



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**“TRATAMIENTO QUÍMICO PARA LA DEGRADACIÓN DEL
COLORANTE AZUL MARINO DRIMANEN CL-R EMPLEADO EN LA
INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE PROCESOS DE OXIDACIÓN”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Q U Í M I C A

P R E S E N T A :

EDNA BERENICE ZÚÑIGA ZARZA

ASESOR: DRA. FRIDA MARÍA LEÓN RODRÍGUEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

DEPARTAMENTO DE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA RAMÍREZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

Tratamiento químico para la degradación del colorante azul marino
drimanen Cl-R empleado en la industria textil mediante procesos
de oxidación.

que presenta la pasante: Edna Berenice Zúñiga Zarza
con número de cuenta: 40410076-4 para obtener el título de :
Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 30 de Septiembre de 2010

| | | |
|------------------|--|--------------------------------|
| PRESIDENTE | <u>Dra. Frida María León Rodríguez</u> | <u><i>Frida León</i></u> |
| VOCAL | <u>Q. Ma. Eugenia Carbajal Arenas</u> | <u><i>Eugenia Carbajal</i></u> |
| SECRETARIO | <u>QFB. Leticia Badillo Solís</u> | <u><i>Badillo</i></u> |
| PRIMER SUPLENTE | <u>QI. Griselda Ávila Enríquez</u> | <u><i>Ávila</i></u> |
| SEGUNDO SUPLENTE | <u>QFB. Claudia Pérez Garrido</u> | <u><i>Pérez</i></u> |

Agradecimientos

A Dios primeramente, camino, verdad y vida, siempre fiel y presente en mi vida, a Él le debo todo lo que soy y todo lo que seré, gracias porque me has guardado en todo momento.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a una mujer que admiro y respeto, la Doctora Frida María León Rodríguez, porque sin su ayuda, asesoría y paciencia no hubiera hecho nada, gracias a ella también, todo resultó bien.

A las maestras Ofelia Esperanza Arroyo Fal, Griselda Ávila Enríquez, Lidia Elena Ballesteros Hernández, Lic. Miriam, al jurado que revisó y evaluó mi tesis, a la señorita laboratorista María de los Ángeles Terrazas y al señor Draucin Jiménez Celi.

Dedicatoria

A ti también Dios te dedico este trabajo porque tú me permitiste llevarlo a cabo, tú me diste mi vida, mi familia, mi carrera y ahora yo te lo dedico todo a ti.

A mis papás porque siempre se han desvivido para mantenerme y sacarme adelante, a mis seres amados que me apoyaron buscando y deseando siempre el bien para mi, gracias de todo corazón.

A ti abuelito, mi corazón dice las palabras que tengo para ti...

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2 GENERALIDADES | |
| 2.1 Industria textil..... | 2 |
| 2.2 Características de los colorantes textiles..... | 3 |
| 2.3 Procesos Avanzados de Oxidación..... | 6 |
| 2.4 Tratamiento mediante peróxido de hidrógeno y proceso Fenton..... | 8 |
| 2.4.1 Parámetros que influyen en el proceso Fenton..... | 9 |
| 2.4.1.1 Influencia del pH..... | 10 |
| 2.4.1.2 Temperatura..... | 11 |
| 2.4.1.3 Relación Fe(II)/ H ₂ O ₂ | 12 |
| 2.5 Tratamiento mediante ozono..... | 12 |
| 2.5.1 Efecto del pH de la solución..... | 15 |
| 2.6 Tratamiento mediante ozono y H ₂ O ₂ a pH alcalino..... | 17 |
| 2.7 Tratamiento con cloro..... | 19 |
| 3 OBJETIVO GENERAL | 21 |
| 3.1 Objetivos particulares..... | 21 |
| 4 MÉTODO EXPERIMENTAL | 22 |
| 5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL | 22 |
| 5.1 Procedimiento para el tratamiento H ₂ O ₂ | 23 |
| 5.2 Procedimiento para el tratamiento mediante proceso Fenton..... | 24 |
| 5.2.1 Optimización del catalizador de Fe ²⁺ | 25 |
| 5.2.2 Efecto de la Temperatura..... | 26 |
| 5.3 Procedimiento para el tratamiento con ozono..... | 26 |
| 5.4 Procedimiento para el tratamiento con cloro..... | 26 |
| 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS | 27 |
| 6.1 Tratamiento con peróxido de hidrógeno..... | 29 |
| 6.2 Tratamiento mediante proceso Fenton..... | 33 |
| 6.2.1 Efecto de la temperatura en el proceso..... | 40 |
| 6.3 Tratamiento mediante ozono..... | 41 |
| 6.4 Tratamiento con cloro..... | 49 |
| 6.5 Comparación entre los tratamientos..... | 54 |
| 7 CONCLUSIONES | 69 |
| 8 REFERENCIAS | 71 |
| 9 ANEXOS | |
| 9.1 Anexo “A”: Comparación entre el tratamiento con H ₂ O ₂ y tratamiento Fenton..... | 74 |
| 9.2 Anexo “B”: Comparación entre el tratamiento con ozono y ozono a pH alcalino... | 78 |
| 9.3 Anexo “C”: Representación de los datos obtenidos con cloro..... | 91 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro A: Tipos de Procesos Avanzados de Oxidación..... | 7 |
| Cuadro 1: Determinación de la Absorbancia inicial para cada concentración del colorante azul marino drimanen CL-R en ppm..... | 28 |
| Cuadro 2: Datos obtenidos de la absorbancia de cada concentración del colorante sometida al tratamiento con peróxido de hidrógeno..... | 31 |
| Cuadro 3: Datos obtenidos de la absorbancia de cada concentración del colorante sometida al tratamiento mediante Proceso Fenton..... | 34 |
| Cuadro 4: Comparación de absorbancia medida del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones utilizando el tratamiento con peróxido de hidrógeno comercial (TP) y tratamiento Fenton (TF)..... | 36 |
| Cuadro 5: Porcentaje de disminución de color en relación 1:1 para el tratamiento con peróxido de hidrogeno (TP) (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno) y tratamiento Fenton (TF) (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso)..... | 38 |
| Cuadro 6: Porcentaje de disminución de color en relación 1:4 para el tratamiento con peróxido de hidrógeno (TP) (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 4 partes de peróxido de hidrógeno) y tratamiento Fenton (TF) (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 4 partes de peróxido de hidrógeno y 4 partes de sulfato ferroso)..... | 39 |
| Cuadro 7: Efecto de la temperatura sobre la reacción tratada con el proceso Fenton..... | 40 |
| Cuadro 8: Datos obtenidos de absorbancia siguiendo la secuencia de degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones en ppm, empleando ozono..... | 41 |
| Cuadro 9: Optimización de pH que se realizó con Hidróxido de Sodio (0.5 M) para llevar a cabo el tratamiento de ozono en medio básico..... | 44 |

