona oxígeno puro en forma constante, hacia la solución a degradar. En las experiencias realizadas se utilizaron caudales de 0,5 y 1,0 [L/min].

Bomba de aire:

Esta bomba permite el suministro de aire atmosférico en forma de burbujeo permanente con un caudal de 2,5 [L/min], a través de la solución que se encuentra agitada en el fotorreactor.

Ozonizador:

Este equipo transforma el oxígeno en ozono a través de un sistema de placas que por acción de la corriente se genera el ozono. Para conocer su flujo se debe hacer una determinación volumétrica con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ como valorante.

2.3. LIMPIEZA Y MANTENCIÓN DEL FOTORREACTOR

Limpieza: Para mantener el fotorreactor en óptimas condiciones es indispensable limpiarlo una vez concluida cada experiencia. Para efectuar la limpieza se circula agua destilada a través de la columna durante 30 [min] siendo después desechada por la base de la columna.

MantenCIÓN: Cuando el fotorreactor no se utilizará por un período de tiempo, ejemplo: un fin de semana, se vacía el reactor fotoquímico y se secan los anillos en la estufa; mientras que la columna se deja secar al aire libre.

2.4. RECUBRIMIENTO DE LOS ANILLOS RASCHIG CON DIÓXIDO DE TITANIO Y ÓXIDO DE ZINC

Los anillos Raschig están fabricados de vidrio Pyrex y tienen un diámetro de 5 [mm]. Para recubrirlos con dióxido de titanio se sumergen en una suspensión sobresaturada compuesta por el semiconductor TiO_2 y agua destilada, por aproximadamente 24 [h]. Transcurrido este tiempo se separan de la solución y se colocan en una estufa a 100 [°C] durante 1 [h] con el fin de secarlos. Posteriormente se colocan durante 2 [h] a 400 [°C] en una mufla, con la finalidad de que el TiO_2 quede adherido a los anillos Raschig.

Para recubrirlos con óxido de zinc se sumergen en una suspensión sobresaturada compuesta por el semiconductor ZnO y agua destilada, por aproximadamente 24 [h]. Transcurrido este tiempo se separan de la solución y se colocan en una estufa a 100 [°C] durante 1 [h] con el fin de secarlos. Posteriormente se colocan durante 4 [h] a 600 [°C] en una mufla, para lograr una fase cristalizada de ZnO en vidrio y con esto garantizar la adherencia del semiconductor a los anillos Raschig.

2.5. PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN ACUOSA DE KETOPROFENO 10[PPM]

Cada ampolla de medicamento Talflex contiene 100 [mg] de ketoprofeno liofilizado, por lo cual se debe disolver el total de la ampolla en agua destilada.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio
- Bidón de 15 [L]

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se disuelve la ampolla en un poco de agua destilada y se traspasa a un vaso de precipitado de 250 [mL]
2. Luego se traspasa a bidón de 15 [L] y con probeta de 1 [L] se llena el bidón hasta completar 10 [L] de solución.
3. Se agita el bidón para obtener una solución bien homogeneizada.
4. Se guarda en lugar fresco y oscuro, evitando la exposición prolongada al sol.

2.6. PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN DILUÍDA DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO 0,097 M, A PARTIR DE SOLUCIÓN CONCENTRADA DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO 9,71 M

Utilizando pipeta aforada de 1 [mL], se toma esta cantidad de solución concentrada de agua oxigenada y se vierte en un matraz de aforo de 100 [mL] y se enrasa con agua destilada.

2.7. DETERMINACIÓN DE LONGITUD DE ONDA MÁXIMA DE ABSORCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE KETOPROFENO 10 [PPM]

Esta determinación se realizó para conocer la longitud de onda máxima en la que el ketoprofeno absorbe la radiación emitida.

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.

- **MATERIALES:**

- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubo de ensayo con tapa rosca.

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasian 10 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno a un tubo de tapa rosca.
2. Se lee la muestra en espectrofotómetro en el rango UV-visible

2.8. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] CON ANILLOS RASCHIG DE VIDRIO PYREX

2.8.1. Experiencia 1: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno sin modificar su pH. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor II, previamente llenado con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
4. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
5. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
6. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.

7. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-2] y [3-3].

2.8.2. Experiencia 2: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno ajustado a pH 10. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- pH-metro Hanna HI 98127

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].
- Vaso de precipitado de 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].
- Hidróxido de sodio app 0,1 N.

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno a un vaso de precipitado de 1 [L] para ajustar pH de solución.
2. Se ajusta a pH 10 la solución con NaOH app. 0,1 N y se homogeniza en agitador magnético
3. Una vez ajustado el pH se traspasa la solución al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
4. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
5. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.

6. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
7. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
8. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
9. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-4] y [3-5].

2.8.3. Experiencia 3: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno ajustado a pH 4. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- pH-metro Hanna HI 98127

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].
- Vaso de precipitado de 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].
- Ácido clorhídrico app 0,1 N.

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno a un vaso de precipitado de 1 [L] para ajustar pH de solución.
2. Se ajusta a pH 4 la solución con HCl app. 0,1 N y se homogeniza toda la solución en agitador magnético
3. Una vez ajustado el pH se traspasa la solución al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
4. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.

5. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
6. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
7. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
8. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
9. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-6] y [3-7].

2.8.4. Experiencia 4: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 1:1

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno con peróxido de hidrógeno en razón molar 1:1. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Agitador magnético, modelo SP18420-26

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].
- Vaso de precipitado 1 [L]
- Micropipeta

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].
- Agua oxigenada 0,097 M.

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasian 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno a un vaso de precipitado de 1 [L].
2. Se agrega con micropipeta 0,65 [mL] de H_2O_2 y se homogeniza en agitador magnético.
3. Una vez homogeneizada se traspasa la solución al fotorreactor II previamente rellenado con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
4. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
5. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
6. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
7. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
8. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
9. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-8] y [3-9].

2.8.5. Experiencia 5: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H_2O_2 en razón molar 5:1

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 4**, sólo se aumentó la concentración de H_2O_2 en la solución a tratar, que en este caso corresponde a 3,25 [mL] para obtener una razón molar de 5:1 con respecto al ketoprofeno. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-10] y [3-11].

2.8.6. Experiencia 6: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H_2O_2 en razón molar 10:1

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 4**, sólo se aumentó la concentración de H_2O_2 en la solución a tratar, que en este caso corresponde a 6,5 [mL] para obtener una razón molar de 10:1 con respecto al ketoprofeno. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-12] y [3-13].

2.8.7. Experiencia 7: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 1:1

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno ajustado a pH 10 con peróxido de hidrógeno en razón molar 1:1. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Agitador magnético, modelo SP18420-26.
- pH-metro Hanna HI 98127.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].
- Vaso de precipitado 1 [L].
- Micropipeta.

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].
- Hidróxido de sodio app 0,1 N.
- Agua oxigenada 0,097 M.

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno a un vaso de precipitado de 1 [L].
2. Se ajusta a pH 10 la solución con NaOH app. 0,1 N.
3. Se agrega con micropipeta 0,65 [mL] de H₂O₂ y se homogeniza toda la solución en agitador magnético.
4. Una vez homogeneizada se traspasa la solución al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
5. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.

6. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
7. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
8. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
9. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
10. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-14] y [3-15].

2.8.8. Experiencia 8: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 5:1

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 7**, sólo se aumentó la concentración de H₂O₂ en la solución a tratar, que en este caso corresponde a 3,25 [mL] para obtener una razón molar de 5:1 con respecto al ketoprofeno. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-16] y [3-17].

2.8.9. Experiencia 9: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 10:1

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 7**, sólo se aumentó la concentración de H₂O₂ en la solución a tratar, que en este caso corresponde a 6,5 [mL] para obtener una razón molar de 10:1 con respecto al ketoprofeno. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-18] y [3-19].

2.8.10. Experiencia 10: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con H₂O₂ en razón molar 1:1

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno ajustado a pH 4 y con peróxido de hidrógeno en razón molar 1:1. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

• **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Agitador magnético, modelo SP18420-26.

- pH-metro Hanna HI 98127.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].
- Vaso de precipitado 1 [L].
- Micropipeta.

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].
- Ácido clorhídrico app 0,1 N.
- Agua oxigenada 0,097 M.

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasian 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno a un vaso de precipitado de 1 [L].
2. Se ajusta a pH 4 la solución con HCl app. 0,1 N.
3. Se agrega con micropipeta 0,65 [mL] de H_2O_2 y se homogeniza toda la solución en agitador magnético.
4. Una vez homogeneizada se traspasa la solución al fotorreactor II previamente rellenado con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
5. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
6. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
7. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
8. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
9. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
10. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-20] y [3-21].

2.8.11. Experiencia 11: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con H₂O₂ en razón molar 5:1

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 10**, sólo se aumentó la concentración de H₂O₂ en la solución a tratar, que en este caso corresponde a 3,25 [mL] para obtener una razón molar de 5:1 con respecto al ketoprofeno. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-22] y [3-23].

2.8.12. Experiencia 12: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con H₂O₂ en razón molar 10:1

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 10**, sólo se aumentó la concentración de H₂O₂ en la solución a tratar, que en este caso corresponde a 6,5 [mL] para obtener una razón molar de 10:1 con respecto al ketoprofeno. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-24] y [3-25].

2.8.13. Experiencia 13: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire burbujeado

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno con aire burbujeado. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Burbujeador de aire.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se burbujea la solución en el fotorreactor con aire a un caudal de 2,5 [L/min]
4. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
5. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
6. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
7. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
8. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-26] y [3-27].

2.8.14. Experiencia 14: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire burbujead

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 13**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 10 con NaOH aprox 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-28] y [3-29].

2.8.15. Experiencia 15: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con aire burbujead

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 13**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 4 con HCl aprox 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-30] y [3-31].

2.8.16. Experiencia 16: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Cilindro de oxígeno.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se burbujea la solución en el fotorreactor con oxígeno de caudal 0,5 [L/min]
4. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
5. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
6. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
7. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
8. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-32] y [3-33].

2.8.17. Experiencia 17: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 16**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 10 con NaOH aprox 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-34] y [3-35].

2.8.18. Experiencia 18: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 16**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 4 con HCl aprox 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-36] y [3-37].

2.8.19. Experiencia 19: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 16**, pero el caudal de oxígeno se aumenta a 1,0 [L/min]. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-38] y [3-39].

2.8.20. Experiencia 20: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 16**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 10 con NaOH aprox 0,1 N y el caudal de oxígeno se aumenta a 1,0 [L/min]. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-40] y [3-41].

2.8.21. Experiencia 21: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 16**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 4 con HCl aprox 0,1 N y el caudal de oxígeno se aumenta a 1,0 [L/min]. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-42] y [3-43].

2.9. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] USANDO TiO₂ INMOVILIZADO EN ANILLOS RASCHIG

2.9.1. Experiencia 22: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig

Se circula por el fotorreactor I 1030 [mL] de solución de ketoprofeno con TiO₂ inmovilizado en anillos Raschig. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.

- **ATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango UV-visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 1030 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor I previamente relleno con TiO₂ inmovilizado en anillos Raschig.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
4. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
5. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
6. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
7. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-44] y [3-45].

2.9.2. Experiencia 23: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 22**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 10 con NaOH aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-46] y [3-47].

2.9.3. Experiencia 24: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 22**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 4 con HCl aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-48] y [3-49].

2.9.4. Experiencia 25: Adsorción de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig y en ausencia de luz UV

Se circula por el fotorreactor I 1030 [mL] de solución de ketoprofeno con ZnO inmovilizado en anillos Raschig y en ausencia de luz UV. La adsorción se monitoreó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango UV-visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasian 1030 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor I previamente relleno con TiO₂ inmovilizado en anillos Raschig.

2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
4. Se toman muestras durante la experiencia a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
5. Una vez finalizada la degradación se detiene el tiempo y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
6. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
7. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-50] y [3-51].

2.9.5. Experiencia 26: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Se circula por el fotorreactor I 1030 [mL] de solución de ketoprofeno con aire burbujeadado y TiO₂ inmovilizado en anillos Raschig. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Burbujeador de aire.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango UV-visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 1030 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor I previamente relleno con TiO₂ inmovilizado en anillos Raschig.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se burbujea la solución en el fotorreactor con aire a un caudal de 2,5 [L/min]

4. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
5. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
6. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se desconecta el burbujeador de aire, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
7. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
8. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-52] y [3-53].

2.9.6. Experiencia 27: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 25**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 10 con NaOH aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-54] y [3-55].

2.9.7. Experiencia 28: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 25**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 4 con HCl aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-56] y [3-57].

2.9.8. Experiencia 29: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Se circula por el fotorreactor I 1030 [mL] de solución de ketoprofeno con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO₂ inmovilizado en anillos Raschig. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

• **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Cilindro de oxígeno

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango UV-visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 1030 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor I previamente relleno con TiO_2 inmovilizado en anillos Raschig.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se burbujea la solución en el fotorreactor con oxígeno puro a un caudal de 0,5 [L/min]
4. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
5. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
6. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se cierra el manómetro de oxígeno, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
7. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
8. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-58] y [3-59].

2.9.9. Experiencia 30: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10 con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO_2 adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 28**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 10 con NaOH aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-60] y [3-61].

2.9.10. Experiencia 31: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 28**, sólo se ajustó la solución a tratar a pH 4 con HCl aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-62] y [3-63].

2.9.11. Experiencia 32: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 28**, sólo se aumenta el flujo de oxígeno a 1,0 [L/min]. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-64] y [3-65].

2.9.12. Experiencia 33: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10 con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 28**, sólo se aumenta el caudal de oxígeno a 1,0 [L/min] y se ajusta a 10 el pH de la solución a tratar con NaOH aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-66] y [3-67].

2.9.13. Experiencia 34: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 28**, sólo se aumenta el caudal de oxígeno a 1,0 [L/min] y se ajusta a 4 el pH de la solución a tratar con HCl aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-68] y [3-69].

2.10. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] USANDO ZNO INMOVILIZADO EN ANILLOS RASCHIG

2.10.1. Experiencia 35: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando ZnO adherido a anillos Raschig

Se circula por el fotorreactor III 1000 [mL] de solución de ketoprofeno con ZnO inmovilizado en anillos Raschig. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango UV-visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasian 1000 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor III previamente relleno con ZnO inmovilizado en anillos Raschig.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
4. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
5. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
6. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.

7. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-70] y [3-71].

2.10.2. Experiencia 36: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, usando ZnO adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 34**, sólo se ajusta a 10 el pH de la solución a tratar con NaOH aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-72] y [3-73].

2.10.3. Experiencia 37: Adsorción de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar usando ZnO adherido a anillos Raschig y en ausencia de luz UV

Se circula por el fotorreactor III 1000 [mL] de solución de ketoprofeno, con ZnO inmovilizado en anillos Raschig y en ausencia de luz UV. La adsorción se monitoreó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango UV-visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasian 1000 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor III previamente relleno con ZnO inmovilizado en anillos Raschig.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se comienza a medir con cronómetro el tiempo.

4. Se toman muestras durante la experiencia a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
5. Una vez finalizada la degradación se detiene el tiempo y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
6. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
7. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-74] y [3-75].

2.10.4. Experiencia 38: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y usando ZnO adherido a anillos Raschig

Se circula por el fotorreactor III 1000 [mL] de solución de ketoprofeno con aire burbujado y ZnO inmovilizado en anillos Raschig. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-160 1PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango UV-visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasian 1000 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor III previamente relleno con ZnO inmovilizado en anillos Raschig.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se burbujea la solución en el fotorreactor con aire a un caudal de 2,5 [L/min]
4. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
5. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.

6. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se desconecta el burbujeador de aire, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
7. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
8. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-76] y [3-77].

2.10.5. Experiencia 39: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire y usando ZnO adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 36**, sólo se ajusta a 10 el pH de la solución a tratar con NaOH aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-78] y [3-79].

2.10.6. Experiencia 40: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y usando ZnO adherido a anillos Raschig

Se circula por el fotorreactor III 1000 [mL] de solución de ketoprofeno con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y ZnO inmovilizado en anillos Raschig. La degradación fotocatalítica se realizó en un tiempo total de 2 [h].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Cilindro de oxígeno

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango UV-visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se trasvasijan 1000 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor III previamente relleno con ZnO inmovilizado en anillos Raschig.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Se burbujea la solución en el fotorreactor con oxígeno puro a un caudal de 0,5 [L/min]
4. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
5. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
6. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se cierra el manómetro de oxígeno, se apaga la lámpara y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
7. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
8. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-80] y [3-81].

2.10.7. Experiencia 41: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y usando ZnO adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 38**, sólo se ajusta a 10 el pH de la solución a tratar con NaOH aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-82] y [3-83].

2.10.8. Experiencia 42: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y usando ZnO adherido a anillos Raschig

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 38**, sólo se aumenta el caudal de oxígeno a 1,0 [L/min]. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-84] y [3-85].

2.10.9. Experiencia 43: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y usando ZnO adherido a anillos Raschig.

Esta experiencia es similar a la **Experiencia 38**, sólo se aumenta el flujo de oxígeno a 1,0 [L/min] y se ajusta a 10 el pH de la solución a tratar con NaOH aprox. 0,1 N. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-86] y [3-87].

2.11. **PUESTA A PUNTO DE EQUIPO OZONIZADOR PARA DEGRADACIONES CON OZONO**

Para efectuar las degradaciones con ozono como agente oxidante, es necesario conocer el flujo inyectado a la solución. Ya que el ozonizador usado en este trabajo es un prototipo diseñado en la U.T.F.S.M., cuyo flujo era algo inestable, para un determinado caudal alimentado de aire, se procedió a calcularlo mediante una determinación volumétrica con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ estándar como valorante de una solución de KI burbujeada con ozono de flujo desconocido.

Esta medición se debe realizar antes y después de usar el equipo ozonizador para conocer su flujo y tomar las medidas pertinentes en el caso de que varíe en forma significativa.

- **EQUIPOS:**

- Balanza digital, SARTORIUS modelo BP211D, sensibilidad 0,01 [mg]
- Agitador magnético, modelo SP18420-26

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio
- Frasco ámbar de 1 [L]

- **REACTIVOS:**

- $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ p.a
- Cloroformo p.a
- Carbonato de sodio p.a
- Yodato de potasio p.a.
- Ácido sulfúrico 0,5 [M]

- Yoduro de potasio p.a.
- Almidón 1%
- Fosfato monoácido de sodio p.a.
- Fosfato diácido de sodio p.a.

2.11.1. Preparación de 1 [L] de solución estándar de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se pesan 24,82 [g] de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y se disuelven en 500 [mL] de agua destilada recién hervida y enfriada.
2. Se adicionan 5 gotas de cloroformo como preservante.
3. Se transfiere a un matraz aforado de 1 [L] y se afora.
4. Se transfiere inmediatamente a un frasco ámbar de 1 [L].

2.11.2. Preparación de 100 [mL] de solución de KIO_3 0,1 N

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se pesan con precisión de 0,01 [mg] 0,3567 [g] de KIO_3 .
2. Se transfiere a un matraz aforado de 100 [mL] y se enrasa con agua destilada

2.11.3. Estandarización de la solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ frente a KIO_3

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se transfieren 20 [mL] de yodato de potasio a un matraz Erlenmeyer.
2. Se agregan 1 [g] de KI sólido y 5 [mL] de ácido sulfúrico 0,5 M.
3. Se titula inmediatamente el yodo liberado con tiosulfato de sodio hasta que el color de la solución sea amarillo pálido.
4. Se agrega 1 [mL] de indicador almidón.
5. Se continúa la titulación hasta que el indicador vire de azul a incoloro.

2.11.4. Preparación de 1 [L] de solución tampón pH 7

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se pesan 1,8 [g] de Na_2HPO_4 y se transfiere cuantitativamente a un matraz aforado de 1 [L], con agua desionizada.
2. Se pesan 1,7 [g] de NaH_2PO_4 y se transfiere al mismo matraz.
3. Se enrasa el matraz con agua desionizada.

2.11.5. Determinación volumétrica de ozono

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se ponen en un matraz Erlenmeyer 50 [mL] de solución tampón pH 7 y 1 [g] de KI.
2. Se burbujea corriente de ozono de concentración desconocida durante 2 [min], controlado con cronómetro.
3. Se agrega 5 [mL] de ácido sulfúrico 0,5 M.
4. Se titula con solución de tiosulfato de sodio 0,1 N hasta coloración amarillo pálido.
5. Se agrega indicador almidón y se continúa la titulación hasta viraje de azul a incoloro.
6. Calcular [mg de O₃/min].

2.12. DEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] CON OZONO Y ANILLOS RASCHIG DE VIDRIO PYREX

2.12.1. Experiencia 44: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con ozono

Se circula por el fotoreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno con ozono burbujeado. La degradación se realizó en un tiempo total de 50 [min].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Burbujeador de aire
- Ozonizador

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se mide el flujo inicial de ozono según el procedimiento **2.11.5**
2. Se trasvasijan 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
3. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
4. Se enciende bomba de aire.
5. Se enciende campana de extracción de gases y equipo ozonizador.
6. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
7. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
8. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara, la campana y el ozonizador. A continuación se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
9. Se mide el flujo final de ozono según el procedimiento **2.11.5**
10. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
11. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas **[3-88]** y **[3-89]**.

2.12.2. Experiencia 45: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con ozono

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno ajustado a pH 10 con ozono burbujeado. La degradación se realizó en un tiempo total de 50 [min].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- pH-metro Hanna HI 98127.
- Burbujeador de aire.
- Ozonizador.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].
- Vaso de precipitado de 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].
- NaOH app. 0,1 N

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se mide el flujo inicial de ozono según el procedimiento **2.11.5**
2. Se ajusta a pH 10 la solución con NaOH app. 0,1 N y se homogeniza en agitador magnético
3. Una vez ajustado el pH se traspa la solución al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
4. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
5. Se enciende bomba de aire.
6. Se enciende campana de extracción de gases y equipo ozonizador.
7. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
8. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
9. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara, la campana y el ozonizador. A continuación se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
10. Se mide el flujo final de ozono según el procedimiento **2.11.5**
11. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
12. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas **[3-90]** y **[3-91]**.

2.12.3. Experiencia 46: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con ozono

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno ajustado a pH 4 con ozono burbujeado. La degradación se realizó en un tiempo total de 50 [min].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- pH-metro Hanna HI 98127.
- Burbujeador de aire.
- Ozonizador.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].
- Vaso de precipitado de 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].
- HCl app. 0,1 N

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se mide el flujo inicial de ozono según el procedimiento 2.11.5
2. Se ajusta a pH 4 la solución con HCl app. 0,1 N y se homogeniza en agitador magnético
3. Una vez ajustado el pH se traspa la solución al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
4. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
5. Se enciende bomba de aire.
6. Se enciende campana de extracción de gases y equipo ozonizador.
7. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende la lámpara y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.

8. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
9. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga la lámpara, la campana y el ozonizador. A continuación se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
10. Se mide el flujo final de ozono según el procedimiento **2.11.5**
11. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua y se registran los resultados.
12. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-92] y [3-93].

2.12.4. Experiencia 47: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con ozono y ausencia de luz UV

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno con ozono burbujeado y en ausencia de luz UV. La degradación se realizó en un tiempo total de 50 [min].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Burbujeador de aire
- Ozonizador

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se mide el flujo inicial de ozono según el procedimiento **2.11.5**
2. Se trasvasian 980 [mL] de solución 10 [ppm] de ketoprofeno al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
3. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.

4. Se enciende bomba de aire y campana de extracción de gases.
5. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende el equipo ozonizador y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
6. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
7. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga el ozonizador, se detiene la bomba, se apaga la campana y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
8. Se mide el flujo final de ozono según el procedimiento **2.11.5**
9. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
10. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas **[3-94]** y **[3-95]**.

2.12.5. Experiencia 48: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con ozono y ausencia de luz UV

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno ajustado a pH 10, con ozono burbujeado y en ausencia de luz UV. La degradación se realizó en un tiempo total de 50 [min].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- pH-metro Hanna HI 98127.
- Burbujeador de aire.
- Ozonizador.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].
- Vaso de precipitado de 1 [L].

- **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].
- NaOH app. 0,1 N

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se mide el flujo inicial de ozono según el procedimiento 2.11.5
2. Se ajusta a pH 10 la solución con NaOH app. 0,1 N y se homogeniza en agitador magnético
3. Una vez ajustado el pH se traspa la solución al fotorreactor II previamente relleno con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
4. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
5. Se enciende bomba de aire y campana de extracción de gases.
6. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende el equipo ozonizador y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
7. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
8. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga el ozonizador, se detiene la bomba, se apaga la campana y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
9. Se mide el flujo final de ozono según el procedimiento 2.11.5
10. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua.
11. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-96] y [3-97].

2.12.6. Experiencia 49: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con ozono y ausencia de luz UV

Se circula por el fotorreactor II relleno de anillos Raschig de vidrio Pyrex 980 [mL] de solución de ketoprofeno ajustado a pH 4, con ozono burbujeado y en ausencia de luz UV. La degradación se realizó en un tiempo total de 50 [min].

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- pH-metro Hanna HI 98127.
- Burbujeador de aire.
- Ozonizador.

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.

- Tubos con tapa rosca.
- Probeta de vidrio 1 [L].
- Vaso de precipitado de 1 [L].

• **REACTIVOS:**

- Solución de ketoprofeno 10 [ppm].
- HCl app. 0,1 N

• **PROCEDIMIENTO:**

1. Se mide el flujo inicial de ozono según el procedimiento **2.11.5**
2. Se ajusta a pH 4 la solución con HCl app. 0,1 N y se homogeniza en agitador magnético
3. Una vez ajustado el pH se traspa la solución al fotorreactor II previamente rellenado con anillos Raschig de vidrio Pyrex.
4. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
5. Se enciende bomba de aire y campana de extracción de gases.
6. Se toma la primera muestra de 10 [mL] en un tubo de tapa rosca, correspondiendo ésta al tiempo cero de reacción; luego se enciende el equipo ozonizador y se comienza a medir con cronómetro el tiempo.
7. Se toman muestras durante la fotodegradación a los 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 [min] de reacción, todas de 10 [mL] en tubos con tapa rosca.
8. Una vez finalizada la fotodegradación se detiene el tiempo, se apaga el ozonizador, se detiene la bomba, se apaga la campana y se procede a leer en espectrofotómetro UV-Visible.
9. Se mide el flujo final de ozono según el procedimiento **2.11.5**
10. Finalizada toda la experiencia se limpia el fotorreactor con agua y se registran los resultados.
11. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas **[3-98]** y **[3-99]**.

2.13. PREPARACIÓN DE CURVA DE CALIBRACIÓN KETOPROFENO

La ampolla de Talflex viene con un contenido total de 150 [mg], correspondiendo 100 [mg] a ketoprofeno (aprox. 67% de la masa total) y 50 [mg] de excipientes. Por lo tanto para determinar la cantidad exacta de ketoprofeno a pesar se debe considerar ese porcentaje como la pureza para calcular la masa real del fármaco.

- **EQUIPOS:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC.
- Bomba peristáltica Masterflex L/S modelo 7554-85.
- Balanza digital, SARTORIUS modelo BP211D, sensibilidad 0,01 [mg]

- **MATERIALES:**

- Material usual de laboratorio.
- Cubetas para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango UV-visible.

- **REACTIVOS:**

- Ampolla de Talflex
- Agua destilada

- **PROCEDIMIENTO:**

1. Se pesan 0,0020; 0,0050 y 0,0100 [g] de Talflex, traspasar cada pesada cuantitativamente a matraces aforados de 250 [mL] y enrasar con agua destilada.
2. Se activa la bomba peristáltica para alimentar todo el sistema.
3. Trasvasiar con pipeta Pasteur el contenido de cada matraz a cubetas de absorción en el rango UV.
4. Medir la absorbancia a 260 [nm] en espectrofotómetro.
5. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla [3-1]**

2.14. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO

El método se basa principalmente en la oxidación de la materia orgánica por el dicromato de potasio en medio de ácido sulfúrico, con lo cual el carbono es convertido en CO₂ y el hidrógeno en agua. Esta determinación se realiza a reflujo cerrado, con un tiempo de 2 [h]. Los recipientes de reacción son tubos de digestión tapados. El consumo de oxígeno se mide a 600 [nm] en espectrofotómetro frente a un blanco y cuantificado en base a estándares.

Esta determinación se realizó a las experiencias 26 y 38 descritas en las secciones 2.9.5 y 2.10.4 respectivamente. Para ambos casos, la DQO a calcular se efectuó a la muestra inicial (0 minutos) y muestra final (120 minutos).

- **EQUIPOS**

- Espectrofotómetro UV-Visible, SHIMADZU modelo UV-1601 PC
- Termorreactor VELP Scientifica, modelo ECO 16

- **MATERIALES**

- Cubetas de vidrio para espectrofotometría de 1 [cm] de paso de luz en el rango visible.
- Pipeta aforada 2 [mL]

- **REACTIVOS**

- Tubos DQO Hanna HI 93754B-25, rango de 0 a 1500 [mg de O₂ / L]
- Agua desionizada

- **PROCEDIMIENTO**

1. Con pipeta aforada tomar 2,0 [mL] de muestra inicial.
2. Trasvasijar a un tubo Hanna HI 93754B-25 que ya contiene los reactivos preparados.
3. Se coloca la tapa rosca y se agita por inmersión tres a cuatro veces.
4. Se coloca el tubo en el termorreactor.
5. Se realiza la experiencia en duplicado.
6. Con pipeta aforada tomar 2,0 [mL] de muestra final.
7. Trasvasijar a un tubo Hanna HI 93754B-25 que ya contiene los reactivos preparados.
8. Se coloca la tapa rosca y se agita por inmersión tres a cuatro veces.
9. Se coloca el tubo en el termorreactor.
10. Se realiza la experiencia en duplicado.
11. Con pipeta aforada tomar 2,0 [mL] de agua desionizada.
12. Trasvasijar a un tubo Hanna HI 93754B-25 que ya contiene los reactivos preparados.
13. Se coloca la tapa rosca y se agita por inmersión tres a cuatro veces.
14. Se coloca el tubo en el termorreactor.
15. Se realiza la experiencia en duplicado.
16. Una vez instalados los tubos en el termorreactor, se llevan a 150 [°C] por 2 [h].
17. Una vez cumplido el tiempo de digestión dejar enfriar los tubos en oscuridad.
18. Trasvasijar con pipeta el contenido sobrenadante de cada tubo a cubetas de absorción.
19. Medir la absorbancia a 600 [nm] en espectrofotómetro.

20. Determinar [ppm] de oxígeno consumido, de acuerdo a curva de calibración estándar.

21. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-100] y [3-101]

2.15. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, DBO₅

El método se basa en determinar el oxígeno consumido por microorganismos, cuando se incuba una muestra en la oscuridad a 20 [°C], durante 5 días, determinándose el oxígeno disuelto con el método del electrodo de membrana.

Es necesario tener una población de estos microorganismos capaces de oxidar la materia orgánica de la muestra. El inóculo adecuado es un efluente de un sistema de tratamiento biológico que procesa un residuo líquido. Si este inóculo no está disponible, se pueden utilizar otras alternativas como por ejemplo desechos domésticos. Para esta experiencia el inóculo a utilizar fue un residuo doméstico (solución de yogurt)

Esta determinación se realizó a las experiencias 26 y 38 descritas en las secciones 2.9.5 y 2.10.4 respectivamente. Para ambos casos, la DBO₅ a calcular se efectuó a la muestra inicial (0 minutos) y muestra final (120 minutos).

• EQUIPOS

- Botella de incubación de capacidad de 300 [mL]
- Agitador magnético, modelo SP18420-26
- Handylab OX12, SCHOTT
- Electrodo Sauerstoffsensor; Oxygen Sensor 9009/61
- Balanza digital, SARTORIUS AG.GOTTINGEN modelo BP211D, sensibilidad 0,01 [mg].

• MATERIALES

- Material usual de laboratorio

• REACTIVOS

- Fosfato diácido de potasio, KH₂PO₄, p.a. Merck
- Fosfato ácido de potasio, K₂HPO₄, p.a. Merck
- Fosfato ácido de sodio heptahidratado, Na₂HPO₄*7H₂O, p.a. Merck
- Cloruro de amonio, NH₄Cl, p.a. Merck

- Sulfato de magnesio heptahidratado, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, p.a. Merck
- Cloruro de calcio CaCl_2 , p.a. Merck
- Cloruro férrico hexahidratado, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, p.a. Merck
- Glucosa, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, p.a. Merck
- Ácido glutámico, $\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_4$, p.a. Merck

• SOLUCIONES

- Solución tampón de fosfato: pesar 0,85 [g] de KH_2PO_4 , 2,175 [g] de K_2HPO_4 , 3,44 [g] de $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 0,17 [g] de NH_4Cl , disolver en agua destilada y diluir a 100 [mL].
- Solución de sulfato de magnesio heptahidratado: pesar 2,25 [g] de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y diluir a 100 [mL] con agua destilada.
- Solución de cloruro de calcio: pesar 2,75 [g] de CaCl_2 y diluir a 100 [mL] con agua destilada.
- Solución de cloruro férrico hexahidratado: pesar 0,025 [g] de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y diluir a 100 [mL] con agua destilada.
- Solución de glucosa-ácido glutámico: pesar 37,5 [mg] de glucosa y 37,5 [mg] de ácido glutámico, mezclar ambos reactivos y diluir a 250 [mL] con agua destilada. Preparar inmediatamente antes de usar.

• PROCEDIMIENTO

1. Preparación de agua de dilución

- Se coloca en un envase de 5,0 [L] aproximadamente 3,0 [L] de agua destilada
- Se agrega por cada 1,0 [L] de agua destilada, 1,0 [mL] de cada una de las siguientes soluciones: tampón fosfato, sulfato de magnesio, cloruro de calcio y cloruro férrico.
- Saturar la solución con oxígeno disuelto mediante aireación con aire filtrado, libre de sustancias orgánicas.

2. Preparación y determinación de blancos, controles e inóculos

- Preparar en las botellas de incubación un blanco de agua de dilución y blanco de agua de dilución, más 0,2 [mL] de solución de yogurt (inóculo).
- Preparar 2 botellas de incubación con 3,0 [mL] de solución de glucosa-ácido glutámico y llenar con agua de dilución.
- Se toma una de las botellas llenas, se introduce una barra de agitación y se agita vigorosamente

- Se introduce el electrodo medidor de oxígeno en la botella evitando la formación de burbujas y se registra el valor de oxígeno disuelto cuando la lectura alcance un valor estable.
- Se tapan las botellas consiguiendo el sello de agua, para evitar que entre aire a la botella durante la incubación. Este sello se logra llenando la botella a rebalse y poniendo cuidadosamente el tapón de modo que al taparla se desplace el exceso de agua sin dejar burbujas.
- Incubar las botellas en ausencia de luz a 20 [°C] durante 5 días. Transcurrido este tiempo introducir nuevamente el electrodo medidor de oxígeno en la botella, evitando la formación de burbujas y se registra el valor de oxígeno disuelto cuando la lectura alcance un valor estable.

3. Determinación de oxígeno disuelto en muestra inicial

- Se coloca en botellas de incubación 1, 2 y 3 [mL] de muestra inicial de ketoprofeno y se llenan con agua de dilución.
- De la misma forma se coloca en botellas de incubación 2,0 [mL] de muestra inicial de ketoprofeno, más 0,2 [mL] de inóculo y se llenan con agua de dilución.
- Se toma una de las botellas llenas, se introduce una barra de agitación y se agita vigorosamente.
- Se introduce el electrodo medidor de oxígeno en la botella evitando la formación de burbujas y se registra el valor de oxígeno disuelto cuando la lectura alcance un valor estable.
- Se tapan las botellas consiguiendo el sello de agua, para evitar que entre aire a la botella durante la incubación. Este sello se logra llenando la botella a rebalse y poniendo cuidadosamente el tapón de modo que al taparla se desplace el exceso de agua sin dejar burbujas.
- Incubar las botellas en ausencia de luz a 20 [°C] durante 5 días. Transcurrido este tiempo introducir nuevamente el electrodo medidor de oxígeno en la botella, evitando la formación de burbujas y se registra el valor de oxígeno disuelto cuando la lectura alcance un valor estable.

4. Determinación de oxígeno disuelto en muestra final

- Se coloca en botellas de incubación 1, 2 y 3 [mL] de muestra final de ketoprofeno y se llenan con agua de dilución
- De la misma forma se coloca en botellas de incubación 2,0 [mL] de muestra final de ketoprofeno, más 0,2 [mL] de inóculo y se llenan con agua de dilución

- Se toma una de las botellas llenas se introduce una barra de agitación y se agita vigorosamente
- Se introduce el electrodo medidor de oxígeno en la botella evitando la formación de burbujas y se registra el valor de oxígeno disuelto cuando la lectura alcance un valor estable.
- Se tapan las botellas consiguiendo el sello de agua, para evitar que entre aire a la botella durante la incubación. Este sello se logra llenando la botella a rebalse y poniendo cuidadosamente el tapón de modo que al taparla se desplace el exceso de agua sin dejar burbujas.
- Incubar las botellas en ausencia de luz a 20 [°C] durante 5 días. Transcurrido este tiempo introducir nuevamente el electrodo medidor de oxígeno en la botella, evitando la formación de burbujas y se registra el valor de oxígeno disuelto cuando la lectura alcance un valor estable.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-102] y [3-103]

2.16. **DETERMINACIÓN DE TOXICIDAD AGUDA**

El ensayo de toxicidad aguda con el sistema MICROTOX fue realizado siguiendo el método desarrollado por Bulich y col. (1979) y descrito en el Manual de Operaciones de Beckman (1982). Este ensayo utiliza cepas liofilizadas de una bacteria marina luminiscente seleccionada, *Photobacterium Phosphoreum* NRRL-B-11177 (con una densidad de bacteria viable de 10⁶ células) bastante sensibles a gran variedad de compuestos tóxicos, inclusive cuando están presentes en bajas concentraciones.

Cualquier alteración en el metabolismo de esas bacterias afecta la producción de luz y esas variaciones pueden ser medidas a través de un fotómetro. Cuando hay sustancias tóxicas presentes en la muestra, ellas interfieren en el sistema enzimático de la bacteria (enzima luciferasa) y su luz decrece. Como la cantidad de luz es proporcional a la concentración de sustancias tóxicas, la toxicidad relativa de la muestra se puede calcular.

Esta determinación se realizó a las experiencias 26 descrita en la sección 2.9.5., en los tiempos 0; 60 y 120 [min], y 38 descrita en la sección 2.10.4., en los tiempos 0 y 120 [min].

- **EQUIPO**

- Analizador de toxicidad aguda, MICROTOX modelo 500 Analyzer.

- **MATERIALES**

- Cubetas de medición
- Micropipetas de 1000 y 50 [μL]

- **REACTIVOS**

- Bacteria liofilizada, Microtox Acute Reagent.

- **SOLUCIONES**

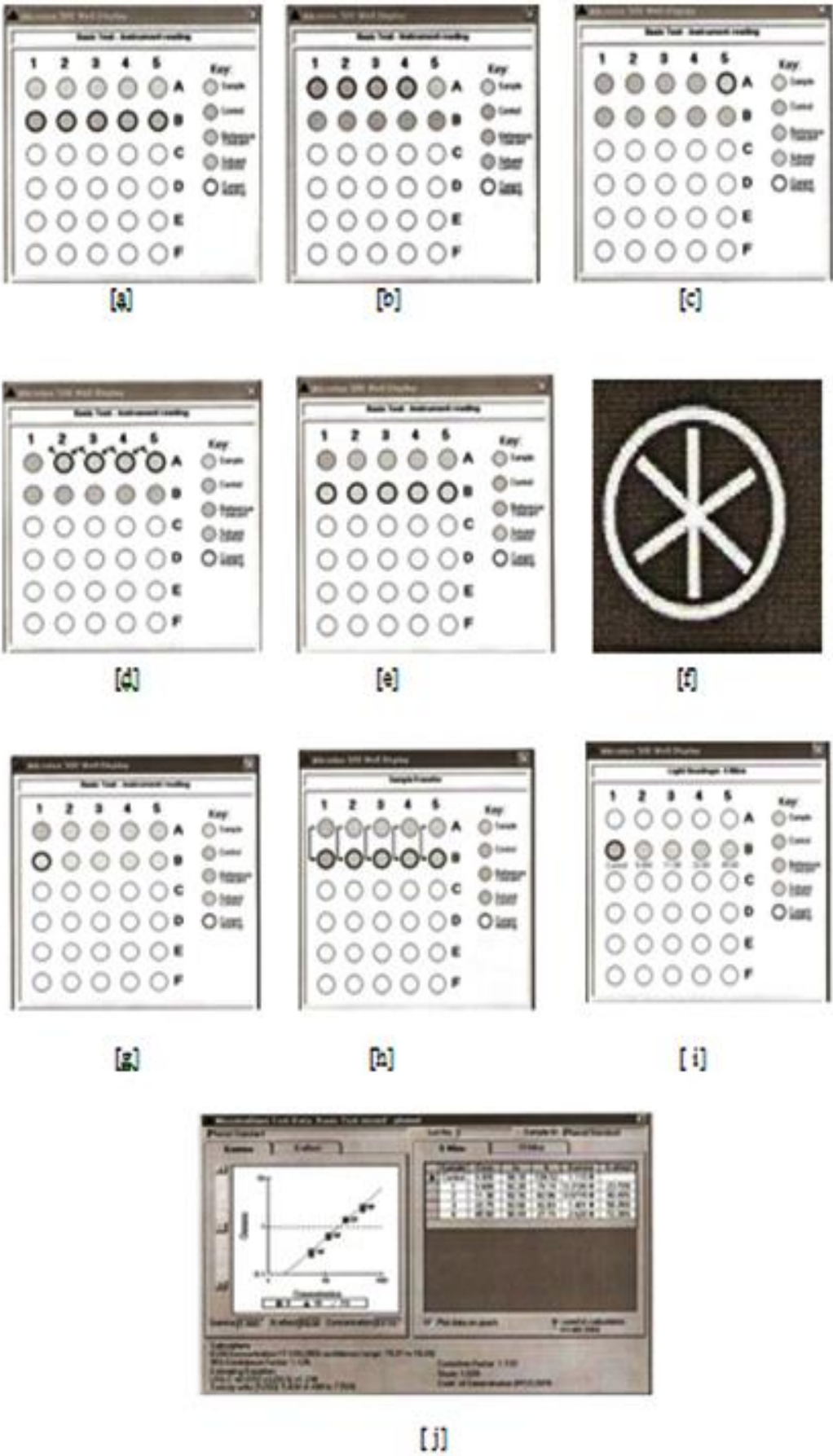
- Solución de reconstitución.
- Solución diluyente.
- Solución osmótica (OAS).

- **PROCEDIMIENTO**

1. Poner las cubetas en la incubadora y en la celda de reactivación de la bacteria.
2. Agregar 1 [mL] de solución de reconstitución en la celda de reagente. Esta es la celda donde se reactiva la bacteria.
3. Adicionar 0,5 [mL] de solución diluyente en las celdas de la incubadora de las filas B, D y F. Figura 2-1a de las 10 figuras presentadas.
4. Adicionar 1 [mL] de solución diluyente en las celdas de la incubadora de las filas A, C y E. No se debe adicionar diluyente en las celdas A5, C5 y E5. Figura 2-1b de las 10 figuras presentadas.
5. A la celda A5, C5 y E5 adicionar 2,5 [mL] de muestra más 0,250 [mL] de solución osmótica (OAS). Descartar 0,750 [mL] desde la celda ya preparada y homogeneizada. Figura 2-1c de las 10 figuras presentadas.
6. Realizar dilución seriada 1:2 transfiriendo 1 [mL] mezclando en cada transferencia. Descartar 1 [mL] de la última celda. OBS: A1 no lleva muestra. Figura 2-1d de las 10 figuras presentadas.
7. Esperar 5 [min].
8. Reconstituir un vial de Microtox Acute Toxicity Reagent (bacteria), el cual debe ser realizado de la siguiente manera:
 - a. Remover un vial con bacteria del freezer y abrirlo con el mínimo contacto con el fin de prevenir el calentamiento de la bacteria.
 - b. Agitar el vial para asegurar que el pellet de bacteria seca esté en el fondo del vial.

- c. Tomar la cubeta que se instaló en la celda del reagente la cual tiene la solución reconstituyente fría y ponerla rápidamente en el vial con el pellet.
 - d. Mezclar tres a cuatro veces (agitar con la mano) y retornar la solución a la cubeta original.
 - e. Mezclar la bacteria con la solución aspirando con la micropipeta de 0,5 [mL], realizar al menos diez veces la homogeneización.
 - f. La bacteria reconstituida deber ser usada dentro de tres horas una vez realizada la reconstitución.
- 9.** Transferir 10 [µL] de la solución con la bacteria la cual se encuentra en la celda de reagente. Fila B, D y F. Figura 2-1e de las 10 figuras presentadas.
 - 10.** Mezclar las cubetas agitando con la micropipeta. Esperar 15 [min].
 - 11.** Poner las cubetas de las filas B, D y F en la celda de lectura y presionar el botón SET. En la pantalla de lectura debe aparecer una luz verde indicando que la luz de la bacteria es cuantificable en el equipo. Figura 2-1f de las 10 figuras presentadas.
 - 12.** Cuando todas las cubetas de las filas B, D y F arrojen la luz verde, presionar la tecla de espacio comenzando el test de toxicidad.
 - 13.** Poner las cubetas de las filas B, D y F en la celda de lectura y presionar el botón READ de acuerdo a lo solicitado en well display. Figura 2-1g de las 10 figuras presentadas.
 - 14.** Transferir inmediatamente 0,5 [mL] de la solución. Ir mezclando con la micro pipeta en cada transferencia. Figura 2-1h de las 10 figuras presentadas.
 - 15.** Apretar la tecla de espacio al terminar las transferencias.
 - 16.** Leer desde la cubeta B1, instalando la cubeta en la celda de lectura y presionar READ. Figura 2-1i de las 10 figuras presentadas.
 - 17.** Aparecerá el reloj contando 5 [min] y 15 [min].
 - 18.** Leer desde la cubeta en la celda B1, instalando la cubeta en la celda de lectura y presionar READ.
 - 19.** Test realizado. Aparecerá cuadro de diálogo Basic Test Record. En la parte inferior se informa la Unidad de Toxicidad (TU) al 50 % de decaimiento de la luz por la bacteria. Figura 2-1j de las 10 figuras presentadas.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas [3-104], [3-105], [3-106] y [3-107].