| | |
|--|----|
| Cuadro 10: Datos obtenidos de la absorbancia siguiendo la secuencia de degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones empleando ozono en medio básico..... | 46 |
| Cuadro 11: Datos obtenidos del estudio de la degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones empleando cloro, (10/100 mL)..... | 50 |
| Cuadro 12: Porcentajes de degradación de color mediante el tratamiento con cloro para las muestras del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones..... | 54 |
| Cuadro 13: Porcentajes de degradación de color de cada uno de los tratamientos empleados..... | 60 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | |
|--|----|
| Gráfica 1: Determinación de la Longitud de Onda máxima para la muestra de 20 ppm de colorante azul marino drimanen CL-R..... | 27 |
| Gráfica 1.1: Curva patrón de la determinación de la Absorbancia inicial para cada concentración del colorante azul marino drimanen CL-R..... | 29 |
| Gráfica 2: Representación de los datos obtenidos de la absorbancia de cada concentración del colorante utilizando peróxido de hidrógeno como oxidante a condiciones ácidas, desde la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno), hasta la relación 1:12 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 12 partes de peróxido de hidrógeno)..... | 32 |
| Gráfica 3: Representación de los datos obtenidos de la absorbancia de cada concentración del colorante utilizando peróxido de hidrógeno y solución de sulfato ferroso como catalizador a condiciones ácidas..... | 35 |
| Gráfica 4: Representación de los datos obtenidos de absorbancia siguiendo la secuencia degradación de color de cada concentración del colorante empleando ozono..... | 43 |
| Gráfica 4.1: Representación de los datos obtenidos de la absorbancia siguiendo la degradación de la concentración de 60 ppm del colorante a diferentes pH's empleando ozono..... | 45 |
| Gráfica 5: Secuencia de degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones utilizando cloro..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Gráfica 6: Secuencia de degradación en los primeros 15 segundos de reacción del colorante azul marino drimanen CL-R con cloro..... | 53 |
| Gráfica 7: Comparación entre los tratamientos con peróxido de hidrógeno (TP) y Fenton (TF) en relación 1:1..... | 55 |
| Gráfica 8: Comparación entre los tratamientos con peróxido de hidrógeno (TP) y Fenton (TF) en relación 1:4..... | 56 |
| Gráfica 9: Comparación entre los tratamientos con ozono y ozono en medio alcalino, con tiempo de reacción de 20 y 60 minutos..... | 57 |
| Gráfica 9.1: Comparación entre tratamiento con ozono y tratamiento con ozono en medio alcalino, con tiempo de reacción de 2 minutos..... | 58 |
| Gráfica 10: Comparación del tratamiento con cloro a diferentes tiempos..... | 59 |
| Gráfica 11: Porcentajes de degradación de color de cada uno de los tratamientos empleados..... | 61 |
| Gráfica 12: Porcentajes de degradación de color de los tratamientos con ozono, ozono a pH alcalino y tratamiento con cloro..... | 62 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura A: Ejemplos estructurales de colorantes textiles..... | 4 |
| Figura 1: Representación de las soluciones de colorante azul marino drimanen CL-R.... | 28 |
| Figura 2: Representación de las soluciones de colorante azul marino drimanen CL-R tratadas con cloro al cabo de 5 minutos..... | 52 |
| Figura 3: Representación de las soluciones de colorante azul marino drimanen CL-R tratadas con cloro al cabo de 1 hora..... | 52 |

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

| | |
|--|----|
| Diagrama 1: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro..... | 63 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Diagrama 2: Análisis espectroscópico de IR para agua destilada..... | 64 |
| Diagrama 3: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro y las muestras tratadas con peróxido de hidrógeno y peróxido de hidrógeno /Fe (Tratamiento Fenton)..... | 65 |
| Diagrama 4: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro y la muestra tratada con ozono..... | 66 |
| Diagrama 5: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro y la muestra tratada con ozono a pH alcalino..... | 67 |
| Diagrama 6: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro y la muestra tratada con cloro..... | 68 |

ÍNDICE DE ESQUEMAS

| | |
|---|----|
| Esquema 1: Comparación entre la secuencia de degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones utilizando ozono y ozono a pH básico..... | 47 |
| Esquema A: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 10 ppm..... | 79 |
| Esquema B: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 10 ppm..... | 80 |
| Esquema C: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 20 ppm..... | 81 |
| Esquema D: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 20 ppm..... | 82 |
| Esquema E: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 30 ppm..... | 83 |
| Esquema F: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 30 ppm..... | 84 |

| | |
|---|----|
| Esquema G: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 40 ppm..... | 85 |
| Esquema H: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 40 ppm..... | 86 |
| Esquema I: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 50 ppm..... | 87 |
| Esquema J: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 50 ppm..... | 88 |
| Esquema K: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 60 ppm..... | 89 |
| Esquema L: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 60 ppm..... | 90 |
| Esquema M: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 10 ppm..... | 91 |
| Esquema N: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 20 ppm..... | 92 |
| Esquema Ñ: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 30 ppm..... | 93 |
| Esquema O: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 40 ppm..... | 94 |
| Esquema P: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 50 ppm..... | 95 |
| Esquema Q: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 60 ppm..... | 96 |

1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se aplican métodos de oxidación al colorante azul marino drimanen CL-R, el cual fue proporcionado por una empresa dedicada a la venta de colorantes industriales que lo utilizan en el teñido de la mezclilla. La contaminación de las aguas residuales de la industria textil en su mayoría se debe a la presencia de colorantes, por lo que se investigó la degradación de dichos compuestos a través de procesos tales como: tratamiento con peróxido, mediante proceso Fenton, ozono, ozono y peróxido de hidrógeno a pH alcalino y cloro.

Mediante los tratamientos antes mencionados se evaluó aquel que fuera capaz de degradar dicho colorante pero también, aquel que sea el más eficaz para la degradación en cuanto a tiempo y costo del proceso.

Este trabajo servirá de fundamento para próximas investigaciones en donde se comparará el comportamiento de colorantes presentes en aguas residuales industriales con los resultados experimentales aquí obtenidos y valorar como influyen los tratamientos sobre los colorantes descargados al medio ambiente.

2 GENERALIDADES

2.1 Industria Textil

La producción y confección de la mezclilla son actividades muy importantes dentro de la industria textil nacional y que se asienta principalmente en los estados de México, Puebla y Tlaxcala.¹

A pesar de que la propia Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) ha catalogado a las industrias textiles como las empresas más contaminantes de Tehuacán Puebla, aún por encima de las granjas porcícolas y otras empresas, nada se hace por controlar e impedir la contaminación que estas empresas generan en el medio ambiente regional, la PROFEPA ha certificado a las industrias textiles que operan en Tehuacán como “empresas limpias”, ya que dichas industrias se han sometido a auditorías ambientales voluntarias, en las que a pesar de la evidente contaminación del agua, las premian de esta manera para limpiar la mala imagen que tienen.²

El surgimiento de las maquiladoras fabricantes de pantalones de mezclilla ha deteriorado de un modo significativo el medio ambiente que las rodea. Los tintes utilizados en el proceso de fabricación contienen importantes cantidades de sustancias químicas tóxicas.³ Las descargas de agua de las industrias textiles son principalmente de color azul oscuro proveniente de los diferentes procesos que se le dan a la mezclilla, pero es principalmente debido al teñido,⁴ estos colorantes sintéticos se han identificado como los principales contaminantes del agua.^{5,6}

¹ Investigación y desarrollo. Industria textil. Consultado el 9 de agosto de 2010. Disponible en: www.invdes.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=656:logran-prometedora-forma-paradestenir-mezclilla.

² El agua y la contaminación Ambiental. Consultado el 10 de Agosto de 2010. Disponible en: www.scribd.com/doc/.../agua-contaminacionambiental.

³ Tehuacán: Divining Destiny (En español). Consultado el 29 de Julio de 2010. Disponible en: <http://www.circleofblue.org/waternews/2010/world/tehuacan-divining-destiny-en-espanol>

⁴ Lodha, Bharat y Sanjeev Chaudhari. OPTIMIZATION OF FENTON-BIOLOGICAL TREATMENT SCHEME FOR THE TREATMENT OF AQUEOUS DYE SOLUTIONS. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 459–466.

⁵ Behnajady, M.A., N. Modirshahla y F. Ghanbary. A KINETIC MODEL FOR THE DECOLORIZATION OF C.I. ACID YELLOW 23 BY FENTON PROCESS. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 98–102.

⁶ Papić, Sanja, Dinko Vujević, Natalija Koprivanac y Danijel Šinko. DECOLOURIZATION AND MINERALIZATION OF COMMERCIAL REACTIVE DYES BY USING HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS FENTON AND UV/FENTON PROCESSES. *Journal of Hazardous Materials* 164 (2009) 1137–1145.

2.2 Características de los colorantes textiles

Los colorantes textiles tienen son aquellos que tienen gran persistencia en el ambiente ⁷ y los métodos de eliminación clásicos no son útiles debido a que oxidaciones o reducciones parciales pueden generar productos secundarios altamente tóxicos. Una gran proporción de los colorantes no son directamente tóxicos para los organismos vivos; sin embargo, la fuerte coloración que imparten a los medios de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en los cursos de agua, impidiendo la penetración de la luz y dañar el ecosistema que ahí se encuentra, por lo que su presencia debe ser controlada.^{7, 8, 9}

Más de 700,000 toneladas de aproximadamente 10,000 tipos de colorantes se producen anualmente en todo el mundo y 280,000 toneladas de tintes de materia textil se descargan cada año.^{4,10}

De los colorantes disponibles en el mercado, aproximadamente el 50% corresponde a los compuestos azo,⁷ estos compuestos son la clase más grande de colorantes sintéticos o xenobióticos,⁸ muy solubles en agua, altamente resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables. Son caracterizados por la presencia de uno o más enlaces azo, que se refiere a un enlace nitrógeno-nitrógeno ($-N=N-$), antraquinona o ftalocianina, en asociación con uno o más sistemas aromáticos,⁵ también, por formar una unión éter con la fibra, lo que garantiza una mayor duración del color en el tejido.⁹

La figura A muestra ejemplos de las estructuras de los colorantes.