Fuente: Software MICROTOX

Figura 2-1. Operación del analizador de toxicidad aguda, MICROTOX modelo 500 Analyzer

2.17. DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL

La cuantificación del carbono se efectúa utilizando un equipo analizador de carbono orgánico total (COT). Automáticamente se inyecta un volumen adecuado de muestra a un horno manteniendo a 680 [°C] provisto de un catalizador de oxidación. Debido a la temperatura elevada y al catalizador, el agua se evapora y el carbono de los compuestos orgánicos e inorgánicos se transforma a CO₂. El dióxido de carbono, producto de la oxidación, es transportado por una corriente de gas portador (aire ultra puro con 0 % de CO₂) hasta el equipo Infrarrojo-analizador.

Este análisis fue realizado a la muestra inicial y final de la experiencia 26, descrita en la sección 2.9.5.

- **EQUIPO**

- Analizador de Carbono Orgánico Total (COT). SHIMADZU modelo 5000 A.

- **MATERIALES**

- Material usual de laboratorio

- **REACTIVOS**

- Agua Milli-Q

- **PROCEDIMIENTO**

1. Se inyecta la muestra inicial y el equipo COT interpola automáticamente en curva de calibración, ya existente, proporcionando la concentración en [ppm] de carbono orgánico total.
2. Se inyecta la muestra final y el equipo COT interpola automáticamente en curva de calibración, ya existente, proporcionando la concentración en [ppm] de carbono orgánico total.

Los resultados se muestran en la tabla **[3-108]**.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS OBTENIDOS

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL ANÁLISIS POR ESPECTROFOTOMETRÍA ULTRAVIOLETA PARA KETOPROFENO

Tabla 3-1. Curva de calibración para el análisis por espectrofotometría ultravioleta para ketoprofeno

Concentración [ppm]	Absorbancia A _{260,40} [nm]
0,00	0,0000
5,33	0,2646
14,93	0,7047
26,39	1,2247

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

3.2. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] CON ANILLOS RASCHIG DE VIDRIO PYREX.

Tabla 3-2. Experiencia 1: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno (KET), pH sin modificar

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,5907	12,58	100,00%
5	0,5831	12,42	98,71%
10	0,5475	11,65	92,69%
20	0,4958	10,53	83,93%
30	0,4171	8,83	70,61%
40	0,3665	7,73	62,05%
50	0,3298	6,94	55,83%
60	0,2770	5,79	46,89%
90	0,2135	4,42	36,14%
120	0,1802	3,70	30,51%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-3. Condiciones usadas en Experiencia 1

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	12,58 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,20
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-4. Experiencia 2: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH

10

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6411	13,68	100,00%
5	0,6266	13,36	97,74%
10	0,6031	12,85	94,07%
20	0,5315	11,30	82,90%
30	0,4548	9,64	70,94%
40	0,3895	8,23	60,75%
50	0,3330	7,01	51,94%
60	0,2843	5,95	44,35%
90	0,2178	4,51	33,97%
120	0,1747	3,58	27,25%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-5. Condiciones usadas en Experiencia 2

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,68 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,04
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-6. Experiencia 3: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH

4

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6071	12,94	100,00%
5	0,6010	12,81	99,00%
10	0,5852	12,46	96,39%
20	0,5166	10,98	85,09%
30	0,4185	8,86	68,93%
40	0,3962	8,37	65,26%
50	0,3331	7,01	54,87%
60	0,2881	6,03	47,46%
90	0,1964	4,05	32,35%
120	0,1665	3,40	27,43%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-7. Condiciones usadas en Experiencia 3

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	12,94 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,03
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-8. Experiencia 4: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 1:1

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6245	13,32	100,00%
5	0,6212	13,24	99,47%
10	0,5945	12,66	95,20%
20	0,5151	10,95	82,48%
30	0,4447	9,42	71,21%
40	0,3855	8,14	61,73%
50	0,3322	6,99	53,19%
60	0,2899	6,07	46,42%
90	0,2263	4,70	36,24%
120	0,1913	3,94	30,63%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-9. Condiciones usadas en Experiencia 4

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,32 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,10
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	1:1
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-10. Expeiencia 5: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 5:1

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] K	% Remanente K
0	0,6436	13,73	100,00%
5	0,6436	13,73	100,00%
10	0,6102	13,00	94,81%
20	0,5494	11,69	85,36%
30	0,4769	10,12	74,10%
40	0,4026	8,51	62,55%
50	0,3572	7,53	55,50%
60	0,3080	6,46	47,86%
90	0,2402	4,99	37,32%
120	0,1965	4,05	30,53%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-11. Condiciones usadas en Experiencia 5

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,73 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,30
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	5:1
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-12. Experiencia 6: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con H₂O₂ en razón molar 10:1

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6418	13,69	100,00%
5	0,6361	13,57	99,11%
10	0,6108	13,02	95,17%
20	0,5334	11,34	83,11%
30	0,4564	9,68	71,11%
40	0,3851	8,13	60,00%
50	0,3394	7,14	52,88%
60	0,3052	6,40	47,55%
90	0,2324	4,83	36,21%
120	0,2028	4,19	31,60%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-13. Condiciones usadas en Experiencia 6

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,69 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,00
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	10:1
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-14. Experiencia 7: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 1:1

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6281	13,39	100,00%
5	0,6077	12,95	96,75%
10	0,5579	11,87	88,82%
20	0,4805	10,20	76,50%
30	0,4056	8,58	64,58%
40	0,3459	7,28	55,07%
50	0,2832	5,93	45,09%
60	0,2396	4,98	38,15%
90	0,1688	3,45	26,87%
120	0,1334	2,69	21,24%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-15. Condiciones usadas en Experiencia 7

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,39 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,09
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	1:1
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-16. Experiencia 8: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 5:1

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6196	13,21	100,00%
5	0,6163	13,14	99,47%
10	0,5723	12,19	92,37%
20	0,4885	10,37	78,84%
30	0,4048	8,56	65,33%
40	0,3433	7,23	55,41%
50	0,2754	5,76	44,45%
60	0,2418	5,03	39,03%
90	0,1688	3,45	27,24%
120	0,1427	2,89	23,03%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-17. Condiciones usadas en Experiencia 8

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,21 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,07
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	5:1
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-18. Experiencia 9: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con H₂O₂ en razón molar 10:1

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,0} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6248	13,32	100,00%
5	0,6014	12,82	96,25%
10	0,5889	12,54	94,25%
20	0,5092	10,82	81,50%
30	0,4325	9,16	69,22%
40	0,3606	7,60	57,71%
50	0,3079	6,46	49,28%
60	0,2656	5,55	42,51%
90	0,2150	4,45	34,41%
120	0,1974	4,07	31,59%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-19. Condiciones usadas en Experiencia 9

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,32 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,07
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	10:1
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-20. Experiencia 10: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con H₂O₂ en razón molar 1:1

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6130	13,07	100,00%
5	0,6234	13,29	101,70%
10	0,5688	12,11	92,79%
20	0,4595	9,74	74,96%
30	0,3469	7,31	56,59%
40	0,2905	6,09	47,39%
50	0,2351	4,89	38,35%
60	0,1951	4,02	31,83%
90	0,1353	2,73	22,07%
120	0,1041	2,05	16,98%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-21. Condiciones usadas en Experiencia 10

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,07 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,05
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	1:1
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-22. Experiencia 11: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con H₂O₂ en razón molar 5:1

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6084	12,97	100,00%
5	0,5828	12,41	95,79%
10	0,5591	11,90	91,90%
20	0,5010	10,64	82,35%
30	0,4479	9,49	73,62%
40	0,3877	8,19	63,72%
50	0,3396	7,14	55,82%
60	0,3014	6,32	49,54%
90	0,2303	4,78	37,85%
120	0,2002	4,13	32,91%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-23. Condiciones usadas en Experiencia 11

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	12,97 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,02
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	5:1
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-24. Experiencia 12: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4 con H₂O₂ en razón molar 10:1

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,0} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6304	13,44	100,00%
5	0,5892	12,55	93,46%
10	0,5468	11,63	86,74%
20	0,4456	9,44	70,69%
30	0,3505	7,38	55,60%
40	0,2748	5,75	43,59%
50	0,2292	4,76	36,36%
60	0,1967	4,06	31,20%
90	0,1530	3,11	24,27%
120	0,1373	2,77	21,78%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-25. Condiciones usadas en Experiencia 12

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,44 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,07
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	10:1
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-26. Experiencia 13: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6467	13,79	100,00%
5	0,6172	13,16	95,44%
10	0,5768	12,28	89,19%
20	0,4825	10,24	74,61%
30	0,4071	8,61	62,95%
40	0,3459	7,29	53,49%
50	0,2997	6,29	46,34%
60	0,2634	5,50	40,73%
90	0,2020	4,17	31,24%
120	0,1794	3,68	27,74%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-27. Condiciones usadas en Experiencia 13

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,79 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,00
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	2,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-28. Experiencia 14: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,5754	12,25	100,00%
5	0,5625	11,97	97,76%
10	0,5471	11,64	95,08%
20	0,4674	9,92	81,23%
30	0,3887	8,21	67,55%
40	0,3322	6,99	57,73%
50	0,2770	5,79	48,14%
60	0,2281	4,73	39,64%
90	0,1604	3,27	27,88%
120	0,1218	2,43	21,17%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-29. Condiciones usadas en Experiencia 14

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	12,25 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,02
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	2,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-30. Experiencia 15: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con aire

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6003	12,79	100,00%
5	0,5895	12,55	98,20
10	0,5686	12,10	94,72
20	0,5016	10,65	83,56
30	0,4368	9,25	72,76
40	0,3683	7,77	61,35
50	0,3076	6,45	51,24
60	0,2748	5,75	45,78
90	0,1876	3,86	31,25
120	0,1567	3,19	26,10

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-31. Condiciones usadas en Experiencia 15

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	12,79 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	3,99
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	2,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-32. Experiencia 16: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6124	13,05	100,00%
5	0,6222	13,26	101,60%
10	0,6091	12,98	99,46%
20	0,5297	11,26	86,50%
30	0,4617	9,79	75,39%
40	0,4069	8,61	66,44%
50	0,3590	7,57	58,62%
60	0,3268	6,87	53,36%
90	0,2618	5,46	42,75%
120	0,2328	4,84	38,01%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-33. Condiciones usadas en Experiencia 16

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,05 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,10
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	0,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-34. Experiencia 17: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6053	12,90	100,00%
5	0,6031	12,85	99,64%
10	0,5693	12,12	94,05%
20	0,5099	10,84	84,24%
30	0,4359	9,23	72,01%
40	0,3765	7,95	62,20%
50	0,3329	7,00	55,00%
60	0,2987	6,26	49,35%
90	0,2343	4,87	38,71%
120	0,2118	4,38	34,99%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-35. Condiciones usadas en Experiencia 17

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	12,90 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,02
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	0,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-36. Experiencia 18: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min]

Tiempo [min]	Absorbancia A _{259,8} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6339	13,52	100,00%
5	0,6102	13,01	96,26%
10	0,6040	12,87	95,28%
20	0,5173	10,99	81,61%
30	0,4371	9,26	68,95%
40	0,3748	7,91	59,13%
50	0,3260	6,85	51,43%
60	0,3009	6,31	47,47%
90	0,2106	4,36	33,22%
120	0,1749	3,58	27,59%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-37. Condiciones usadas en Experiencia 18

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,52 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,00
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	0,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-38. Experiencia 19: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6265	13,36	100,00%
5	0,6268	13,37	100,05%
10	0,5975	12,73	95,37%
20	0,5217	11,09	83,27%
30	0,4794	10,17	76,52%
40	0,4159	8,80	66,38%
50	0,3795	8,01	60,57%
60	0,3403	7,16	54,32%
90	0,2889	6,05	46,11%
120	0,2560	5,34	40,86%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-39. Condiciones usadas en Experiencia 19

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,36 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,20
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	1,0 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-40. Experiencia 20: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6145	13,09	100,00%
5	0,6141	13,09	99,93%
10	0,6089	12,98	99,09%
20	0,5488	11,68	89,31%
30	0,4922	10,45	80,10%
40	0,4557	9,66	74,16%
50	0,4136	8,75	67,31%
60	0,3922	8,29	63,82%
90	0,3273	6,88	53,26%
120	0,2855	5,98	46,46%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-41. Condiciones usadas en Experiencia 20

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,09 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,01
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	1,0 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-42. Experiencia 21: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min]

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6154	13,12	100,00%
5	0,6091	12,98	98,98%
10	0,5757	12,26	93,55%
20	0,5084	10,80	82,61%
30	0,4578	9,71	74,39%
40	0,4014	8,49	65,23%
50	0,3577	7,54	58,12%
60	0,3224	6,78	52,39%
90	0,2635	5,50	42,82%
120	0,2256	4,68	36,66%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-43. Condiciones usadas en Experiencia 21

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,12 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,01
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	1,0 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

3.3. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] USANDO TiO₂ INMOVILIZADO EN ANILLOS RASCHIG

Tabla 3-44. Experiencia 22: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,5} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,5945	12,67	100,00%
5	0,5413	11,52	91,05%
10	0,4993	10,61	83,99%
20	0,4335	9,18	72,92%
30	0,3612	7,62	60,76%
40	0,2961	6,21	49,81%
50	0,2395	4,98	40,29%
60	0,1852	3,81	31,15%
90	0,0775	1,48	13,04%
120	0,0330	0,51	5,55%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-45. Condiciones usadas en Experiencia 22

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	12,67 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,20
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-46. Experiencia 23: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,8} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6311	13,46	100,00%
5	0,5898	12,56	93,46%
10	0,5502	11,71	87,18%
20	0,4769	10,12	75,57%
30	0,4104	8,68	65,03%
40	0,3375	7,10	53,48%
50	0,2727	5,70	43,21%
60	0,2087	4,32	33,07%
90	0,0780	1,49	12,36%
120	0,0219	0,27	3,47%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-47. Condiciones usadas en Experiencia 23

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	13,46 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,05
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-48. Experiencia 24: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,4725	10,02	100,00%
5	0,4553	9,65	96,36%
10	0,3900	8,24	82,54%
20	0,3108	6,53	65,78%
30	0,2500	5,21	52,91%
40	0,1980	4,08	41,90%
50	0,1494	3,03	31,62%
60	0,1168	2,33	24,72%
90	0,0448	0,77	9,48%
120	0,0281	0,41	5,95%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-49. Condiciones usadas en Experiencia 24

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	10,02 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,01
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-50. Experiencia 25: Adsorción de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando TiO₂ adherido a anillos Raschig y en ausencia de luz UV

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6016	12,82	100,00%
5	0,6122	13,05	101,76%
10	0,5979	12,74	99,38%
20	0,6011	12,80	99,92%
30	0,6235	13,29	103,64%
40	0,6195	13,21	102,98%
50	0,6104	13,01	101,46%
60	0,6208	13,24	103,19%
90	0,6040	12,87	100,40%
120	0,5991	12,77	99,58%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-51. Condiciones usadas en Experiencia 25

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	12,82 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,10
Longitud irradiación	-
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-52. Experiencia 26: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6144	13,10	100,00%
5	0,5770	12,29	93,91%
10	0,5354	11,39	87,14%
20	0,4686	9,94	76,27%
30	0,3481	7,33	56,66%
40	0,2974	6,24	48,40%
50	0,2150	4,45	34,99%
60	0,1616	3,30	26,30%
90	0,0612	1,12	9,96%
120	0,0243	0,33	3,96%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-53. Condiciones usadas en Experiencia 26

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	13,10 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,10
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	2,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-54. Experiencia 27: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6056	12,90	100,00%
5	0,6173	13,16	101,93%
10	0,5781	12,31	95,46%
20	0,4816	10,22	79,52%
30	0,4019	8,50	66,36%
40	0,3300	6,94	54,49%
50	0,2620	5,47	43,26%
60	0,2040	4,21	33,69%
90	0,0869	1,68	14,35%
120	0,0435	0,74	7,18%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-55. Condiciones usadas en Experiencia 27

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	12,90 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,05
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	2,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-56. Experiencia 28: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,5707	12,15	100,00%
5	0,5104	10,85	89,43%
10	0,4598	9,75	80,57%
20	0,3715	7,84	65,10%
30	0,2936	6,15	51,45%
40	0,2200	4,56	38,55%
50	0,1658	3,39	29,05%
60	0,1235	2,47	21,64%
90	0,0494	0,87	8,66%
120	0,0240	0,32	4,21%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-57. Condiciones usadas en Experiencia 28

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	12,15 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,00
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	2,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-58. Experiencia 29: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,0} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,5771	12,29	100,00%
5	0,5223	11,10	90,50%
10	0,4459	9,45	77,27%
20	0,3569	7,52	61,84%
30	0,2843	5,95	49,26%
40	0,1913	3,94	33,15%
50	0,1315	2,64	22,79%
60	0,0898	1,74	15,56%
90	0,0190	0,21	3,29%
120	0,0120	0,058	2,08%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-59. Condiciones usadas en Experiencia 29

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	12,29 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,00
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	0,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-60. Experiencia 30: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6147	13,10	100,00%
5	0,5466	11,63	88,92%
10	0,5239	11,14	85,23%
20	0,4275	9,05	69,55%
30	0,3461	7,29	56,30%
40	0,2913	6,10	47,39%
50	0,2059	4,25	33,50%
60	0,1572	3,20	25,57%
90	0,0530	0,94	8,62%
120	0,0182	0,19	2,96%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-61. Condiciones usadas en Experiencia 30

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	13,10 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,07
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	0,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-62. Experiencia 31: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,5992	12,77	100,00%
5	0,5536	11,78	92,39%
10	0,4874	10,35	81,34%
20	0,4094	8,66	68,32%
30	0,3199	6,72	53,39%
40	0,2437	5,07	40,67%
50	0,1824	3,75	30,44%
60	0,1359	2,74	22,68%
90	0,0444	0,76	7,41%
120	0,0114	0,045	1,90%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-63. Condiciones usadas en Experiencia 31

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	12,77 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,01
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	0,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-64. Experiencia 32: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig.

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,5585	11,89	100,00%
5	0,5085	10,80	91,05%
10	0,4110	8,69	73,59%
20	0,3276	6,89	58,66%
30	0,2389	4,97	42,78%
40	0,1604	3,27	28,72%
50	0,1099	2,18	19,68%
60	0,0669	1,25	11,98%
90	0,0121	0,061	2,17%
120	0,0021	*N.D.	0,38%

*N.D: No detecta (Límite de detección)

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-65. Condiciones usadas en Experiencia 32

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	11,89 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,00
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	1,0 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-66. Experiencia 33: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6179	13,17	100,00%
5	0,5365	11,41	86,83%
10	0,4983	10,58	80,64%
20	0,3917	8,28	63,39%
30	0,3317	6,98	53,68%
40	0,2170	4,49	35,12%
50	0,1602	3,27	25,93%
60	0,1064	2,10	17,22%
90	0,0214	0,26	3,46%
120	0,0000	0,00	0,00%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-67. Condiciones usadas en Experiencia 33

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	13,17 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,06
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	1,0 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-68. Experiencia 34: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y TiO₂ adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,5784	12,32	100,00%
5	0,5529	11,77	95,59%
10	0,4976	10,57	86,03%
20	0,4021	8,50	69,52%
30	0,3246	6,82	56,12%
40	0,2450	5,10	42,36%
50	0,1898	3,91	32,81%
60	0,1332	2,68	23,03%
90	0,0283	0,41	4,89%
120	0,0082	*N.D.	1,42%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

*N.D: No detecta (Límite de detección)

Tabla 3-69. Condiciones usadas en Experiencia 34

Volumen de solución tratada	1030 [mL]
Concentración inicial KET	12,32 [nm]
pH inicial de la solución tratada	3,92
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	1,0 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

3.4. FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] USANDO ZNO INMOVILIZADO EN ANILLOS RASCHIG

Tabla 3-70. Experiencia 35: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando ZnO adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,5} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6312	13,46	100,00%
5	0,5580	11,88	88,40%
10	0,5148	10,94	81,56%
20	0,4431	9,39	70,20%
30	0,3699	7,80	58,60%
40	0,3044	6,39	48,23%
50	0,2589	5,40	41,02%
60	0,2129	4,41	33,73%
90	0,1259	2,52	19,95%
120	0,0717	1,35	11,36%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-71. Condiciones usadas en Experiencia 35

Volumen de solución tratada	1000 [mL]
Concentración inicial KET	13,46 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,00
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-72. Experiencia 36: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, usando ZnO adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6058	12,91	100,00%
5	0,5424	11,54	89,53%
10	0,4958	10,53	81,84%
20	0,4063	8,59	67,07%
30	0,3346	7,04	55,23%
40	0,2706	5,65	44,67%
50	0,2112	4,37	34,86%
60	0,1667	3,41	27,52%
90	0,0732	1,38	12,08%
120	0,0336	0,53	5,55%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-73. Condiciones usadas en Experiencia 36

Volumen de solución tratada	1000 [mL]
Concentración inicial KET	12,91 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,01
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-74. Experiencia 37: Adsorción de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, usando ZnO adherido a anillos Raschig y en ausencia de luz UV

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,0} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6042	12,88	100,00%
5	0,6172	13,16	102,15%
10	0,5931	12,64	98,16%
20	0,6060	12,92	100,30%
30	0,6111	13,03	101,14%
40	0,6108	13,02	101,09%
50	0,6053	12,90	100,18%
60	0,6130	13,07	101,46%
90	0,6078	12,95	100,60%
120	0,5981	12,74	98,99%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-75. Condiciones usadas en Experiencia 37

Volumen de solución tratada	1000 [mL]
Concentración inicial KET	12,88 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,00
Longitud irradiación	-
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-76. Experiencia 38: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,8} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6101	13,00	100,00%
5	0,5513	11,73	90,36%
10	0,4762	10,11	78,05%
20	0,4545	9,64	74,50%
30	0,3719	7,85	60,96%
40	0,2794	5,85	45,80%
50	0,2268	4,71	37,17%
60	0,1952	4,02	31,99%
90	0,1083	2,14	17,75%
120	0,0599	1,10	9,82%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-77. Condiciones usadas en Experiencia 38