⁴ Lodha, Bharat y Sanjeev Chaudhari. OPTIMIZATION OF FENTON-BIOLOGICAL TREATMENT SCHEME FOR THE TREATMENT OF AQUEOUS DYE SOLUTIONS. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 459–466.

⁵ Behnajady, M.A., N. Modirshahla y F. Ghanbary. A KINETIC MODEL FOR THE DECOLORIZATION OF C.I. ACID YELLOW 23 BY FENTON PROCESS. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 98–102.

⁷ Quezada, Maribel y Germán Buitrón. BIODEGRADACIÓN AEROBIA DE COLORANTES TIPO AZO (ROJO ÁCIDO 151). Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1996.

⁸ Guerrero. M. Elena, Roberto Briones Méndez e Ilangovan Kuppasamy. BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA DE COLORANTES TIPO AZO VÍA SULFATO-REDUCTORAS. Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1996.

⁹ Mansilla, Héctor D., Cristian Lizama, Abel Gutarra y Juan Rodríguez. TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA DE CELULOSA Y TEXTIL. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 2001.

¹⁰ Constapel, M., Marc Schellenträger, Joachim Michael Marzinkowski y Siegmund Gáb. DEGRADATION OF REACTIVE DYES IN WASTEWATER FROM THE TEXTILE INDUSTRY BY OZONE: ANALYSIS OF THE PRODUCTS BY ACCURATE MASSES. *Water research* 43 (2009) 733–743.

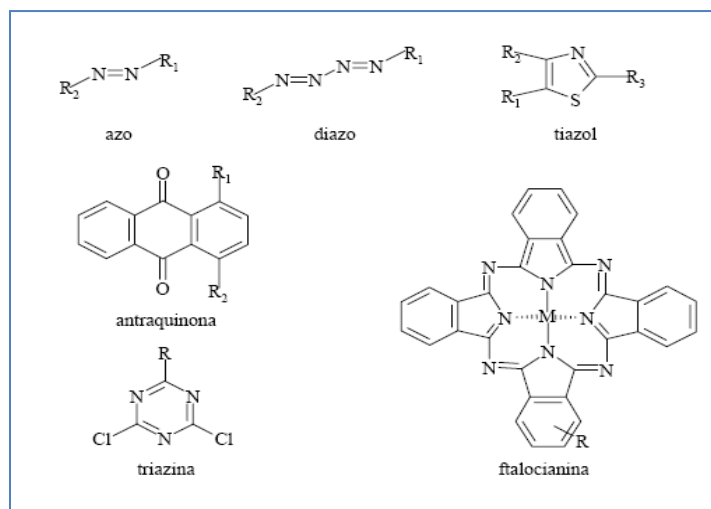


Figura A: Ejemplos estructurales de colorantes textiles.

Muchos estudios indican que la mayor parte de estos colorantes azoicos son tóxicos o carcinógenos.^{4,5} De esta cantidad, aproximadamente el 20% son desechados como parte de los efluentes de la industria textil sin tratamiento previo. Los colorantes reactivos representan una cuota de mercado creciente, ya que, cerca del 20-30% se utilizan para teñir algodón.⁶ Una dificultad adicional es que estos colorantes no son removidos normalmente por los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales, que se basan en la adsorción y la biodegradación aeróbica, tienen baja eficiencia en la eliminación de los colorantes.⁶ El color de las aguas residuales de la industria textil no son fácilmente biodegradables. Por lo tanto, los efluentes deben ser tratados antes de ser vertidos en el ambiente acuático y terrestre.⁵ Las tecnologías tradicionales de tratamiento aplicadas al tratamiento de aguas residuales tales como coagulación/floculación, membrana de separación o adsorción con carbón activado y tratamiento biológico no son adecuadas para la solución del problema debido a la resistencia biológica de los colorantes,⁶ puesto que los colorantes fueron diseñados intencionalmente para resistir la degradación.¹¹

⁴ Lodha, Bharat y Sanjeev Chaudhari. OPTIMIZATION OF FENTON-BIOLOGICAL TREATMENT SCHEME FOR THE TREATMENT OF AQUEOUS DYE SOLUTIONS. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 459-466.

⁵ Behnadjy, M.A., N. Modirshahla y F. Ghanbary. A KINETIC MODEL FOR THE DECOLORIZATION OF C.I. ACID YELLOW 23 BY FENTON PROCESS. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 98-102.

⁶ Papić, Sanja, Dinko Vujević, Natalija Koprivanac y Danijel Šinko. DECOLOURIZATION AND MINERALIZATION OF COMMERCIAL REACTIVE DYES BY USING HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS FENTON AND UV/FENTON PROCESSES. *Journal of Hazardous Materials* 164 (2009) 1137-1145.

¹¹ Wu, Jiangning, Huo Doan y Simant Upreti. DECOLORIZATION OF AQUEOUS TEXTILE REACTIVE DYE BY OZONE. *Chemical Engineering Journal* 142 (2008) 156-160.