Volumen de solución tratada	1000 [mL]
Concentración inicial KET	13,00 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,20
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	2,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-78. Experiencia 39: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6226	13,27	100,00%
5	0,5779	12,31	92,82%
10	0,5388	11,46	86,54%
20	0,4532	9,61	72,79%
30	0,3821	8,07	61,37%
40	0,3143	6,60	50,48%
50	0,2632	5,49	42,27%
60	0,2172	4,50	34,89%
90	0,1178	2,35	18,92%
120	0,0665	1,24	10,68%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-79. Condiciones usadas en Experiencia 39

Volumen de solución tratada	1000 [mL]
Concentración inicial KET	13,27 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,10
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	2,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-80. Experiencia 40: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y ZnO adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6483	13,83	100,00%
5	0,5759	12,26	88,83%
10	0,5437	11,57	83,87%
20	0,4613	9,78	71,16%
30	0,3934	8,31	60,68%
40	0,3114	6,54	48,03%
50	0,2639	5,51	40,71%
60	0,2148	4,45	33,13%
90	0,1171	2,33	18,06%
120	0,0608	1,11	9,38%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-81. Condiciones usadas en Experiencia 40

Volumen de solución tratada	1000 [mL]
Concentración inicial KET	13,83 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,30
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	0,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-82. Experiencia 41: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 0,5 [L/min] y ZnO adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6138	13,08	100,00%
5	0,5596	11,91	91,17%
10	0,5769	12,29	93,99%
20	0,5431	11,55	88,48%
30	0,5024	10,67	81,85%
40	0,4606	9,77	75,04%
50	0,4286	9,08	69,83%
60	0,3959	8,37	64,50%
90	0,2975	6,24	48,47%
120	0,2136	4,42	34,80%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-83. Condiciones usadas en Experiencia 41

Volumen de solución tratada	1000 [mL]
Concentración inicial KET	13,08 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	9,93
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	0,5 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-84. Experiencia 42: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y ZnO adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6178	13,17	100,00%
5	0,5770	12,29	93,40%
10	0,5366	11,41	86,86%
20	0,4689	9,95	75,90%
30	0,3910	8,26	63,29%
40	0,3265	6,86	52,85%
50	0,2725	5,70	44,11%
60	0,2283	4,74	36,95%
90	0,1278	2,56	20,69%
120	0,0695	1,30	11,25%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-85. Condiciones usadas en Experiencia 42

Volumen de solución tratada	1000 [mL]
Concentración inicial KET	13,17 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	5,99
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	1,0 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-86. Experiencia 43: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con oxígeno puro de caudal 1,0 [L/min] y ZnO adherido a anillos Raschig

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6334	13,51	100,00%
5	0,5801	12,35	91,59%
10	0,5807	12,37	91,68%
20	0,5477	11,65	86,47%
30	0,5081	10,80	80,22%
40	0,4548	9,64	71,80%
50	0,4058	8,58	64,07%
60	0,3866	8,17	61,04%
90	0,2848	5,96	44,96%
120	0,1912	3,94	45,07%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-87. Condiciones usadas en Experiencia 43

Volumen de solución tratada	1000 [mL]
Concentración inicial KET	13,51 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,04
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal oxígeno	1,0 [L/min]
Tiempo total de tratamiento	120 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

3.5. DEGRADACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS DE KETOPROFENO 10 [PPM] CON OZONO Y ANILLOS RASCHIG DE VIDRIO PYREX

Tabla 3-88. Experiencia 44: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con ozono

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6310	13,45	100,00%
5	0,5452	11,60	86,40%
10	0,4122	8,72	65,32%
15	0,2524	5,26	40,00%
20	0,1560	3,18	24,72%
30	0,0848	1,63	13,44%
40	0,0538	0,96	8,53%
50	0,0396	0,65	6,28%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-89. Condiciones usadas en Experiencia 44

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,45 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,10
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Flujo ozono	10,35 [mg/min]
Tiempo total de tratamiento	50 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-90. Experiencia 45: Degradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con ozono

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,2} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6017	12,82	100,00%
5	0,4091	8,65	67,99%
10	0,2524	5,26	41,95%
15	0,1466	2,97	24,36%
20	0,0847	1,63	14,08%
30	0,0334	0,52	5,55%
40	0,0334	0,52	5,55%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-91. Condiciones usadas en Experiencia 45

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	12,82 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,02
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Flujo ozono	11,45 [mg/min]
Tiempo total de tratamiento	40 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-92. Experiencia 46: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con ozono

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6096	12,99	100,00%
5	0,4369	9,25	71,67%
10	0,2640	5,51	43,31%
15	0,1371	2,77	22,49%
20	0,0709	1,33	11,63%
30	0,0253	0,35	4,15%
40	0,0153	0,13	2,51%
50	0,0110	0,037	1,80%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-93. Condiciones usadas en Experiencia 46

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	12,99 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,00
Longitud irradiación	365 [nm]
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Flujo ozono	10,79 [mg/min]
Tiempo total de tratamiento	50 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-94. Experiencia 47: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con ozono y en ausencia de luz UV

Tiempo [min]	Absorbancia A _{259,6} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6119	13,04	100,00%
5	0,4794	10,17	78,35%
10	0,3221	6,77	52,64%
15	0,2319	4,82	37,90%
20	0,1569	3,19	25,64%
30	0,0812	1,55	13,27%
40	0,0453	0,78	7,40%
50	0,0336	0,52	5,49%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-95. Condiciones usadas en Experiencia 47

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,04 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	6,00
Longitud irradiación	-
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Flujo ozono	10,86 [mg/min]
Tiempo total de tratamiento	50 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-96. Experiencia 48: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 10, con ozono y en ausencia de luz UV

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6299	13,43	100,00%
5	0,4595	9,74	72,95%
10	0,2991	6,27	47,48%
15	0,1779	3,65	28,24%
20	0,1207	2,41	19,16%
30	0,0479	0,83	7,60%
40	0,0368	0,59	5,84%
50	0,0271	0,38	4,30%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-97. Condiciones usadas en Experiencia 48

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,43 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	10,00
Longitud irradiación	-
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Flujo ozono	11,03 [mg/min]
Tiempo total de tratamiento	50 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-98. Experiencia 49: Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH 4, con ozono y en ausencia de luz UV

Tiempo [min]	Absorbancia A _{260,4} [nm]	Concentración [ppm] KET	% Remanente KET
0	0,6124	13,05	100,00%
5	0,5065	10,76	82,71%
10	0,3680	7,76	60,09%
15	0,2704	5,65	44,15%
20	0,2072	4,28	33,83%
30	0,1183	2,35	19,32%
40	0,0718	1,35	11,72%
50	0,0553	0,99	9,03%

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-99. Condiciones usadas en Experiencia 49

Volumen de solución tratada	980 [mL]
Concentración inicial KET	13,05 [ppm]
pH inicial de la solución tratada	4,08
Longitud irradiación	-
Razón molar inicial KET/H ₂ O ₂	-
Caudal aire	-
Flujo ozono	11,29 [mg/min]
Tiempo total de tratamiento	50 [min]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

3.6. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO

Tabla 3-100. Determinación de DQO a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 26 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig)

Tiempo [min]	DQO [ppm]
0	57,25
120	N.D.*

(*) Límite de detección: 0,5 [ppm]

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-101. Determinación de DQO a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 38 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig)

Tiempo [min]	DQO [ppm]
0	32,50
120	81,75

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

3.7. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO,
DBO₅

Tabla 3-102. Determinación de DBO₅ a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 26 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig)

Tiempo [min]	DBO ₅ [ppm]
0	26,87
120	23,77

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-103. Determinación de DBO₅ a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 38 (Fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig)

Tiempo [min]	DBO ₅ [ppm]
0	27,90
120	16,50

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

3.8. DETERMINACIÓN DE TOXICIDAD AGUDA

Tabla 3-104. Determinación de toxicidad a la muestras 0, 60 y 120 [min]
correspondientes a la experiencia 26 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de
ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig)
Determinación de toxicidad aguda a los 5 [min]

[min]	EC	TU
0	22,94	4,36
60	27,10	3,69
120	46,30	2,16

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-105. Determinación de toxicidad aguda a los 15 [min]

[min]	EC	TU
0	16,42	6,09
60	19,34	5,17
120	29,41	3,40

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-106. Determinación de toxicidad a la muestras inicial y final correspondientes a
la experiencia 38 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin
modificar, con aire y ZnO adherido a anillos Raschig)

Determinación de toxicidad aguda a los 5 [min]

[min]	EC	TU
0	22,94	4,36
120	7,64	13,00

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

Tabla 3-107. Determinación de toxicidad aguda a los 15 [min]

[min]	EC	TU
0	16,42	6,09
120	1,54	64,90

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

3.9. DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL

Tabla 3-108. Determinación de TOC a la muestras inicial y final correspondientes a la experiencia 26 (fotodegradación de una solución 10 [ppm] de ketoprofeno, pH sin modificar, con aire y TiO₂ adherido a anillos Raschig)

[min]	ppm C
0	11,71
120	11,27

Fuente: Elaboración propia, basado en los resultados del experimento

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presenta una discusión de los resultados obtenidos en cada experiencia, orientada a explicar el comportamiento del analito ketoprofeno frente a los diferentes tratamientos estudiados para degradarlo y la influencia de las variaciones en las condiciones tales como: pH, presencia de irradiación, efecto del semiconductor, efecto del oxidante, combinaciones entre estas condiciones y ozonación.

Se preparó la curva de calibración de analito con el objetivo de poder conocer mediante regresión lineal, la concentración de ketoprofeno a identificar, en unidades de [ppm]. Esta curva se construyó en el rango 0 hasta aproximadamente 26,4 [ppm], apreciándose que a concentraciones superiores se excede la absorbancia máxima que establece la ley de Lambert-Beer.

Los resultados de las experiencias de fotólisis, descritas en las Tablas **3-2, 3-4 y 3-6**, permiten apreciar que en cada una de estas tres experiencias (**experiencias 1, 2 y 3**) se logró una degradación de alrededor de un 72%. Se observa que la fotólisis se hace más lenta al cabo de 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 1, 2 y 3 se resumen en las Tablas **3-3, 3-5 y 3-7** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-1, B-2 y B-3** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotólisis en combinación con peróxido, descritas en las Tablas **3-8, 3-10 y 3-12**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias a pH natural (**experiencias 4, 5 y 6**) se logró una degradación de aproximadamente un 70%. Nuevamente, la fotólisis procede más lentamente después de los 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 4, 5 y 6 se resumen en las Tablas **3-9, 3-11 y 3-13** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-4, B-5 y B-6** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotólisis en combinación con peróxido, descritas en las Tablas **3-14, 3-16 y 3-18**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias a pH 10 (**experiencias 7, 8 y 9**) se logró una degradación de aproximadamente un 75%. La degradación es más notoria durante los primeros 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 7, 8 y 9 se resumen en las Tablas **3-15, 3-17 y 3-19** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-7, B-8 y B-9** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotólisis en combinación con peróxido, descritas en las Tablas **3-20, 3-22 y 3-24**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias a pH 4 (**experiencias 10, 11 y 12**) se logró una degradación de aproximadamente un 76%. La degradación es más notoria durante los primeros 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 10, 11 y 12 se

resumen en las Tablas **3-21**, **3-23** y **3-25** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-10**, **B-11** y **B-12** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotólisis en combinación con aire a un caudal de 2,5 [L/min], descritas en las Tablas **3-26**, **3-28** y **3-30**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias (**experiencias 13, 14 y 15**) se logró una degradación de aproximadamente un 75%. La mayor degradación para las tres experiencias se observa entre los tiempos 0 y 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 13, 14 y 15 se resumen en las Tablas **3-27**, **3-29** y **3-31** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-13**, **B-14** y **B-15** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotólisis en combinación con oxígeno puro a un caudal de 0,5 [L/min], descritas en las Tablas **3-32**, **3-34** y **3-36**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias (**experiencias 16, 17 y 18**) se logró una degradación promedio de aprox. un 67%. La mayor degradación para las tres experiencias se observa entre los tiempos 0 y 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 16, 17 y 18 se resumen en las Tablas **3-33**, **3-35** y **3-37** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-16**, **B-17** y **B-18** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotólisis en combinación con oxígeno puro a un caudal de 1,0 [L/min], descritas en las Tablas **3-38**, **3-40** y **3-42**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias (**experiencias 19, 20 y 21**) se logró una degradación aproximada al 59%. La mayor degradación para las tres experiencias se observa entre los tiempos 0 y 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 19, 20 y 21 se resumen en las Tablas **3-39**, **3-41** y **3-43** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-19**, **B-20** y **B-21** respectivamente.

De las primeras 21 experiencias se puede establecer lo siguiente:

- En la experiencia 10 (pH 4, razón KET/H₂O₂= 1:1) se logró una degradación en torno al 84%.
- En las degradaciones con oxígeno puro, puede apreciarse que al aumentar el caudal de oxígeno al doble, disminuye la eficiencia del proceso.

Los resultados de las experiencias de fotocátalisis con TiO₂ como semiconductor, descritas en las Tablas **3-44**, **3-46** y **3-48**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias (**experiencias 22, 23 y 24**) se logró una degradación promedio de aproximadamente un 95%. La degradación se hace más lenta después de

los 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 22, 23 y 24 se resumen en las Tablas **3-45, 3-47 y 3-49** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-22, B-23 y B-24** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotocátalisis con TiO_2 como semiconductor y en combinación con aire a un caudal de 2,5 [L/min], descritas en las Tablas **3-52, 3-54 y 3-56**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias (**experiencias 26, 27 y 28**) se logró una degradación promedio de aprox. un 95%. La mayor degradación para las tres experiencias se observa entre los tiempos 0 y 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 26, 27 y 28 se resumen en las Tablas **3-53, 3-55 y 3-57** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-26, B-27 y B-28** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotocátalisis con TiO_2 como semiconductor y en combinación con oxígeno puro a un caudal de 0,5 [L/min], descritas en las Tablas **3-58, 3-60 y 3-62**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias (**experiencias 29, 30 y 31**) se logró una degradación de aproximadamente un 98%. La mayor degradación para las tres experiencias se observa entre los tiempos 0 y 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 29, 30 y 31 se resumen en las Tablas **3-59, 3-61 y 3-63** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-29, B-30 y B-31** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotocátalisis con TiO_2 como semiconductor y en combinación con oxígeno puro a un caudal de 1,0 [L/min], descritas en las Tablas **3-64, 3-66 y 3-68**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias (**experiencias 32, 33 y 34**) se logró una degradación de aproximadamente un 99%. La mayor degradación para las tres experiencias se observa entre los tiempos 0 y 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 32, 33 y 34 se resumen en las Tablas **3-65, 3-67 y 3-69** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-32, B-33 y B-34** respectivamente.

Para las experiencias 22 a 34 (con TiO_2) se puede establecer lo siguiente:

- Las degradaciones más eficientes se aprecian en las experiencias con oxígeno puro a un caudal de 1,0 [L/min] y TiO_2 como semiconductor, con porcentajes remanentes muy cercanos a cero. Dado que en experimentos usando aire se alcanzan porcentajes cercanos al 95-96% se aconseja a descartar el uso de oxígeno para una eventual implementación a escala industrial.
- En la **experiencia 25**, descrita en la **Tabla 3-50** se observa que la concentración de ketoprofeno no desciende, lo cual significa que no hay adsorción en la superficie del semiconductor, comprobando que en los experimentos en

presencia de TiO_2 irradiado sí hay fotocátalisis. Las condiciones generales de esta experiencia se detallan en la **Tabla 3-51** y su desarrollo se puede apreciar en el **Anexo B-25**.

Los resultados de las experiencias de fotocátalisis con ZnO como semiconductor, descritas en las Tablas **3-70 y 3-72**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas dos experiencias (**experiencias 35 y 36**) se logró una degradación de aproximadamente un 92%. La degradación ocurre principalmente en los primeros 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 35 y 36 se resumen en las Tablas **3-71 y 3-73** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-35 y B-36** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotocátalisis con ZnO como semiconductor y en combinación con aire a un caudal de 2,5 [L/min], descritas en las Tablas **3-76 y 3-78**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas dos experiencias (**experiencias 38 y 39**) se logró una degradación de aproximadamente un 90%. La degradación ocurre principalmente en los primeros 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 38 y 39 se resumen en las Tablas **3-77 y 3-79** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-38 y B-39** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotocátalisis con ZnO como semiconductor y en combinación con oxígeno puro a un caudal de 0,5 [L/min], descritas en las Tablas **3-80 y 3-82**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas dos experiencias (**experiencias 40 y 41**) se logró una degradación de aproximadamente un 78%. La degradación ocurre principalmente en los primeros 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 40 y 41 se resumen en las Tablas **3-81 y 3-83** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-40 y B-41** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de fotocátalisis con ZnO como semiconductor y en combinación con oxígeno puro a un caudal de 1,0 [L/min], descritas en las Tablas **3-84 y 3-86**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas dos experiencias (**experiencias 42 y 43**) se logró una degradación de aproximadamente un 72%. La degradación ocurre principalmente en los primeros 90 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 42 y 43 se resumen en las Tablas **3-85 y 3-87** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-42 y B-43** respectivamente.

Para las experiencias 35 a 43 (con ZnO) se puede establecer lo siguiente:

- Los mejores resultados para degradaciones de ketoprofeno usando como fotocatalizador ZnO irradiado, se obtienen usando aire.
- Para el caso del oxígeno puro, la eficiencia del proceso a pH 10 también disminuye. Una posible causa sería la estabilización química del ketoprofeno en medio básico (el Talflex comercial viene estabilizado con NaOH).
- En la **experiencia 37**, descrita en la **Tabla 3-74** se observa que la concentración de ketoprofeno no desciende, lo cual significa que no hay adsorción en la superficie del semiconductor, comprobando que en los experimentos en presencia de ZnO irradiado sí hay fotocatálisis. Las condiciones generales de esta experiencia se detallan en la **Tabla 3-75** y su desarrollo se puede apreciar en el **Anexo B-37**.

Los resultados de las experiencias de ozonación, descritas en las Tablas **3-88**, **3-90** y **3-92**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias (**experiencias 44, 45 y 46**) se logró una degradación promedio de un 96%. La degradación ocurre principalmente en los primeros 30 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 44, 45 y 46 se resumen en las Tablas **3-89**, **3-91** y **3-93** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-44**, **B-45** y **B-46** respectivamente.

Los resultados de las experiencias de ozonación y ausencia de luz UV-C, descritas en las Tablas **3-94**, **3-96** y **3-98**, permiten apreciar que en las condiciones usadas en estas tres experiencias (**experiencias 47, 48 y 49**) se logró una degradación promedio de un 94%. La degradación ocurre principalmente en los primeros 30 minutos. Las condiciones generales para las experiencias 47, 48 y 49 se resumen en las Tablas **3-95**, **3-97** y **3-99** respectivamente y el desarrollo de estas degradaciones se muestra en los **Anexos B-47**, **B-48** y **B-49** respectivamente.

Para las experiencias 44 a 49 (con ozono) se puede establecer lo siguiente:

- Para ambos casos de ozonación (con luz UV-C y sin ella) la degradación de ketoprofeno es cercana al 95% en tiempos relativamente breves, dejando el camino abierto a futuras investigaciones con este proceso de oxidación avanzada.
- Se puede apreciar que la luz UV-C no es un factor indispensable en la degradación vía ozonación.

Considerando la información disponible, y visualizando un posible escalamiento industrial se eligieron las experiencias 26 y 38 como representativas de las mejores condiciones para tratar ketoprofeno desde soluciones acuosas. A muestras de tiempos 0

y 120 minutos de tratamiento para cada una de éstas experiencias se realizaron los análisis de DQO, DBO₅, toxicidad y COT.

Los resultados de DQO se muestran en las Tablas **3-100** (experiencia 26, con TiO₂) y **3-101** (experiencia 38, con ZnO). Para el primer caso se puede apreciar una excelente disminución en la demanda química de oxígeno. Sin embargo, en el segundo caso se puede ver un anómalo incremento en la DQO, atribuible tentativamente a Zn disuelto en la solución de ketoprofeno que interferiría en los resultados de los análisis.

En la DBO₅ (**Tablas 3-102 y 3-103**) se puede apreciar para ambos casos que la materia orgánica presente no es biodegradable, ya que el valor de DBO₅ no disminuye considerablemente después de dos horas de tratamiento.

Con respecto a los resultados obtenidos en el análisis de toxicidad (mostrados desde las **Tablas 3-104 a 3-107**) se puede apreciar que la toxicidad del ketoprofeno en la experiencia 26 es aguda, ya que entrega un valor (expresado en unidades de toxicidad) de 6,09 UT (EC₅₀, a los 15 [min]) al inicio del tratamiento. Al término de la fotodegradación, el valor de toxicidad entregado es de 3,40 UT (EC₅₀, a los 15 [min]). Esta clasificación se basa en el nivel de dilución que genera un 50% de disminución de la luz.

Para el caso de la experiencia 38 la toxicidad aumenta considerablemente, clasificándose en toxicidad aguda alta, dando un valor de 6,09 UT (EC₅₀, a los 15 [min]) al inicio del tratamiento y 64,90 UT (EC₅₀, a los 15 [min]) al término de éste. Este efecto se puede atribuir a la presencia de Zn disuelto en la solución de ketoprofeno ya que este metal junto con el fenol es considerado patrón tóxico de referencia para medir la concentración efectiva en el bioensayo de toxicidad.

Con respecto al carbono orgánico total (mostrado en la **Tabla 3-108**) sólo se realizó a una muestra después de dos horas de tratamiento en condiciones de la experiencia 26. Al inicio del tratamiento se obtuvo un resultado de COT de 11,71 [ppm de C] y al término del tratamiento se obtuvo un resultado de COT de 11,27 [ppm de C]. En consecuencia se deduce que la cantidad de átomos de carbono se mantiene prácticamente constante, lo que significa que durante el proceso de fotocátalisis la molécula de ketoprofeno se fragmenta en otros compuestos intermediarios, pero no se alcanza a mineralizar en dióxido de carbono y agua.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones del trabajo realizado usando soluciones acuosas de ketoprofeno en concentración aproximada de 10 [ppm] fueron:

1. Respecto a posibles reacciones químicas de fotólisis, desde los experimentos realizados, se aprecia que:

a) Existe una reacción fotoquímica que degrada el ketoprofeno hasta un 70% aproximadamente, en el intervalo de dos horas de irradiación con luz UV-C, sin semiconductor.

b) El oxidante H_2O_2 no influye apreciablemente en la degradación del ketoprofeno. Es decir, no contribuye a la degradación fotolítica observada.

2. Respecto a los experimentos de fotocátalisis se aprecia que:

a) Con la acción combinada de TiO_2 , luz UV-C, y aire se consigue una eficiente degradación del contaminante ketoprofeno, alcanzando en dos horas porcentajes remanentes de hasta un 4% aproximadamente.

b) Al inyectar oxígeno a la solución de ketoprofeno irradiada con luz UV-C en presencia de TiO_2 se aprecia un claro mejoramiento en el resultado final, dando porcentajes remanentes muy cercanos a cero.

c) Con la acción combinada de ZnO , luz UV-C, y aire también se logra una eficiente degradación del fármaco ketoprofeno con porcentajes remanentes levemente superiores, respecto al uso de TiO_2 , del orden del 10%.

d) La inyección de oxígeno a la solución de ketoprofeno irradiada con luz UV-C en presencia de ZnO , no mejora el resultado final, observándose al cabo de dos horas de tratamiento, porcentajes remanentes muy similares a los obtenidos usando aire.

3. Respecto a los experimentos de ozonación se aprecia que:

a) El ozono degrada eficazmente el ketoprofeno en tiempos más breves que la fotocátalisis, alcanzándose porcentajes en torno a 6% de ketoprofeno remanente, en sólo 50 minutos.

b) La acción de luz UV-C no incide mayormente en los resultados finales de las degradaciones realizadas con ozono, dando porcentajes remanentes muy similares, en torno al 6% de ketoprofeno remanente.

4. Acción del pH:

Del primer conjunto de experimentos realizados, se pudo determinar que el pH no influye significativamente en la degradación de ketoprofeno, por lo cual se decidió trabajar con el pH natural de la solución.

5. Efecto del semiconductor:

De los experimentos realizados puede concluirse que el TiO_2 es levemente más activo como fotocatalizador respecto al ZnO en la degradación de ketoprofeno.

6. Efecto de la adsorción:

Puede asegurarse que el fármaco ketoprofeno disuelto en soluciones acuosas no es adsorbido por ninguno de los semiconductores empleados en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- 1- **ATENAS VILLEGAS**, Maritza. Tratamiento terciario para degradar 4 clorofenol mediante Fotocatálisis Heterogénea. Tesis (Técnico Universitario en Química Analítica) Viña del Mar, Chile: UTFSM. Sede Viña del Mar, 2003.
- 2- **METCALF & EDDY, INC.** Ingeniería de aguas: Tratamiento, vertido y reutilización. Editorial M° Graw – Hill tercera edición, México 1998. 2v. ISBN: 8448116127.
- 3- **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS** Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado Decreto Supremo N° 609, Santiago 1998.
- 4- **MONSALVE PEREZ**, Fernando. Proceso de Fotocatálisis Heterogénea para degradar herbicida ácido 2,4-dicloro-fenoxiacético utilizando ZnO como catalizador. Tesis (Técnico Universitario en Química Analítica) Viña del Mar, Chile: UTFSM. Sede Viña del Mar, 2007.
- 5- **PALACIOS FIGUEROA**, Patricio. Proceso de Fotocatálisis Heterogénea para degradar fungicida verde de malaquita. Tesis (Técnico Universitario en Química Analítica) Viña del Mar, Chile: UTFSM. Sede Viña del Mar, 2005.
- 6- **SERRANO OTAZO**, Paola. Tratamiento terciario para degradar fenol mediante Fotocatálisis Heterogénea. Tesis (Técnico Universitario en Química Analítica) Viña del Mar, Chile: UTFSM. Sede Viña del Mar, 2003.

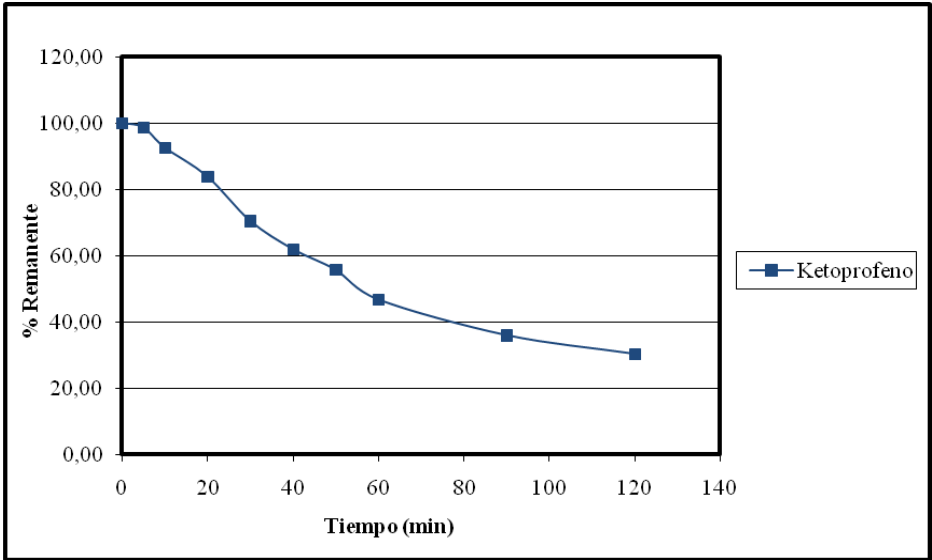
ANEXOS

ANEXO A: IMÁGENES DE REACTORES EMPLEADOS

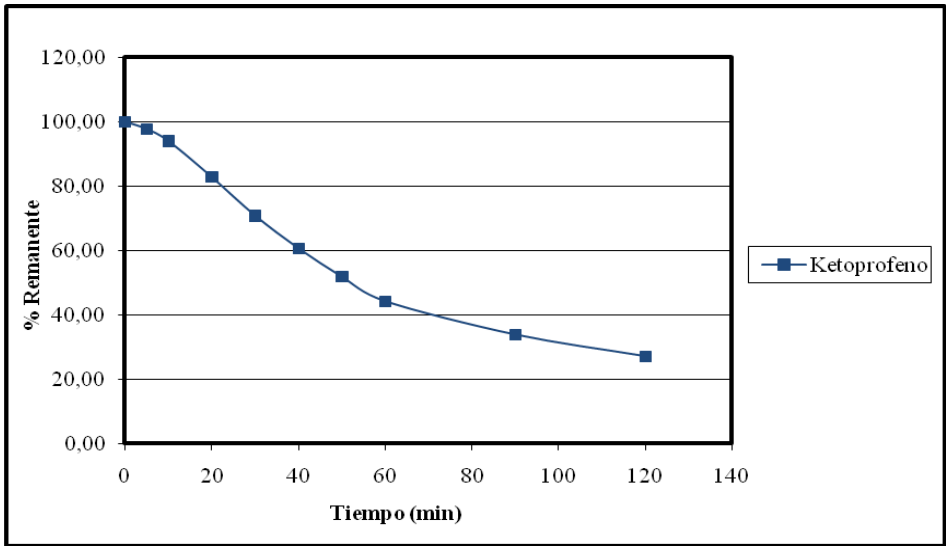


ANEXO B: GRÁFICOS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

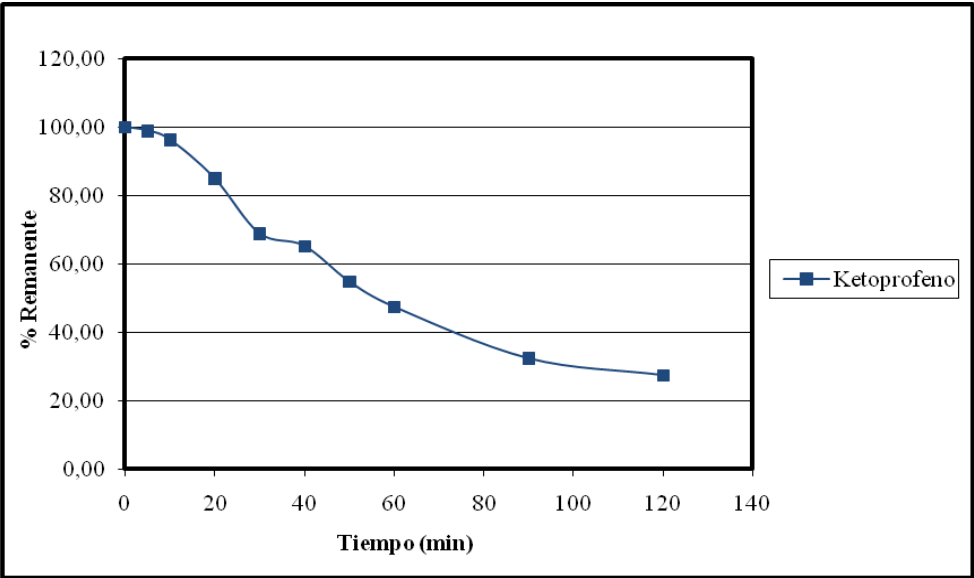
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [PPM] DE KETOPROFENO, PH SIN MODIFICAR, USANDO REACTOR EN COLUMNA Y CON IRRADIACIÓN DE 365 [NM].



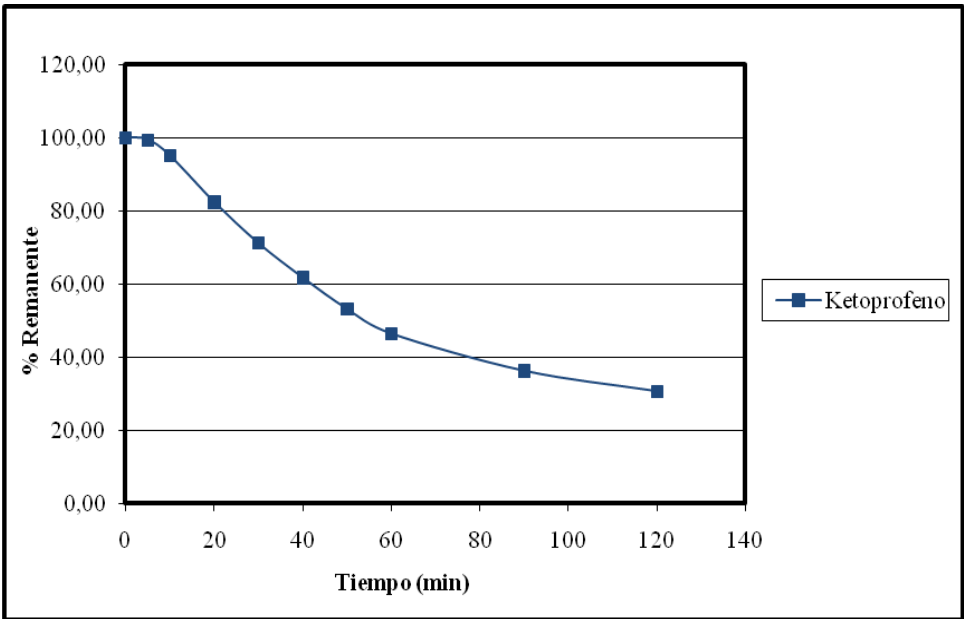
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, UTILIZANDO REACTOR EN COLUMNA Y CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm].



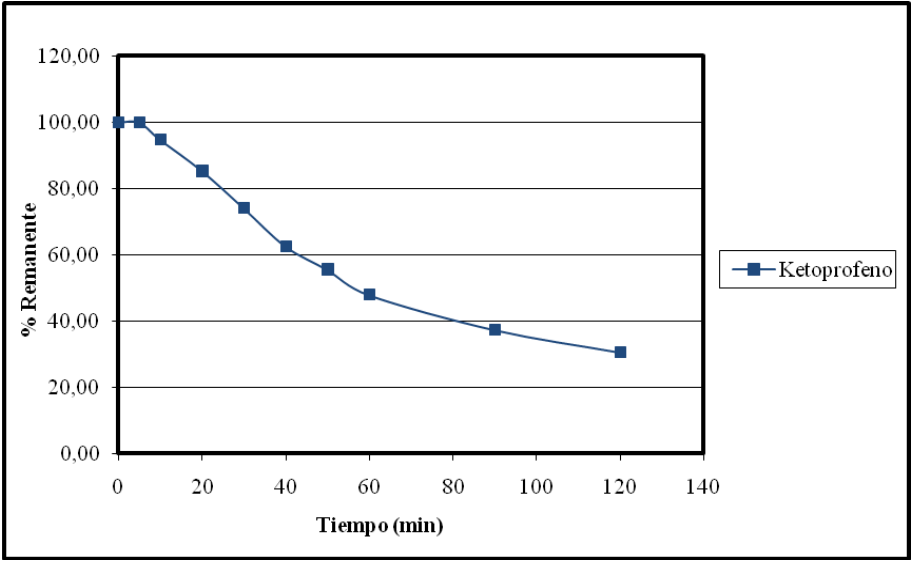
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, UTILIZANDO REACTOR EN COLUMNA Y CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm].



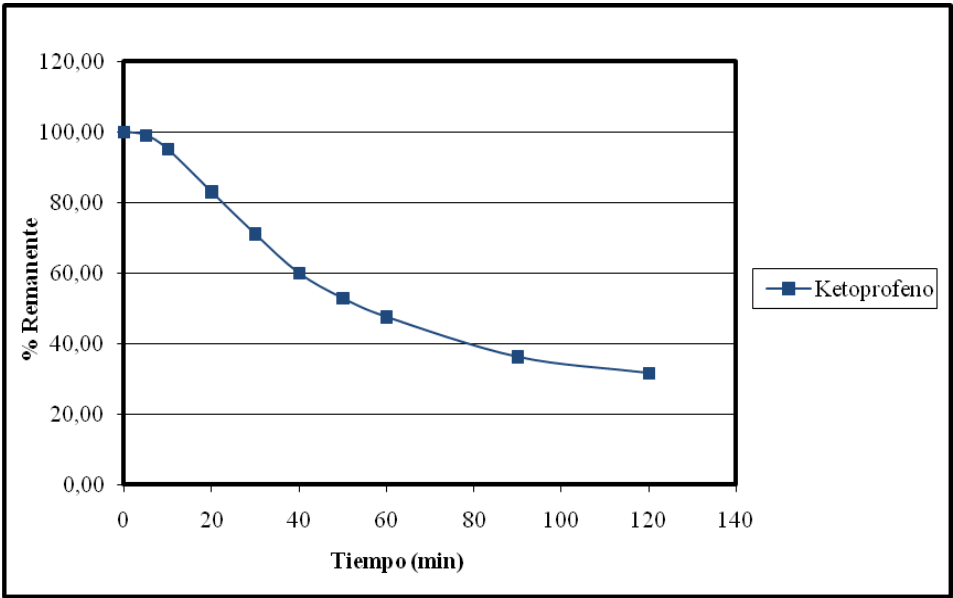
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y H₂O₂ EN RAZÓN MOLAR 1:1.



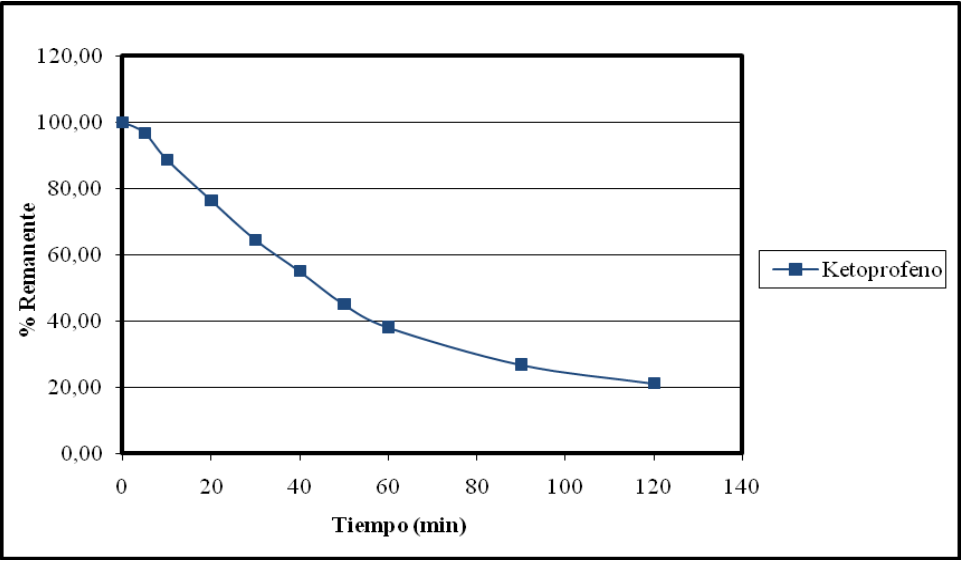
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DEKETOPR OFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y H₂O₂ EN RAZÓN MOLAR 5:1.



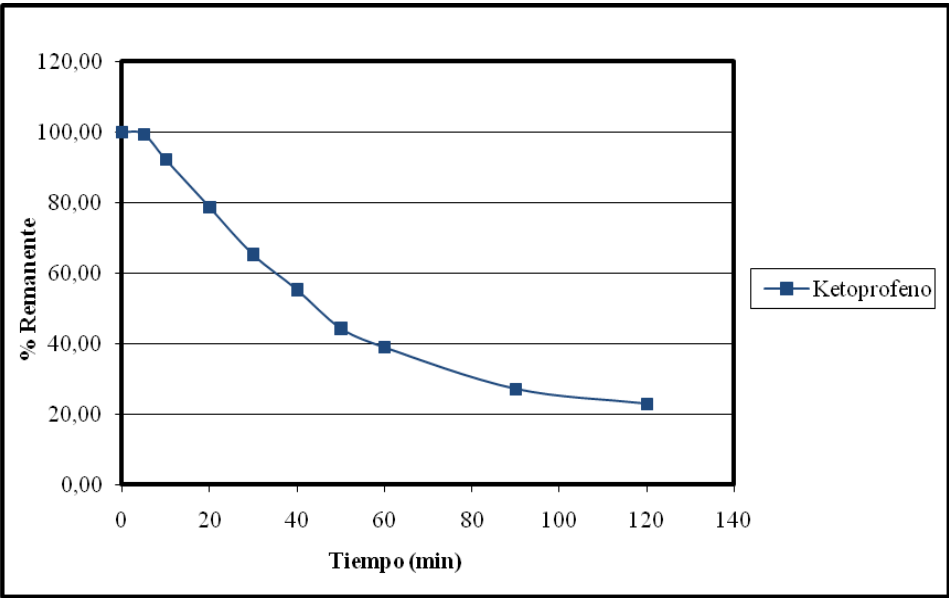
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y H₂O₂ EN RAZÓN MOLAR 10:1.



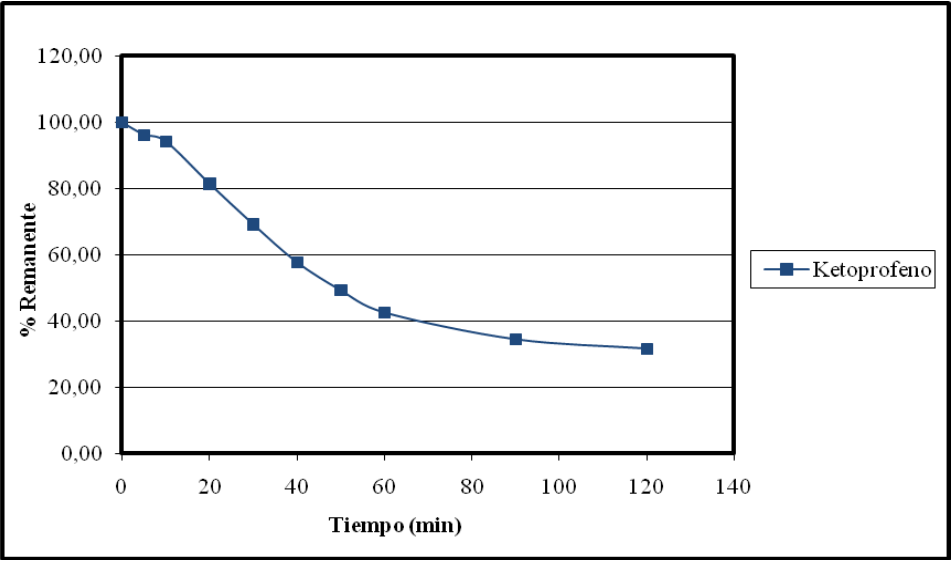
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y H₂O₂ EN RAZÓN MOLAR 1:1.



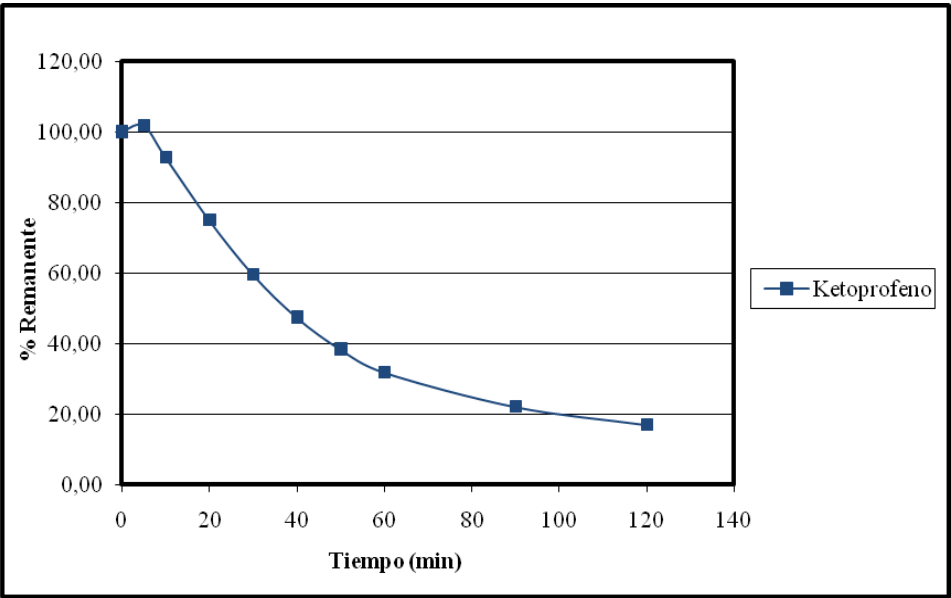
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y H₂O₂ EN RAZÓN MOLAR 5:1.



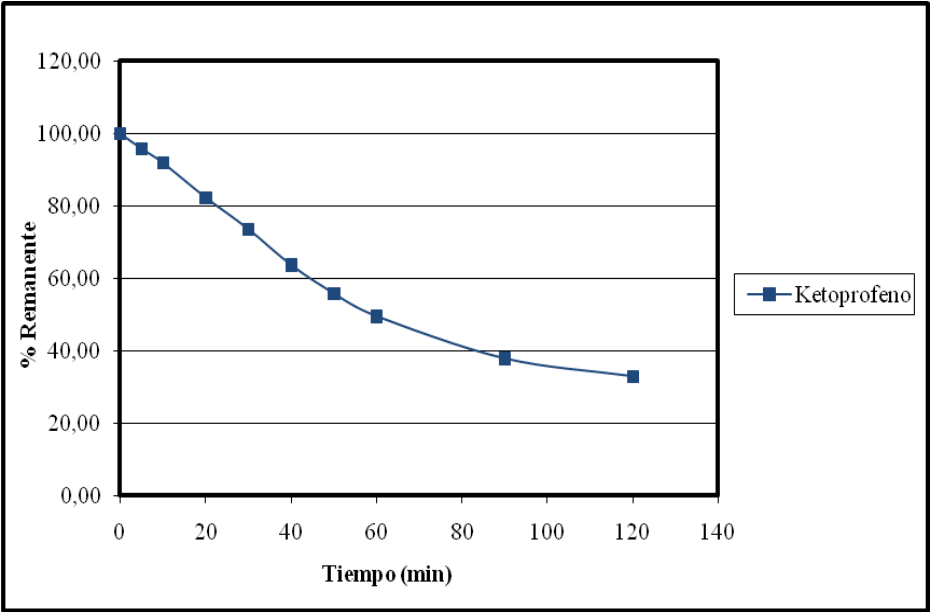
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y H₂O₂ EN RAZÓN MOLAR 10:1.