Por lo tanto, es necesario encontrar una tecnología de tratamiento de aguas residuales generadas por la actividad humana,⁸ que sea eficaz y conduzca a la destrucción completa de las moléculas de colorante, debido a limitados recursos de agua que se vive mundialmente y la necesidad de la conservación de la naturaleza.⁶

Entre los varios procesos en la industria textil, el proceso de teñido utiliza gran cantidad de agua. Así, el agua residual generada de las industrias de transformación de la materia textil contiene: sólidos suspendidos, colorantes, productos químicos auxiliares que se utilizan en varias etapas del proceso de teñido, etc. La presencia de incluso pequeñas cantidades de colorantes en el agua (por ejemplo 10-20 mg/L) es altamente visible.¹²

En los efluentes se pueden encontrar sales, almidón, peróxidos, EDTA, tensoactivos, enzimas, colorantes, metales y otros compuestos orgánicos de variada estructura, que provienen de las distintas etapas del proceso global.⁹

La cantidad de agua empleada en los procesos textiles varía en forma considerable, dependiendo del proceso específico y del equipamiento utilizado por la planta. Por ejemplo, en el teñido con colorantes dispersos, se utilizan entre 100 y 150 litros de agua por kilogramo de producto. En la tinción con colorantes reactivos, las cifras varían entre 125 y 170 litros por kilogramo de producto.⁹

⁶ Papić y cols. DECOLOURIZATION AND MINERALIZATION OF COMMERCIAL REACTIVE DYES BY USING HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS FENTON AND UV/FENTON PROC. *J. Hazard. Mater.* 164 (2009) 1137–1145.

⁸ Guerrero, M. Elena, Roberto Briones Méndez e Ilangovan Kuppusamy. BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA DE COLORANTES TIPO AZO VÍA SULFATO-REDUCTORAS. Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1996.

⁹ Mansilla, Héctor D., Cristian Lizama, Abel Gutarra y Juan Rodríguez. TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA DE CELULOSA Y TEXTIL. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 2001.

¹² Rajkumar, D. y Jong Guk Kim. OXIDATION OF VARIOUS REACTIVE DYES WITH IN SITU ELECTRO-GENERATED ACTIVE CHLORINE FOR TEXTILE DYEING INDUSTRY WASTEWATER TREATMENT. *Journal of Hazardous Materials B136* (2006) 203–212.

2.3 Procesos Avanzados de Oxidación

Recientemente, se han desarrollado, en los países industrializados, métodos de tratamiento químico, basados en la generación de radicales hidroxilo, conocidos como Tecnologías o Procesos Avanzados de Oxidación (AOPs). La mayoría de estos procesos puede aplicarse a la remediación y destoxificación de aguas residuales; por ello, es una de las alternativas potenciales para decolorar los efluentes de teñido y de acabado de la industria textil.^{5, 13}

La oxidación química tiene como objetivo la mineralización de los contaminantes para transformarlos en productos inofensivos.¹⁴ Estos tratamientos se basan en la generación in situ de los radicales hidroxilo (HO•) altamente reactivos. Estos radicales son especies altamente oxidantes, atacan la mayoría de las moléculas orgánicas. También se caracterizan por la baja selectividad de ataque, que es una característica útil para un oxidante utilizado en el tratamiento de aguas residuales.⁶

Los Procesos Avanzados de Oxidación se dividen en Procesos no fotoquímicos y Procesos fotoquímicos. Los Procesos no fotoquímicos se dividen a su vez en: Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-), Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2), Procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2), Oxidación electroquímica, Radiólisis y tratamiento con haces de electrones, Plasma no térmico, Descarga electrohidráulica - Ultrasonido y Oxidación en agua sub/supercrítica. Los Procesos fotoquímicos se subdividen en: Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV), UV/peróxido de hidrógeno, UV/ O_3 , Foto-Fenton, Ferrioxalato y otros complejos de Fe(III), UV/periodato y Fotocatálisis heterogénea.¹³

En el cuadro A se resumen los 2 tipos de Procesos Avanzados de Oxidación anunciados anteriormente; así como las respectivas divisiones de cada uno de ellos.

⁵ Behnajady, M.A., N. Modirshahla y F. Ghanbary. A KINETIC MODEL FOR THE DECOLORIZATION OF C.I. ACID YELLOW 23 BY FENTON PROCESS. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 98–102.

⁶ Papić, Sanja, Dinko Vujević, Natalija Koprivanac y Danijel Šinko. DECOLOURIZATION AND MINERALIZATION OF COMMERCIAL REACTIVE DYES BY USING HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS FENTON AND UV/FENTON PROCESSES. *Journal of Hazardous Materials* 164 (2009) 1137–1145.

¹³ Domènech Xavier, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.

¹⁴ Yagüe, C. S. ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS DE INDUSTRIAS DE ACABADO DE PIEL MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España, 2001.

Cuadro A: Tipos de Procesos Avanzados de Oxidación.

| Procesos no fotoquímicos | Procesos fotoquímicos |
|--|--|
| Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-) | Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV) |
| Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2) | UV/peróxido de hidrógeno |
| Procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2) | UV/ O_3 |
| Oxidación electroquímica | Foto- Fenton |
| Radiólisis y tratamiento con haces de electrones | Ferrioxalato y otros complejos de Fe(III) |
| Plasma no térmico | UV/periodato |
| Descarga electrohidráulica - Ultrasonido | Fotocatálisis heterogénea |
| Oxidación en agua sub/y supercrítica | |

Dentro de las ventajas de los Procesos Avanzados de Oxidación indicadas por Domènech, Jardim y Litter, se pueden mencionar las siguientes:

- No sólo cambian de fase al contaminante, sino que lo transforman químicamente.
- Generalmente se consigue la mineralización completa (destrucción) del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies muy fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- Usualmente no generan lodos que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.
- Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
- Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pre-tratamientos alternativos, como la desinfección.
- Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración).
- Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables, luego por métodos más económicos como el tratamiento biológico.

- Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.

Los tipos de Procesos Avanzados de Oxidación utilizados para este trabajo son de tipo no fotoquímico, como son: ozonización, ozonización con peróxido de hidrógeno en medio alcalino y proceso Fenton.