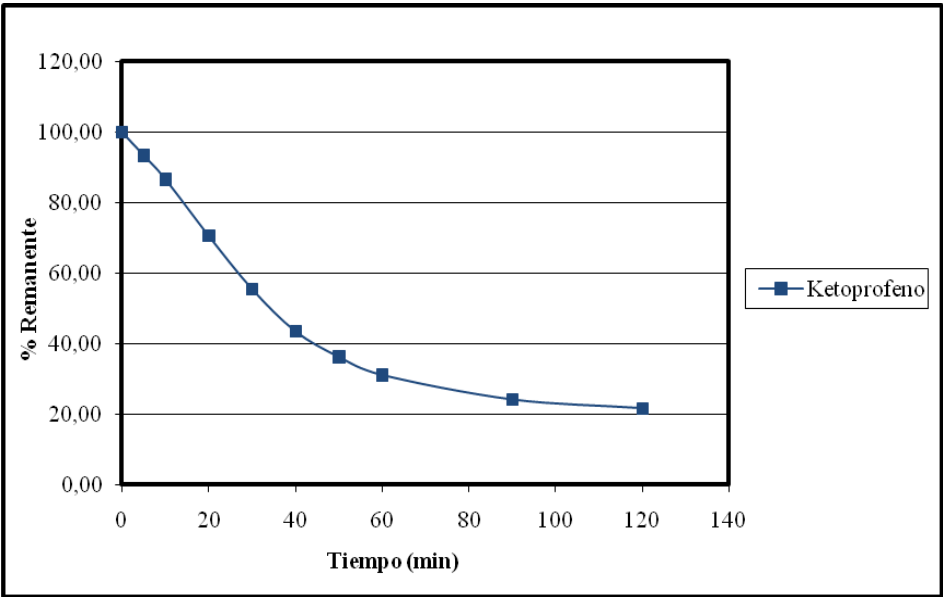
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y H₂O₂ EN RAZÓN MOLAR 1:1.



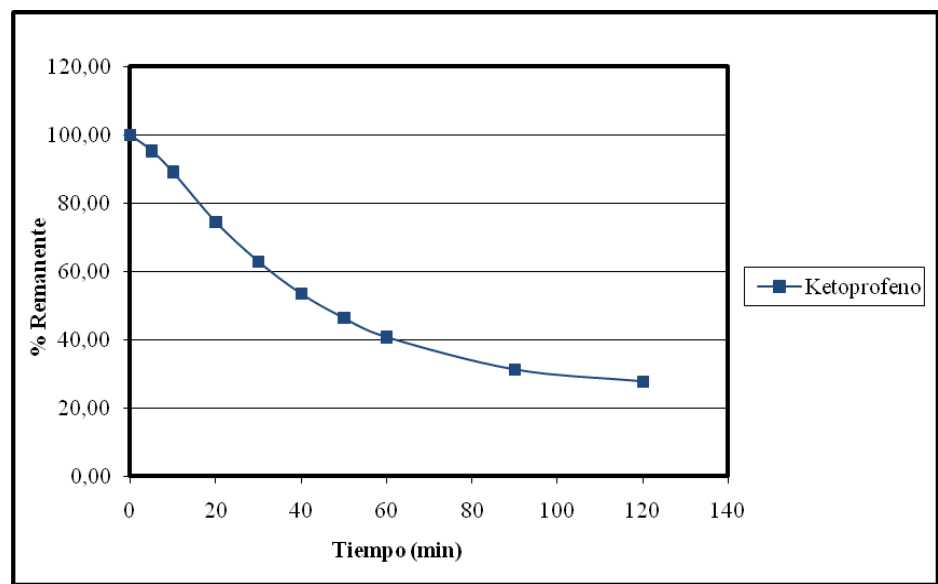
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y H₂O₂ EN RAZÓN MOLAR 5:1.



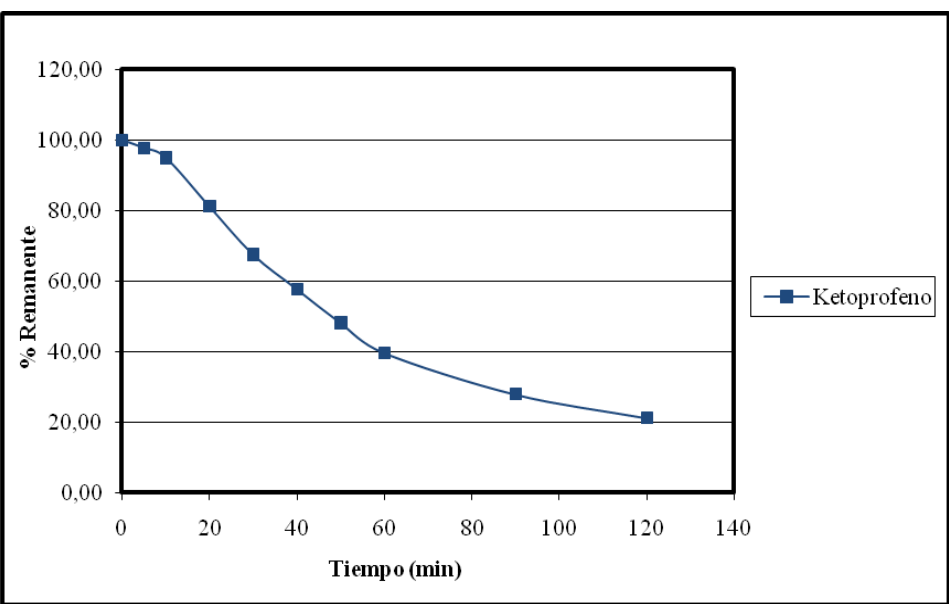
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y H₂O₂ EN RAZÓN MOLAR 10:1.



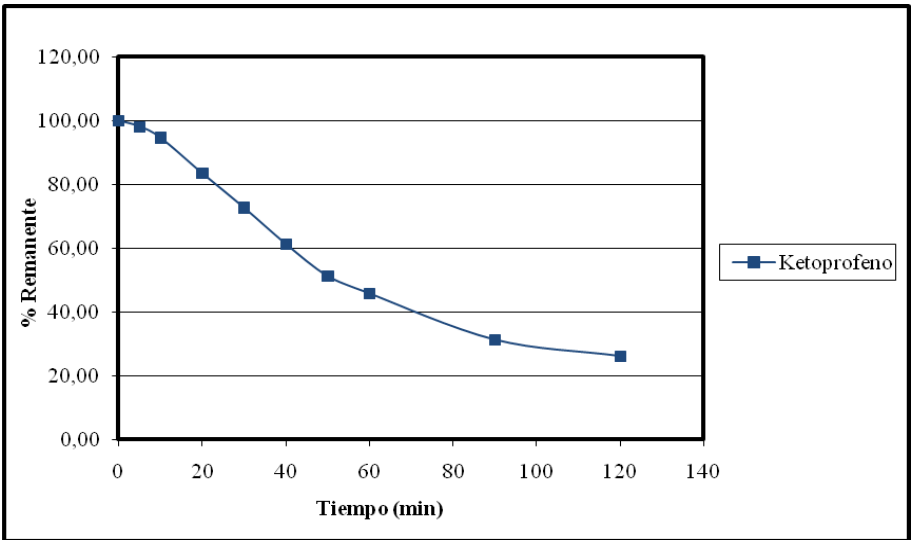
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y AIRE CON UN CAUDAL DE 2,5 [L/min].



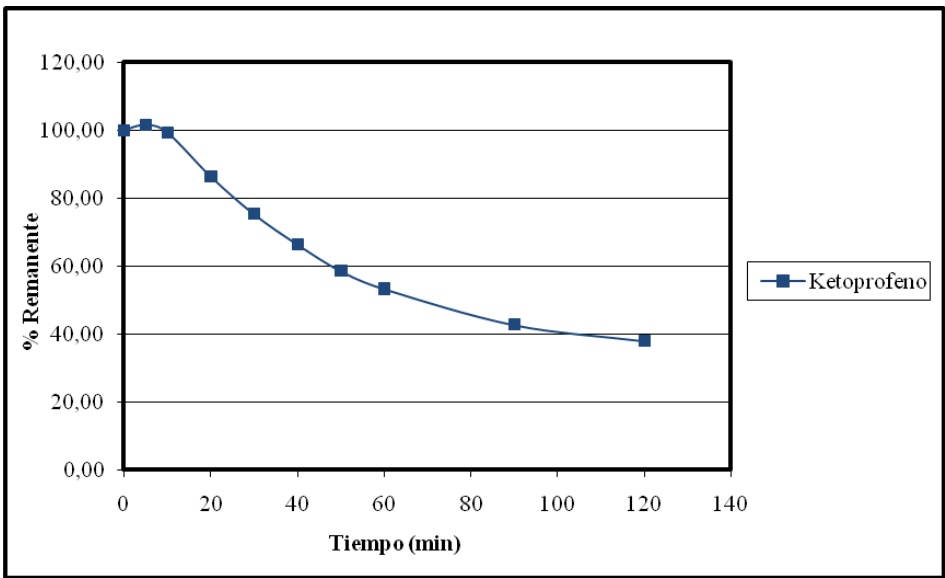
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y AIRE CON UN CAUDAL DE 2,5 [L/min].



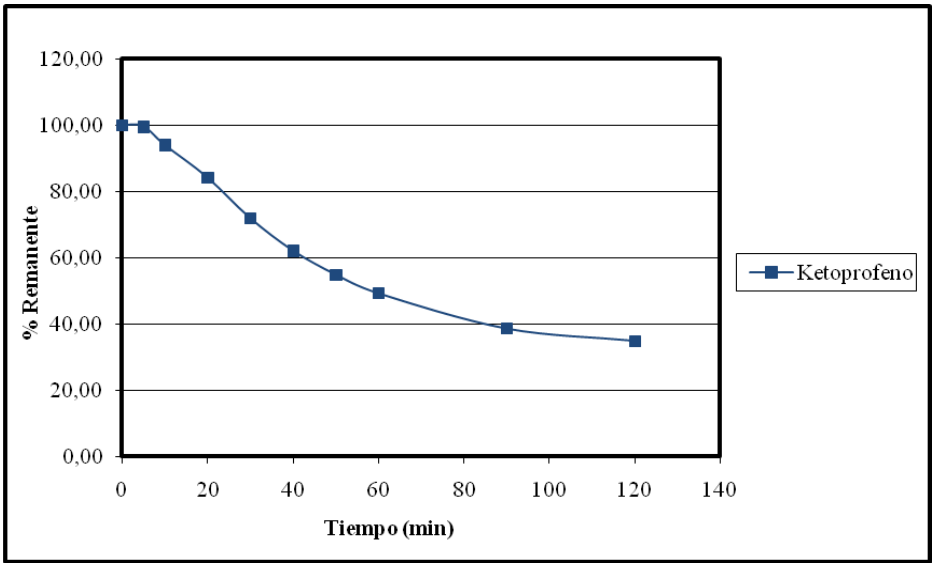
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y AIRE CON UN CAUDAL DE 2,5 [L/min].



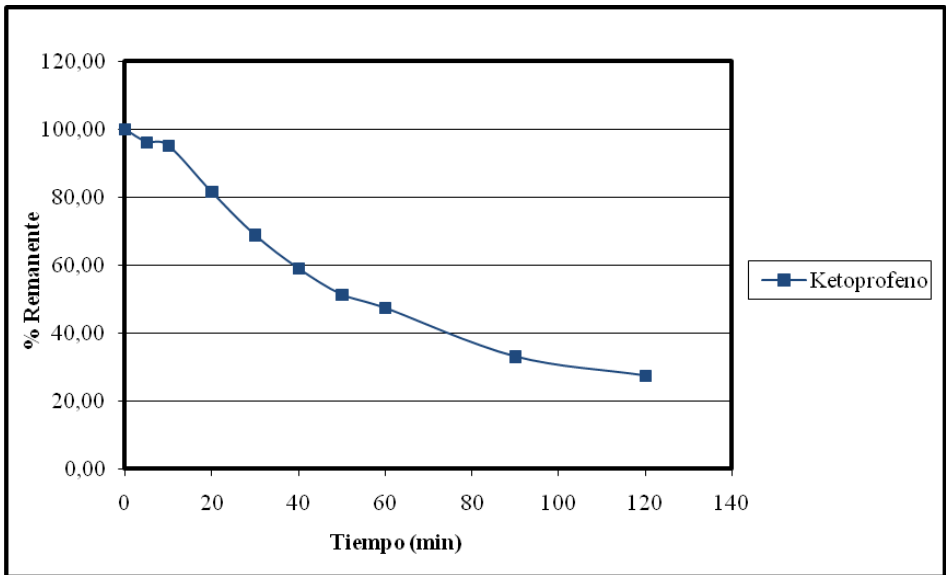
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y OXÍGENO PURO DE CAUDAL 0,5 [L/min].



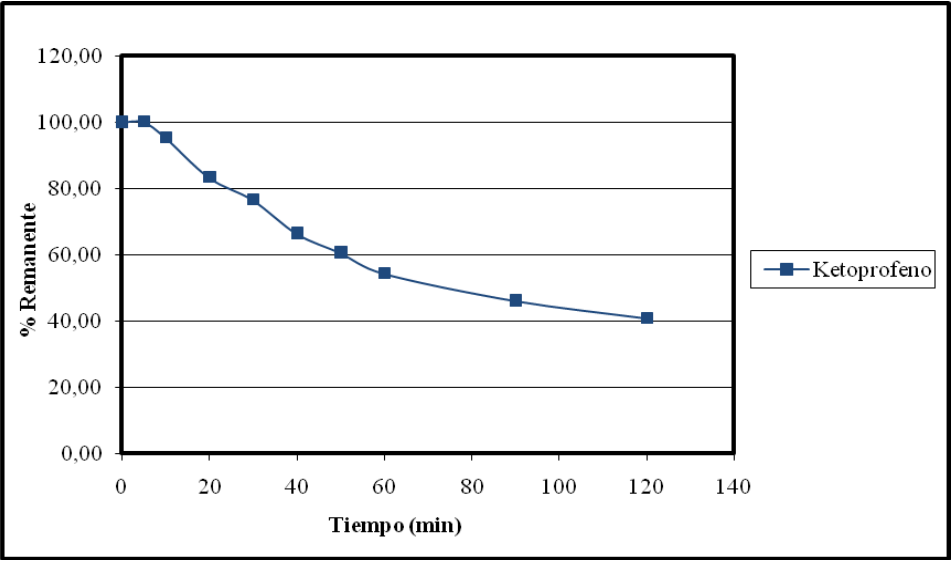
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y OXÍGENO PURO DE CAUDAL 0,5 [L/min].



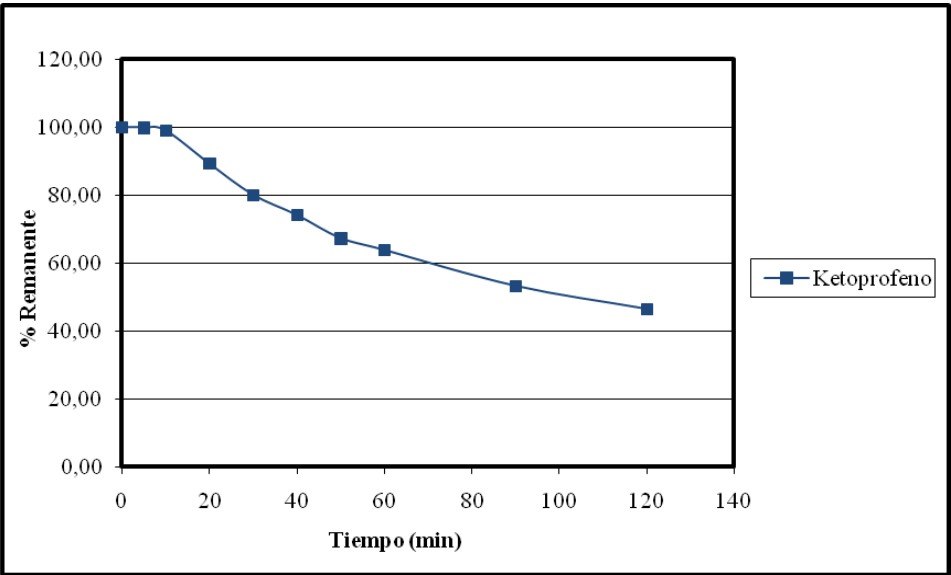
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y OXÍGENO PURO DE CAUDAL 0,5 [L/min].



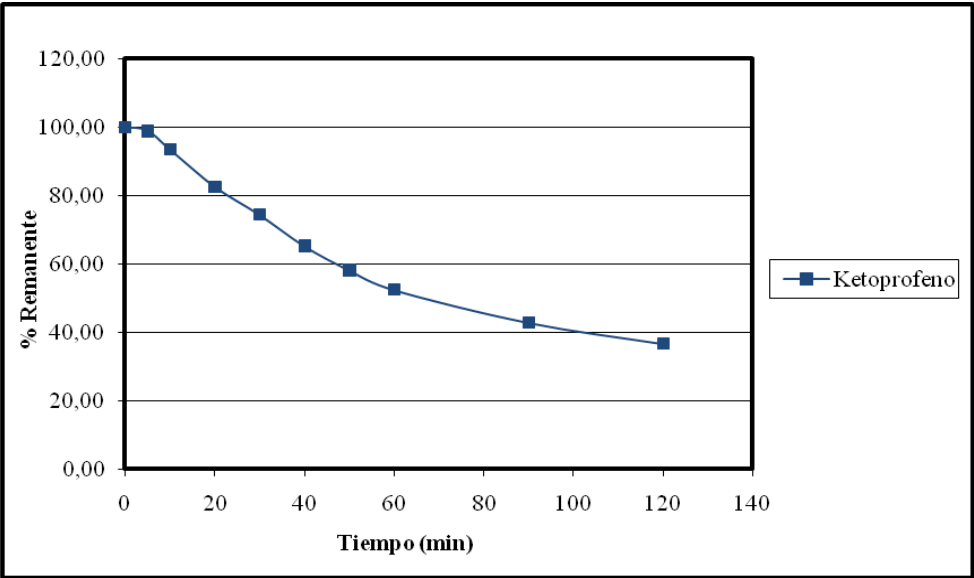
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y OXÍGENO PURO DE CAUDAL 1,0 [L/min].



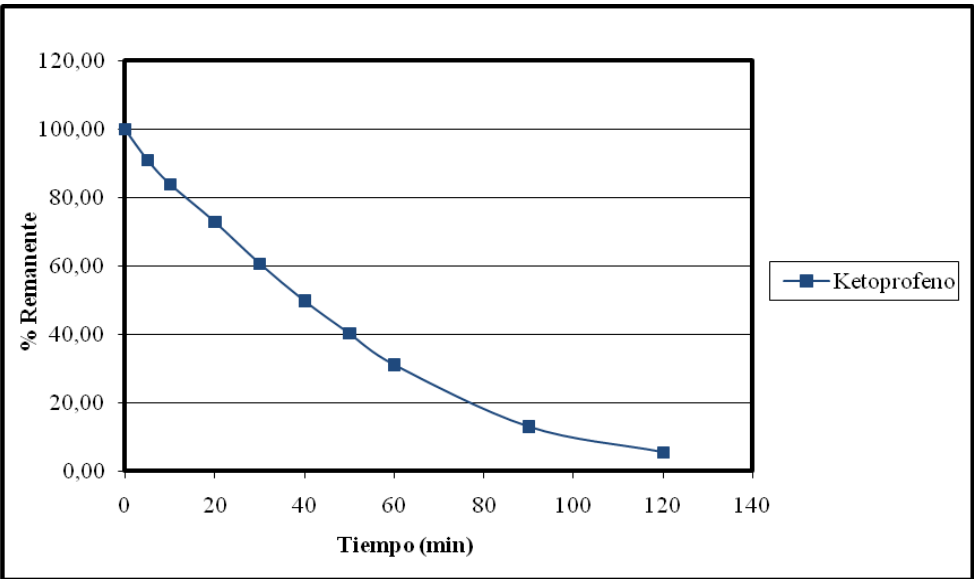
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y OXÍGENO PURO DE CAUDAL 1,0 [L/min].



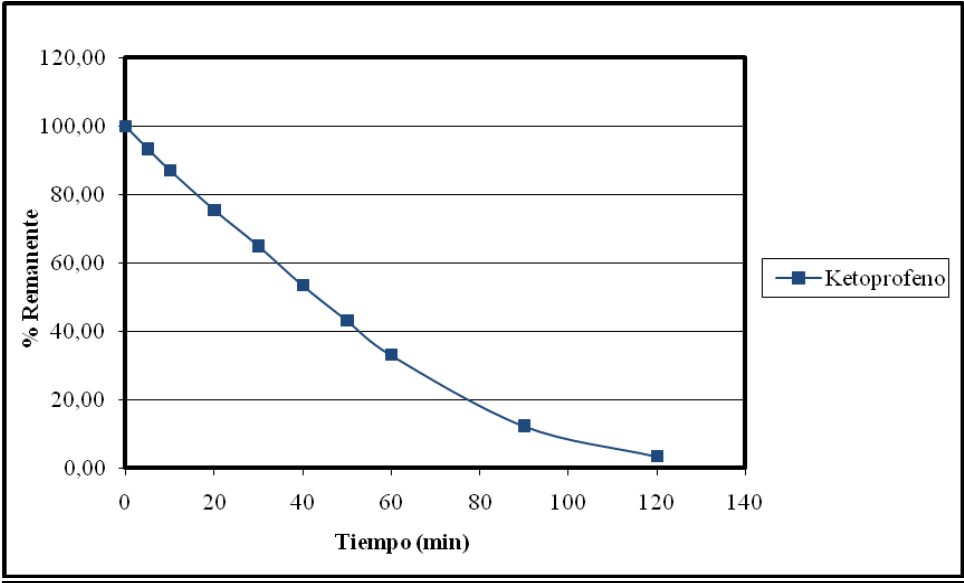
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y OXÍGENO PURO DE CAUDAL 1,0 [L/min].



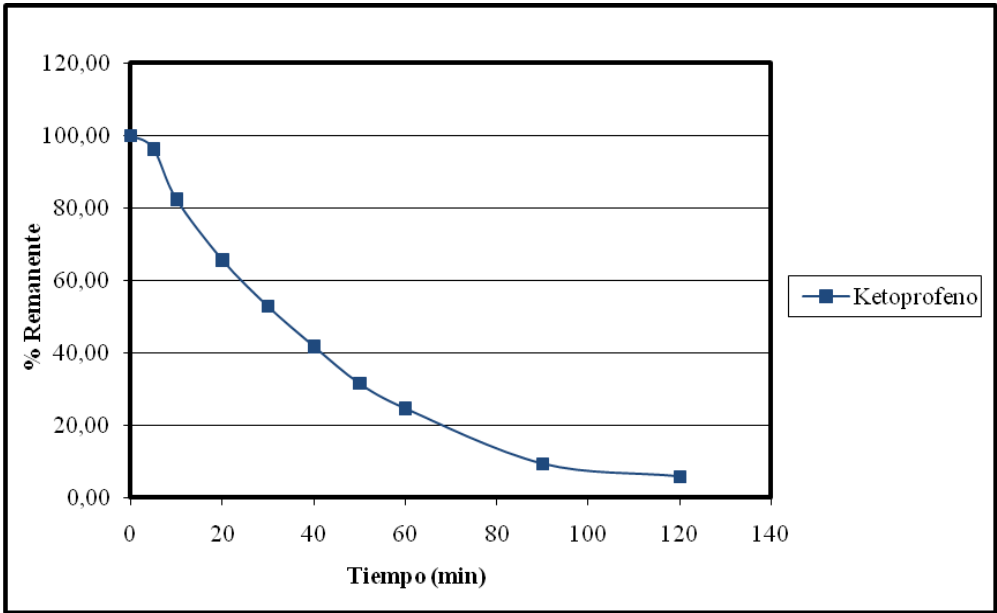
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DEKETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y USANDO TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



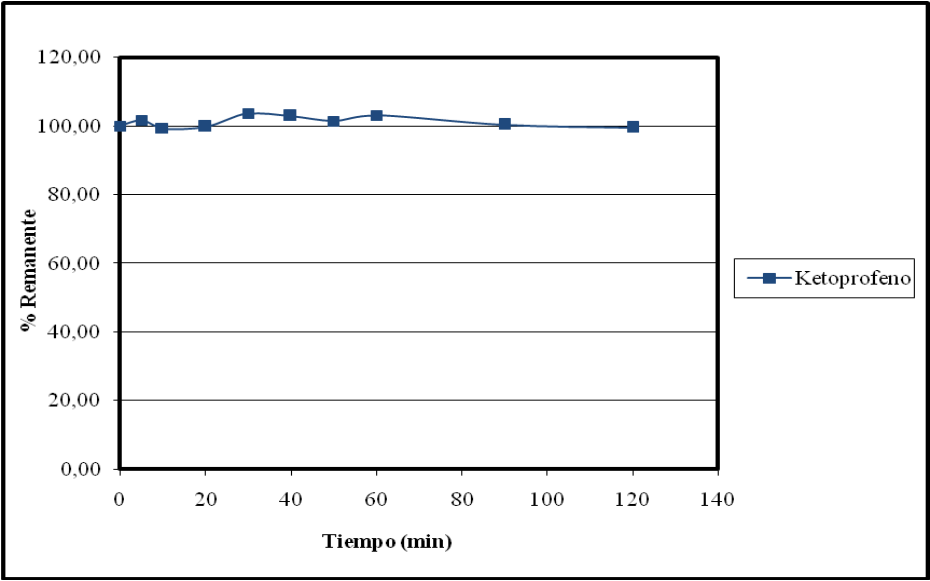
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y USANDO TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



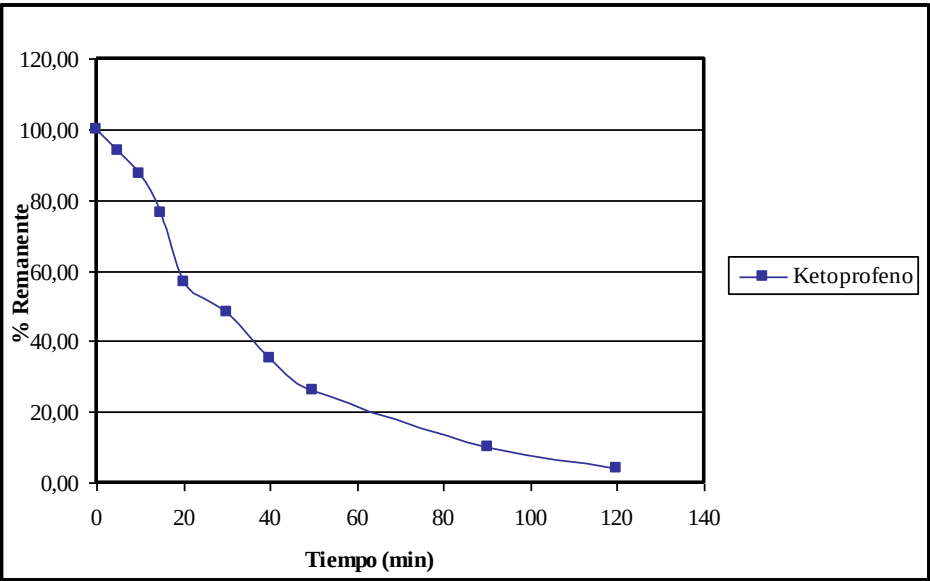
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DEKETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y USANDO TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



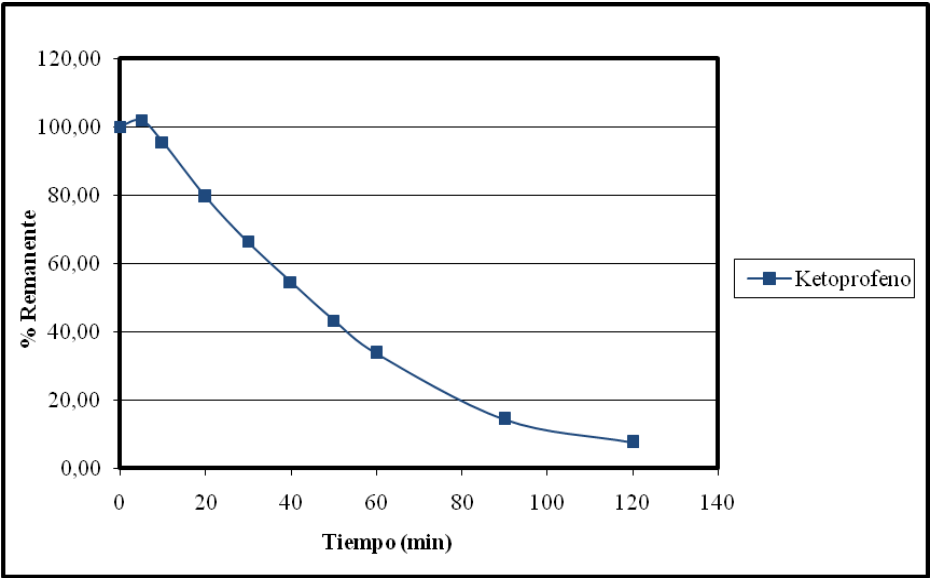
ADSORCIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, USANDO TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG Y EN AUSENCIA DE LUZ UV.



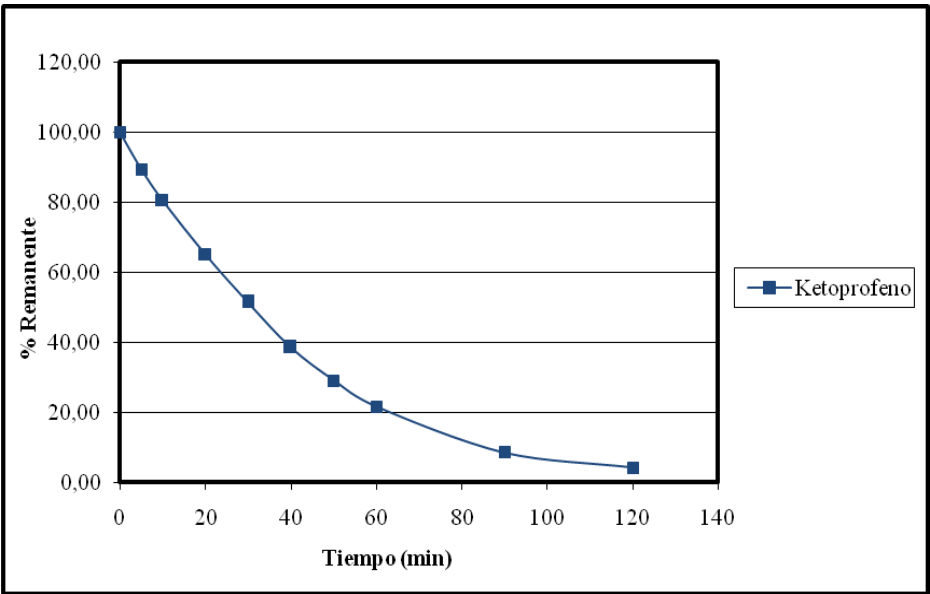
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], AIRE Y TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



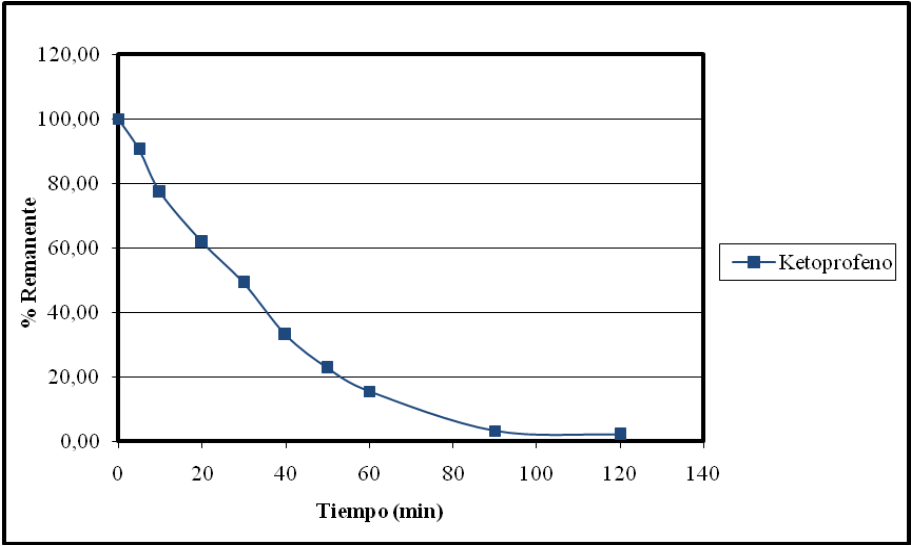
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], AIRE Y TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG



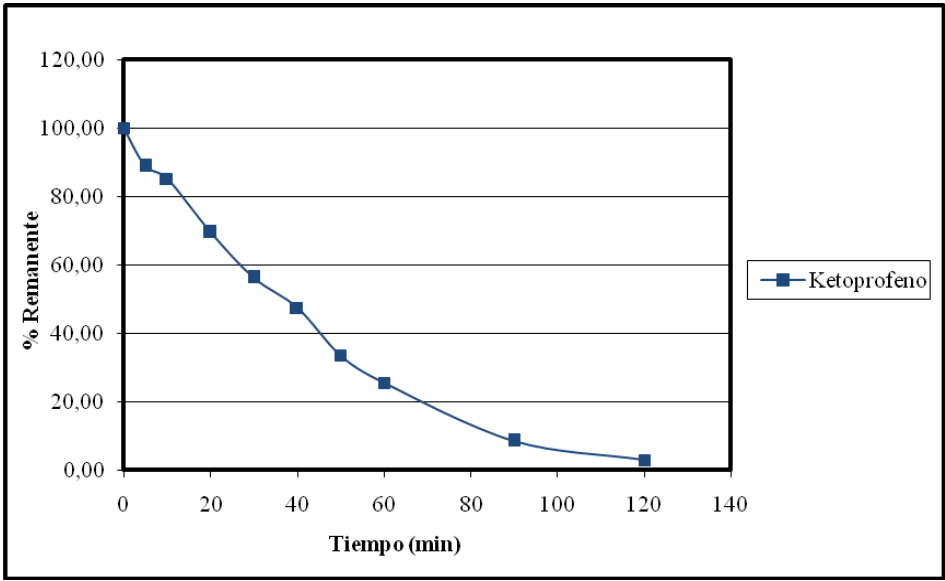
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], AIRE Y TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



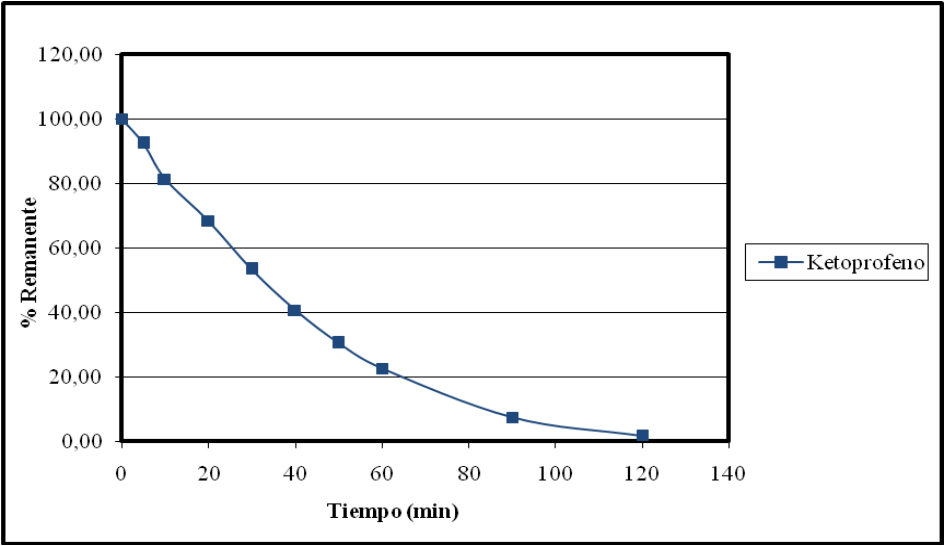
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 0,5 [L/min] Y TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



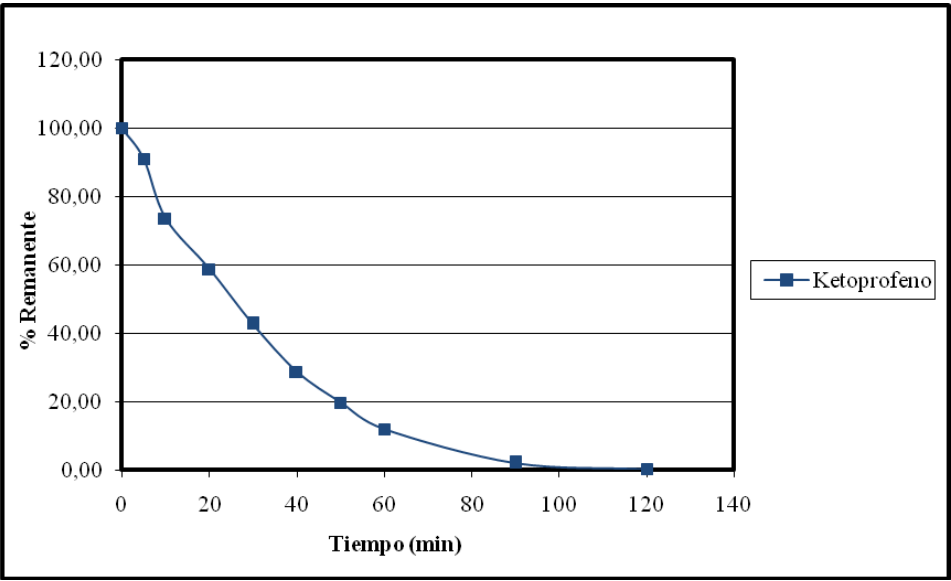
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 0,5 [L/min] Y TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



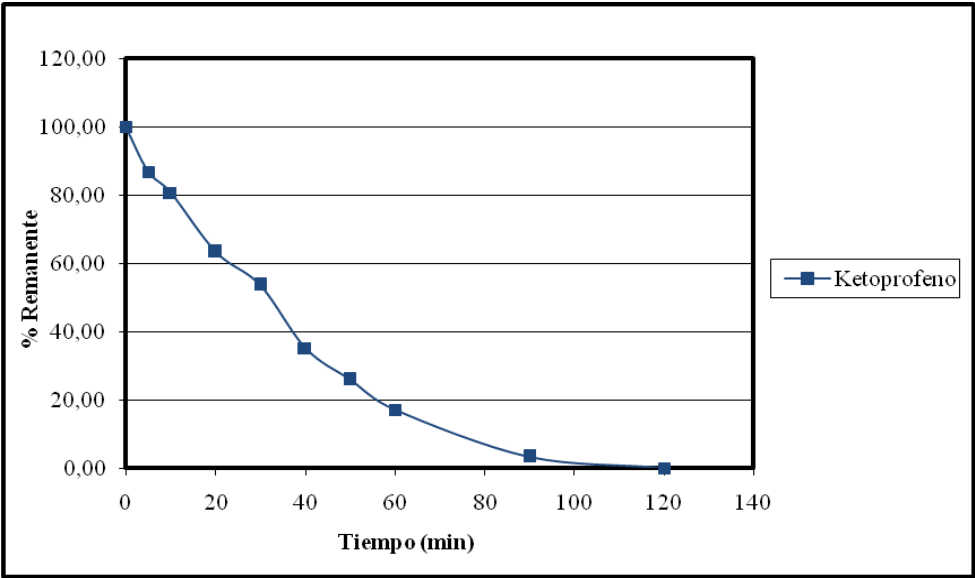
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 0,5 [L/min] Y TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



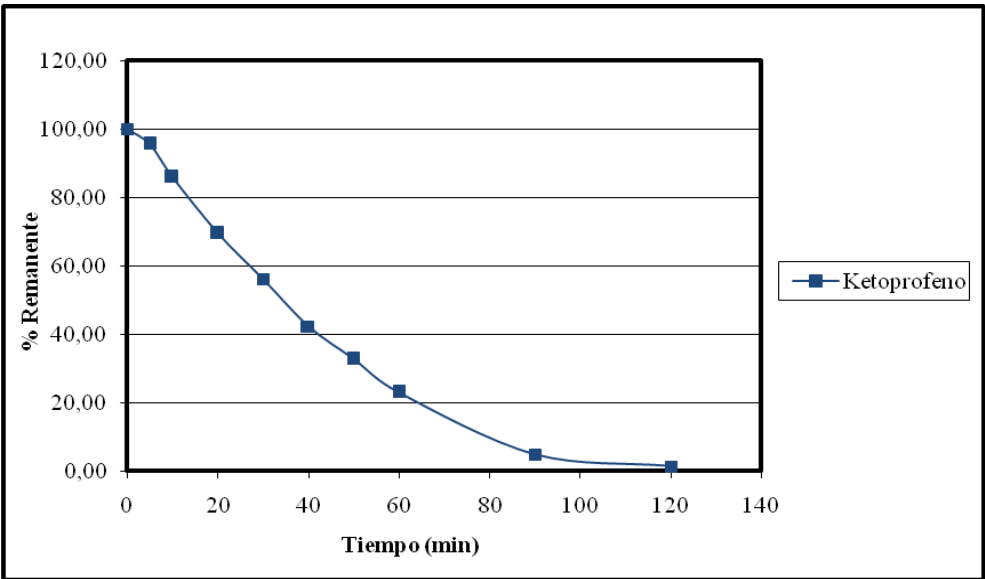
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 1,0 [L/min] Y TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



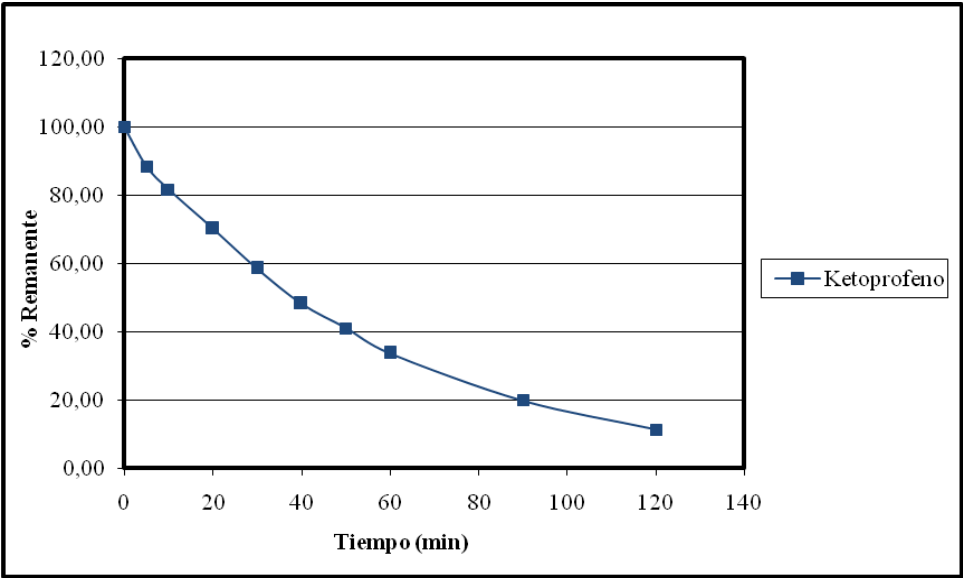
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 1,0 [L/min] Y TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



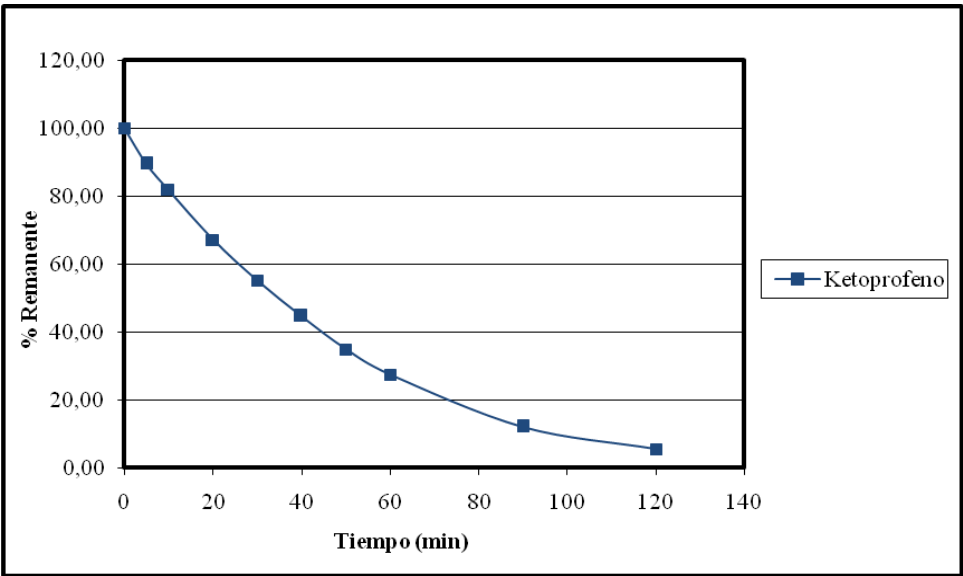
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 1,0 [L/min] Y TiO₂ ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