2.4 Tratamiento mediante peróxido de hidrógeno y proceso Fenton

El proceso Fenton se trata de un sistema catalítico homogéneo en el cual una sal de hierro, habitualmente FeSO_4 interacciona con peróxido de hidrógeno, típicamente a presión atmosférica, temperatura entre 20°C y 40°C y condiciones ácidas,¹⁵ esto implica la generación y subsecuente reacción de radicales hidroxilo, que son las especies oxidantes.¹⁶

Entre los procesos físico-químicos de oxidación, el proceso Fenton es uno de los procesos más antiguos procesos de oxidación avanzada que se utiliza con éxito, ya que es relativamente barato y fácil de manejar.¹⁷

El peróxido de hidrógeno es un oxidante muy interesante dentro de los oxidantes convencionales más utilizados, es cada vez más empleado debido a que no produce compuestos clorados, y a que su uso no genera precipitados, descomponiéndose en agua y oxígeno que aumentan la biodegradabilidad del efluente. Además, el peróxido de hidrógeno no es biocida, por lo que no afecta a un tratamiento biológico posterior. Dependiendo de las condiciones de reacción y de las especies presentes en el medio, el peróxido de hidrógeno puede reaccionar de forma directa o tras haberse dissociado en radicales libres.¹⁴

¹⁴ Yagüe, C. S. ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS DE INDUSTRIAS DE ACABADO DE PIEL MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España, 2001.

¹⁵ Barros, A.L. y cols. DECOLORIZING DYE WASTEWATER FROM THE AGATE INDUSTRY WITH FENTON OXIDATION PROCESS. Minerals Eng. 19 (2006) 87–90.

¹⁶ Figueroa, Sandra y cols. DECOLORIZING TEXTILE WASTEWATER WITH FENTON'S REAGENT ELECTROGENERATED WITH A SOLAR PHOTOVOLTAIC CELL. Water Res. 43 (2009) 283–294.

¹⁷ P, Nilesh Tantak y Sanjeev Chaudhari. DEGRADATION OF AZO DYES BY SEQUENTIAL FENTON'S OXIDATION AND AEROBIC BIOLOGICAL TREATMENT. Journal of Hazardous Materials B136 (2006) 698–705.

Presenta una gran selectividad de oxidación, particularmente bajo las condiciones adecuadas de concentración, pH y temperatura. Hay que tener en cuenta que si se utiliza un exceso de peróxido de hidrógeno, los radicales hidroxilo producen radicales hidroperóxido que son mucho menos reactivos que los hidroxilo y, por lo tanto, reducen la eficiencia de la oxidación. En presencia de catalizadores, como el hierro, mejora la oxidación, generando radicales hidroxilo que reaccionan con sustancias orgánicas.¹⁴

2.4.1 Parámetros que influyen en el proceso Fenton

La eficacia del proceso de Fenton depende de las concentraciones de H_2O_2 y de Fe^{2+} , así como del pH de la reacción, cuyo valor debe estar en la gama de 3-5.¹⁸

Este proceso posee la ventaja de producir simultáneamente la oxidación y coagulación química. El radical hidroxilo generado reacciona rápidamente y de manera no selectiva con muchos compuestos orgánicos por la hidrógeno-abstracción y adición a los enlaces C-C insaturados, por lo que al atacar a los enlaces C-C insaturados de las moléculas del colorante causa la descomposición de estos compuestos y se consigue la eliminación del color.¹⁴

Los conocidos ensayos de Fenton de fines del siglo XIX demostraron que las soluciones de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas eran capaces de oxidar los ácidos tartárico y málico, y otros compuestos orgánicos. Más tarde, Haber y Weiss sugirieron que se formaba HO^\bullet por la reacción (1).¹³

El sistema Fenton utiliza iones ferroso para reaccionar con el peróxido de hidrógeno, produciendo radicales hidroxilo con capacidades oxidantes de gran alcance con el objetivo degradar ciertos contaminantes tóxicos.⁵

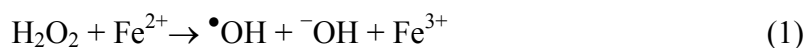
⁵ Behnajady y cols. A KINETIC MODEL FOR THE DECOLORIZATION OF C.I. ACID YELLOW 23 BY FENTON PROCESS. J. Hazard. Mater. 148 (2007) 98–102.

¹³ Doménech Xavier, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.

¹⁴ Yagüe, C. S. ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS DE INDUSTRIAS DE ACABADO DE PIEL MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España, 2001.

¹⁸ Hameed, B.H. y T.W. Lee. DEGRADATION OF MALACHITE GREEN IN AQUEOUS SOLUTION BY FENTON PROCESS. Journal of Hazardous Materials 164 (2009) 468–472.

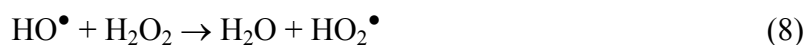
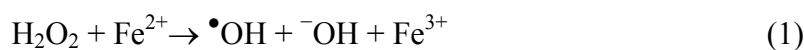
Los radicales hidroxilo pueden reaccionar con los iones ferroso y convertirse en iones férricos o reaccionar con la materia orgánica: ⁵



2.4.1.1 Influencia del pH

La velocidad de la reacción es máxima en un pH próximo a 2.8; a pH alto la velocidad disminuye debido a la precipitación de hierro en forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. ¹⁹

A $\text{pH} < 3$, la reacción es autocatalítica, ya que el $\text{Fe}(\text{III})$ descompone H_2O_2 en O_2 y H_2O a través de un mecanismo en cadena:



El proceso es potencialmente útil para destruir contaminantes, ya que es muy efectivo para la generación de $\text{HO}\bullet$, pero un exceso de iones Fe^{2+} , puede atraparlos (reacción 2), al igual que el mismo H_2O_2 o el radical hidropéroxido, tal como se muestra en la siguiente reacción: ¹³

⁵ Behnajady y cols. A KINETIC MODEL FOR THE DECOLORIZATION OF C.I. ACID YELLOW 23 BY FENTON PROCESS. J. Hazard. Mater. 148 (2007) 98-102.