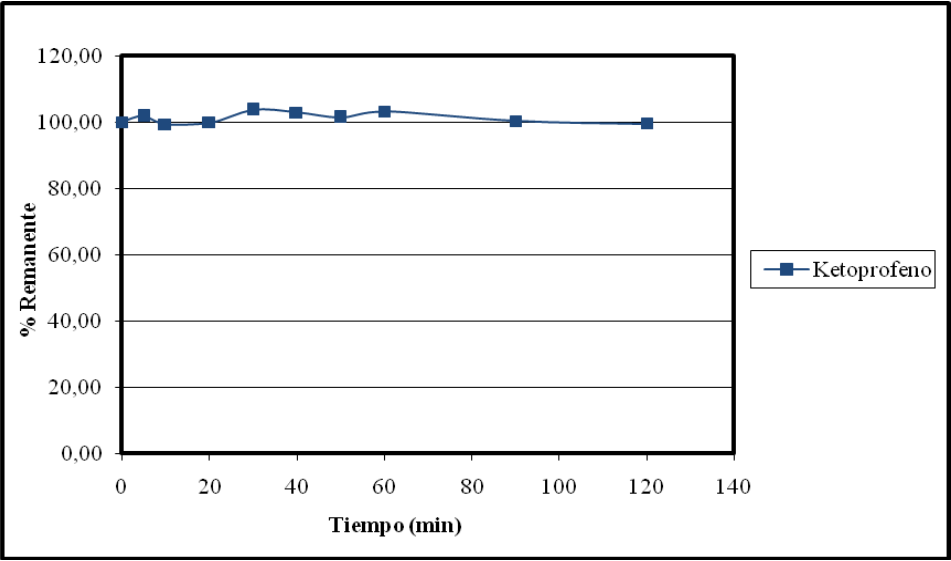
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y USANDO ZnO ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



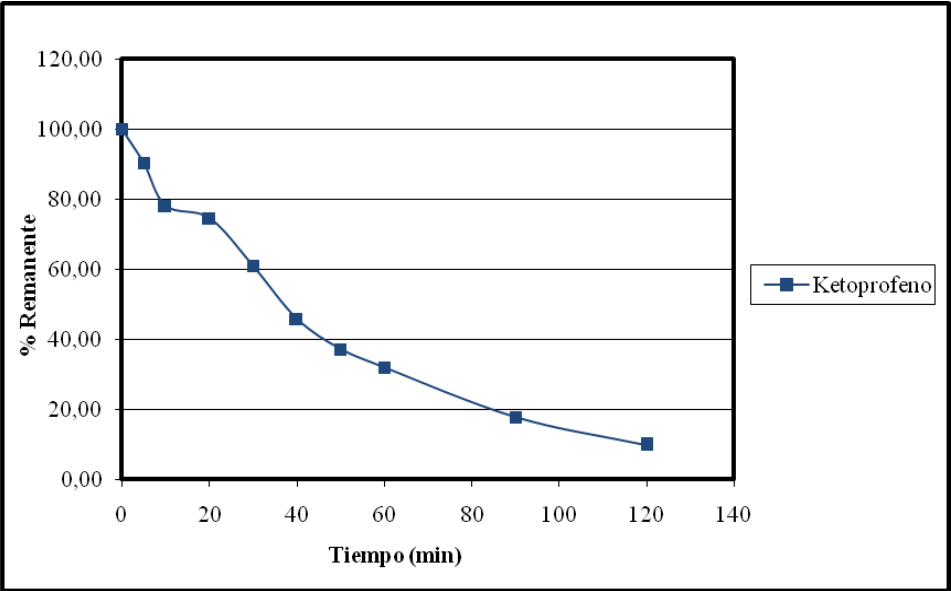
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DEKETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y USANDO ZnO ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



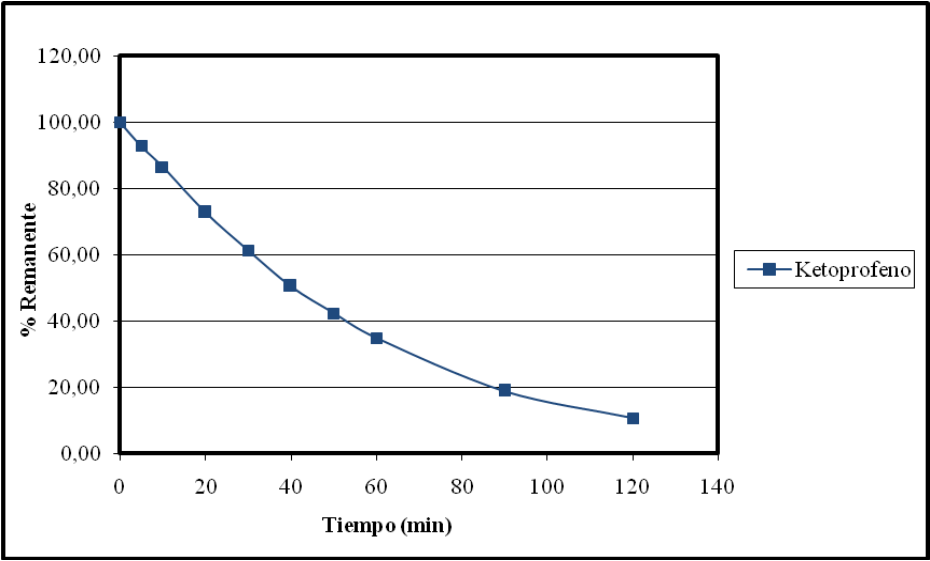
ADSORCIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, USANDO ZnO ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG Y EN AUSENCIA DE LUZ UV.



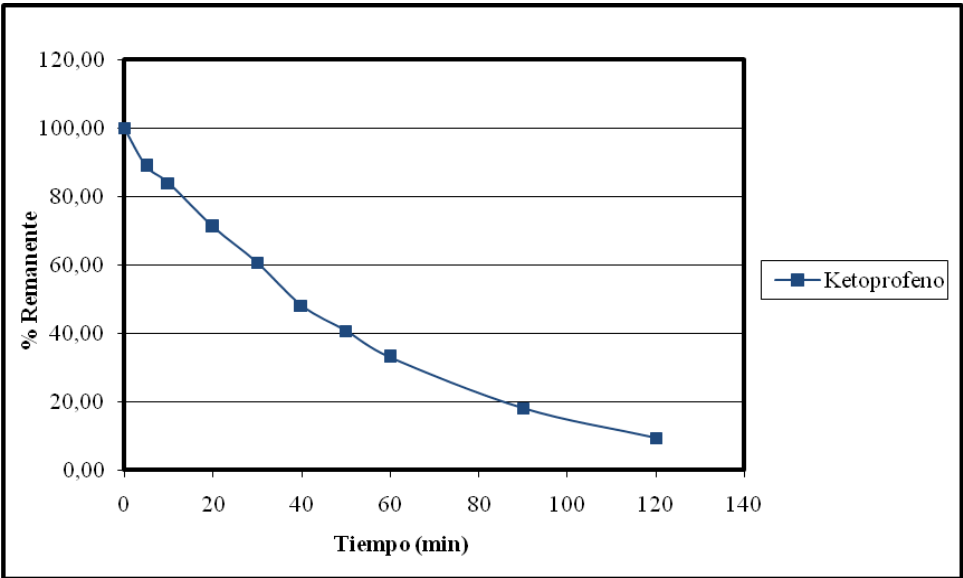
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], AIRE Y ZnO ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



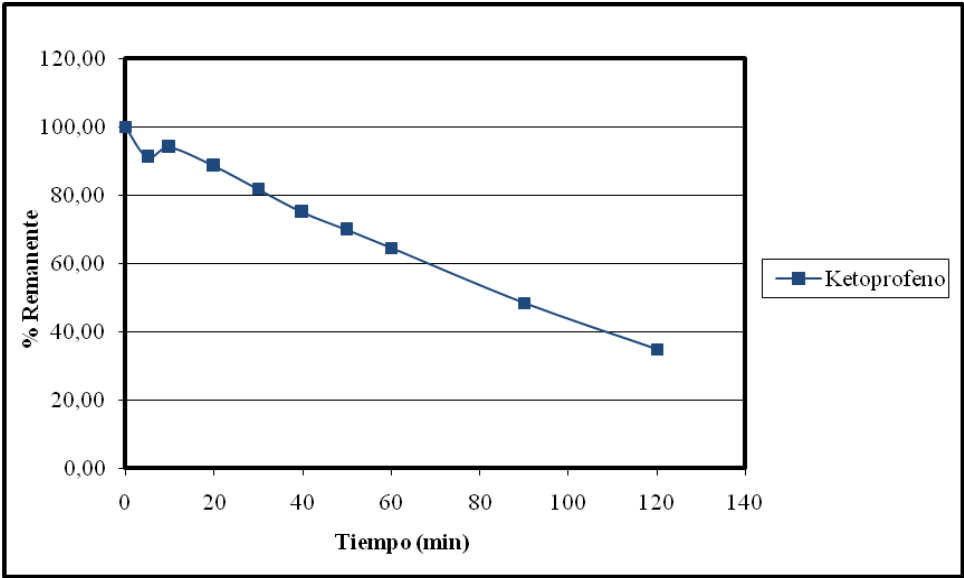
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], AIRE Y ZnO ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



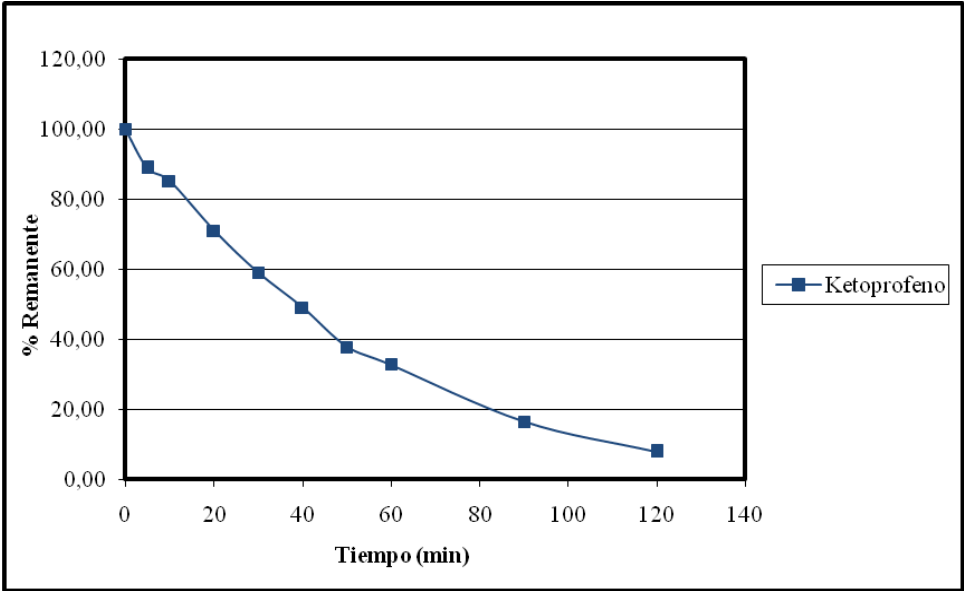
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 0,5 [L/min] Y ZnO ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



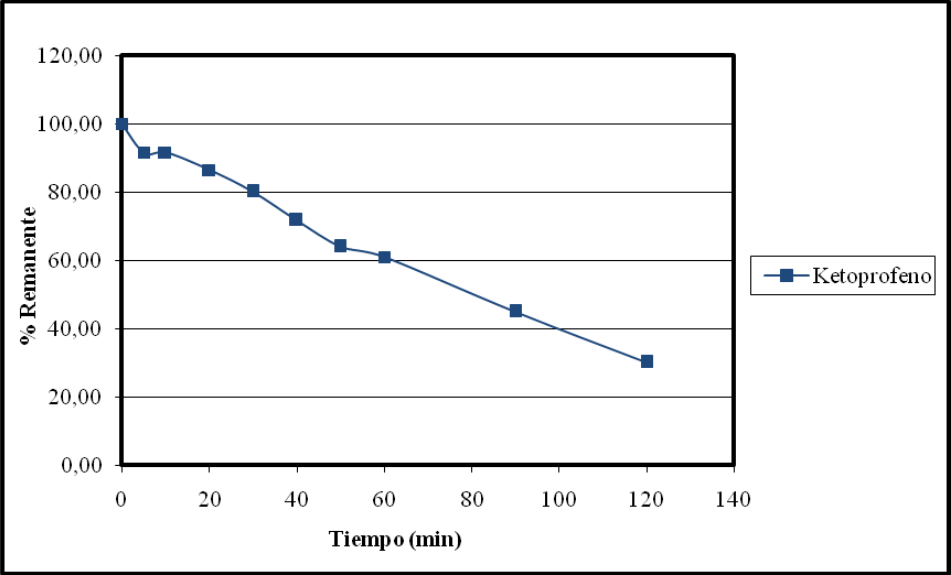
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 0,5 [L/min] Y ZnO ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



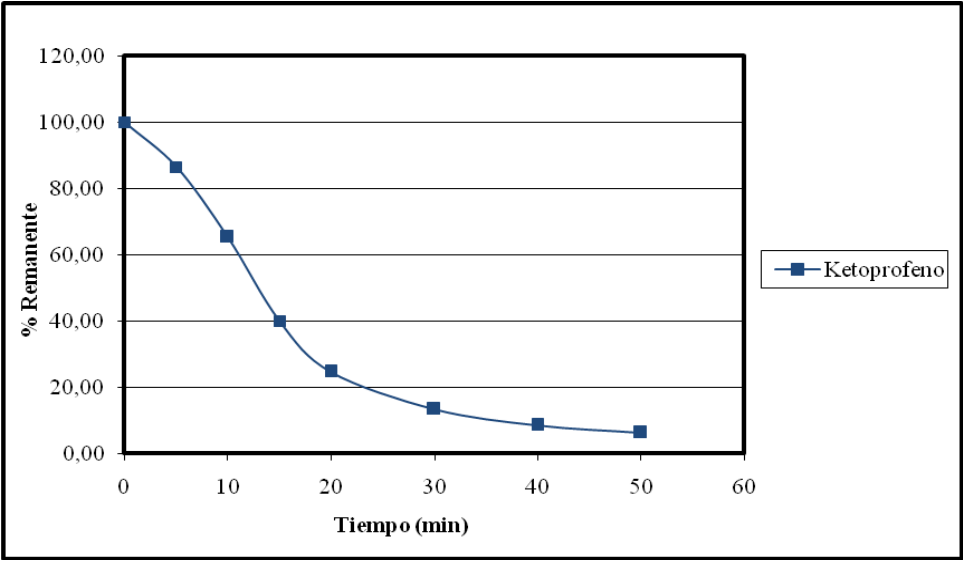
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 1,0 [L/min] Y ZnO ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



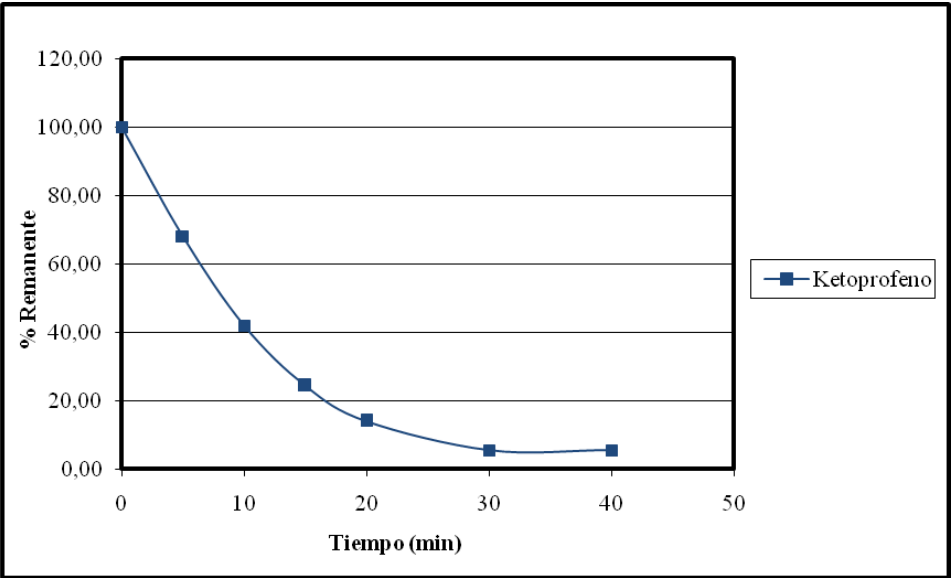
FOTODEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm], OXÍGENO PURO DE CAUDAL 1,0 [L/min] Y ZnO ADHERIDO A ANILLOS RASCHIG.



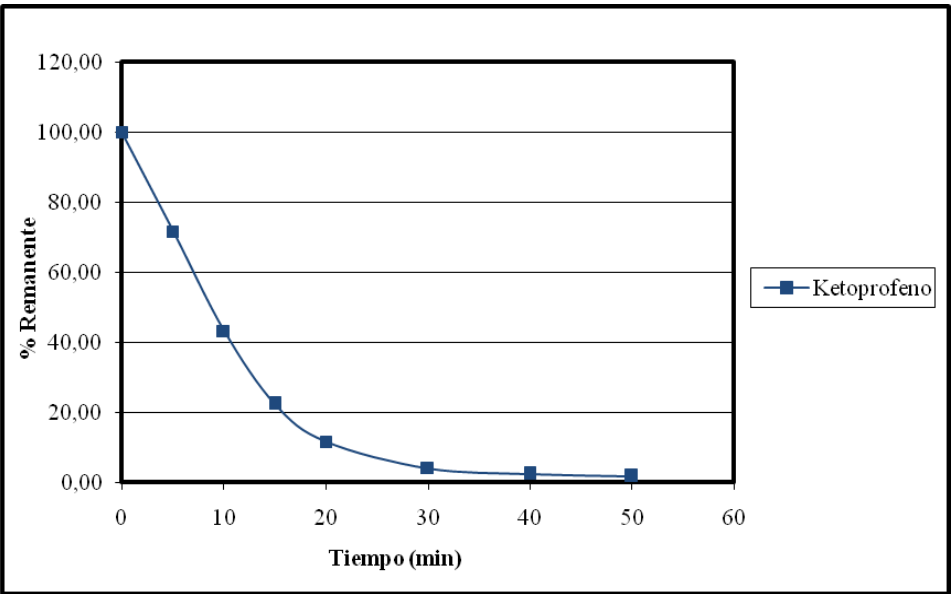
DEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, UTILIZANDO REACTOR EN COLUMNA, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y OZONO.



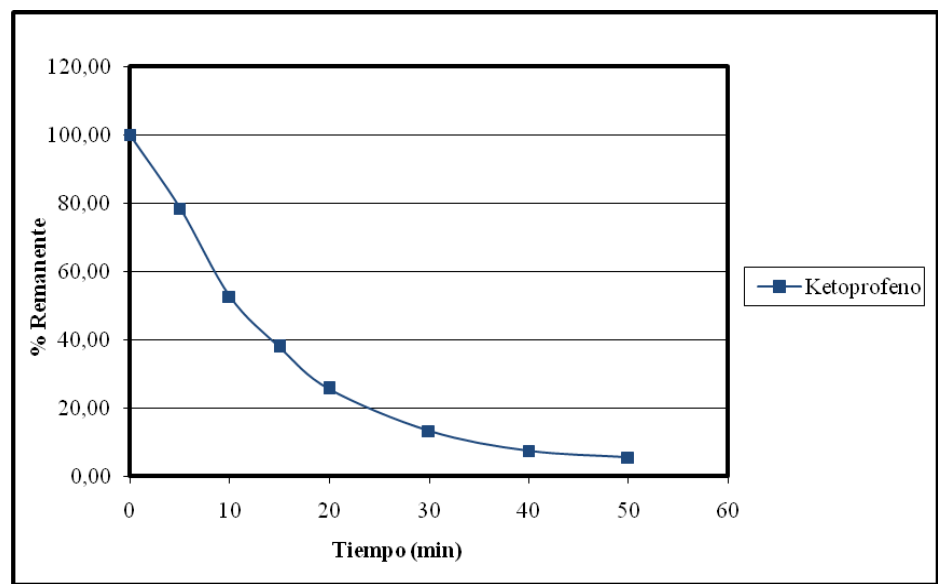
DEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE, pH 10, UTILIZANDO REACTOR EN COLUMNA, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y OZONO.



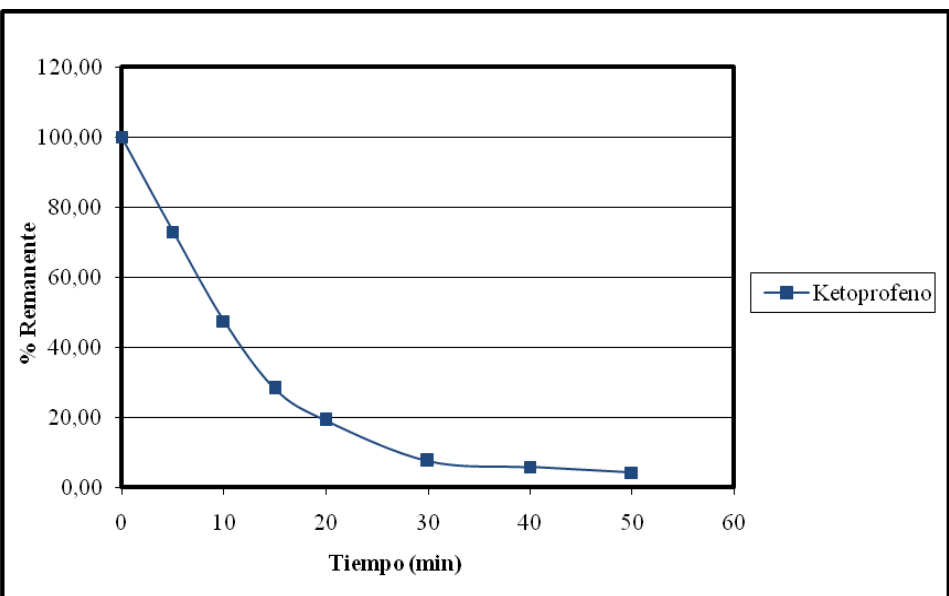
DEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, UTILIZANDO REACTOR EN COLUMNA, CON IRRADIACIÓN DE 365 [nm] Y OZONO.



ANEXO B-47: DEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH SIN MODIFICAR, UTILIZANDO REACTOR EN COLUMNA, CON OZONO Y EN AUSENCIA DE LUZ UV.



DEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 10, UTILIZANDO REACTOR EN COLUMNA, CON OZONO Y EN AUSENCIA DE LUZ UV.



DEGRADACIÓN DE UNA SOLUCIÓN 10 [ppm] DE KETOPROFENO, pH 4, UTILIZANDO REACTOR EN COLUMNA, CON OZONO Y EN AUSENCIA DE LUZ UV.