¹³ Domènech Xavier, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.

¹⁹Pignatello, Joseph J, Esther Oliveros y Allison MacKay. ADVANCED OXIDATION PROCESSES FOR ORGANIC CONTAMINANT DESTRUCTION BASED ON THE FENTON REACTION AND RELATED CHEMISTRY. Environmental Science and Technology 35(2006) 1-84.



2.4.1.2 Temperatura

La reacción que se lleva a cabo en el proceso Fenton es endotérmica (cualquier reacción química que absorbe energía), la velocidad de oxidación (degradación de color) aumenta al aumentar la temperatura.^{18,20}

Los radicales hidroxilo pueden también reaccionar con el peróxido de hidrógeno para producir radicales hidroperóxido, y logran asimismo combinarse entre sí para producir el peróxido de hidrógeno:³



El proceso Fenton es un sistema oxidativo atractivo para el tratamiento de aguas residuales debido al hecho de que el hierro es un elemento muy abundante y no tóxico y el peróxido de hidrógeno es fácil de dirigir y ambientalmente seguro,²¹ no se forman compuestos clorados como en otras técnicas oxidantes, y no existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo. El diseño de reactores para la aplicación tecnológica es bastante sencillo. En contraposición, requiere la adición continua y estequiométrica de Fe(II) y H₂O₂, es decir, necesita una alta concentración de Fe. Sin embargo, debe tenerse en cuenta siempre que un exceso de Fe (II) puede causar condiciones para el atrapamiento de HO[•], tal como se muestra en la reacción 8.¹³

La constante de velocidad para la reacción de ion ferroso con H₂O₂ es alta, y el Fe(II) se oxida a Fe(III) en segundos o minutos en exceso de H₂O₂. Se cree por ello que la

³Tehuacán: Divining Destiny (En español). Consultado el 29 de Julio de 2010. Disponible en: <http://www.circleofblue.org/waternews/2010/world/tehuacan-divining-destiny-en-espanol>

¹³ Domènech y cols. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.

¹⁸ Hameed, B.H. y T.W. Lee. DEGRADATION OF MALACHITE GREEN IN AQUEOUS SOLUTION BY FENTON PROCESS. Journal of Hazardous Materials 164 (2009) 468–472.

²⁰ Zhang H., Choi H.J., HUANG C. OPTIMIZATION OF FENTON PROCESS FOR THE TREATMENT OF LANDFILL LEACHATE. Journal of Hazardous Materials 125 (2005) 166-174.

²¹ Andreozzi, Roberto, Vincenzo Caprio, Amedeo Insola y Raffaele Marotta. ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOP) FOR WATER PURIFICATION AND RECOVERY. Catalysis Today 53 (1999) 51–59.

destrucción de residuos por el reactivo de Fenton es simplemente un proceso catalizado por $\text{Fe(III)-H}_2\text{O}_2$, y que el reactivo de Fenton con exceso de H_2O_2 es esencialmente un proceso de $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$.¹³

2.4.1.3 Relación Fe(II)/ H_2O_2

La concentración de hierro y la dosis de H_2O_2 influyen sobre la eficacia y cinética de la reacción, por ejemplo, un exceso de hierro da lugar a una disminución de la eficacia debido a la activación de reacciones secundarias no deseadas, por otro lado, un exceso de H_2O_2 conlleva a la degradación del mismo por los radicales hidroxilo.¹⁹

Teóricamente, la relación estequiométrica molar H_2O_2 /substrato debe oscilar entre 2 y 10 cuando se usa el reactivo para la destrucción de compuestos solubles. Sin embargo, en la práctica esta relación puede ser a veces de hasta 1000, ya que en muestras ambientales el compuesto a destruir siempre viene acompañado de otros que también pueden ser atacados por el HO^\bullet . La relación peróxido/Fe/compuesto puede ser mantenida por adición intermitente del oxidante o fijada al inicio de la reacción. En el laboratorio, el agregado de fierro se realiza tradicionalmente en forma de sales ferrosas puras, pero en escalas mayores el uso de éstas se vuelve prohibitivamente caro, y normalmente se usa $\text{Fe}_2(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, que contiene 20% de hierro activo.¹³

2.5 Tratamiento mediante ozono

La ozonización es un tratamiento común para el tratamiento de las aguas residuales que contengan color, además, aumenta la biodegradabilidad de las aguas residuales.²²

¹³Domènech Xavier, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.

¹⁹Pignatello, Joseph J, Esther Oliveros y Allison MacKay. ADVANCED OXIDATION PROCESSES FOR ORGANIC CONTAMINANT DESTRUCTION BASED ON THE FENTON REACTION AND RELATED CHEMISTRY. Environmental Science and Technology 35(2006) 1-84.

²²W, Laura Lackey, Richard O. Mines Jr. y Philip T. McCreanor. OZONATION OF ACID YELLOW 17 DYE IN A SEMI-BATCH BUBBLE COLUMN. Journal of Hazardous Materials B138 (2006) 357-362.

Después de generar el ozono, éste se pone en contacto forzoso con el agua fuente y se mezcla durante un tiempo apropiado de contacto. Debido a que el ozono está constituido por oxígeno, no produce sabores ni olores residuales en el agua.²³

El ozono es un oxidante muy fuerte ($E^\circ = 2.07 \text{ V}$) y reacciona rápidamente con la mayoría de compuestos orgánicos;²⁴ fue empleado por primera vez para la desinfección de aguas de abastecimiento en Francia a principios del siglo XX. Su uso aumentó y posteriormente se expandió a diversos países europeos occidentales. Un uso común del ozono se centra en el control de los agentes responsables de la producción de sabores, olores y colores.¹⁴ En general, su uso ha permitido un notable mejoramiento del sabor, color, características de filtración y biodegradabilidad de las mismas.¹³

Ahora es ampliamente aceptado que el ozono reacciona en solución acuosa con varios compuestos orgánicos e inorgánicos, ya sea por una reacción directa del ozono molecular o a través de una reacción de tipo radical que implica al radical hidroxilo producido por la descomposición del ozono en agua.²⁴

El ozono y los radicales hidroxilo generados en solución acuosa son capaces de abrir los anillos aromáticos de la estructura de los colorantes, la molécula de ozono es selectiva y los ataques son preferentemente a los enlaces insaturados de los grupos cromóforos. Por esta razón la eliminación de color por la acción del ozono es rápida.²⁴

La acción del ozono sobre las sustancias orgánicas es la siguiente:

1. Con los compuestos alifáticos insaturados, el ozono lleva a cabo una adición en el doble enlace y una ruptura de la molécula.

¹³ Domènech Xavier, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.

¹⁴ Yagüe, C. S. ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS DE INDUSTRIAS DE ACABADO DE PIEL MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España, 2001.

²³ El agua potable segura y esencial. Oxidantes. Consultado el 15 de julio de 2010. Disponible en: <http://www.drinking-water.org/html/es/Treatment/Chemical-DisinfectionOxidants.html>

²⁴ G.P, Olívia Salomé S, José J.M. Órfao, Dionísia Portela, António Vieira, Manuel Fernando R. Pereira. OZONATION OF TEXTILE EFFLUENTS AND DYE SOLUTIONS UNDER CONTINUOUS OPERATION: INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS. Journal of Hazardous Materials B137 (2006) 1664–1673.

2. Con los compuestos alifáticos oxigenados, el ozono lleva a cabo una oxidación y ruptura de la molécula.
3. Con los compuestos orgánicos nitrogenados, el ozono ataca al par de electrones no compartidos del nitrógeno dando lugar a un ataque electrofílico.
4. Con los compuestos aromáticos, el ozono actúa sobre el anillo bencénico para hidroxilarlo primero y abrirlo después, con formación de compuestos alifáticos portadores de funciones carbonilo y carboxilo.

En un sistema acuoso, el ozono se puede descomponer para formar varios radicales libres, incluyendo OH^\bullet , HO_3^\bullet , HO_4^\bullet , y O_2^\bullet . El radical hidroxilo es el más poderoso entre los radicales libres de ozono para reaccionar con compuestos orgánicos.^{25, 14}

El proceso de ozonización, es particularmente atractivo para el tratamiento de aguas residuales porque el ozono puede destruir peligrosos contaminantes orgánicos, tales como los colorantes, compuestos fenólicos, plaguicidas, compuestos organoclorados y compuestos de amonio. El ozono molecular puede reaccionar de forma directa con los contaminantes disueltos, actúa como electrófilo y reacciona con las posiciones de la molécula de mayor densidad electrónica.²⁵

La descomposición de ozono se ve favorecida por los siguientes factores:¹⁴

1. Aumento del pH del agua por introducción de iones OH^- .
2. Existencia de radicales que contribuyan a propagar la reacción de descomposición.
3. Ausencia de especies como bicarbonatos y carbonatos que tienen gran afinidad por los radicales hidroxilo, la presencia de bicarbonatos estabilizaría la molécula de ozono.

La reacción directa del ozono es altamente selectiva, mucho más que la indirecta, aunque ésta es mucho más rápida.¹⁴

¹⁴ Yagüe, C. S. ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS DE INDUSTRIAS DE ACABADO DE PIEL MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España, 2001.

²⁵ Potabilización del agua. Antonio Sarmiento Sera. Profesor Titular del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia24/HTML/articulo04>

2.5.1 Efecto del pH de la solución

La influencia del pH es también evidente, puesto que en el mecanismo de la descomposición del ozono, la especie activa es la base conjugada HO_2^- cuya concentración es estrictamente dependiente del pH. El aumento del pH y la adición de H_2O_2 a la solución acuosa de O_3 dan como resultado mayores índices de producción de radicales OH^\bullet .²¹

El pH de la solución influye en el índice de generación de radicales para el sistema $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, los valores apropiados de este parámetro deben, por lo tanto, ser elegidos correctamente. Es necesario ajustar el pH del agua tratada en el valor determinado generalmente por medio de pruebas de laboratorio que permite el logro de la eficacia más alta de la disminución del agente contaminador.²¹

El pH de la solución altera la composición química del ozono, por ejemplo, los radicales hidroxilo se forman a partir de la descomposición de ozono a pH elevado, mientras que el ozono molecular sigue siendo el oxidante principal a pH bajo.²⁴

La decoloración se ve favorecida por el ataque directo del ozono, a valores bajos de pH, ya que el ozono molecular es selectivo para la destrucción de grupos cromóforos. Los radicales hidroxilo tienen un mayor potencial oxidante y son menos selectivos que el ozono molecular, dando lugar a una disminución de la decoloración y un aumento de la mineralización a valores altos de pH.²⁴

²¹ Andreozzi, Roberto, Vincenzo Caprio, Amedeo Insola y Raffaele Marotta. ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOP) FOR WATER PURIFICATION AND RECOVERY. *Catalysis Today* 53 (1999) 51–59.

²⁴ G.P, Olívia Salomé S, José J.M. Órfao, Dionísia Portela, António Vieira, Manuel Fernando R. Pereira. OZONATION OF TEXTILE EFFLUENTS AND DYE SOLUTIONS UNDER CONTINUOUS OPERATION: INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS. *Journal of Hazardous Materials B137* (2006) 1664–1673.

La ozonización es un proceso prometedor para la eliminación de color por las siguientes razones:²⁴

- No deja lodos químicos en el tratamiento de efluentes.
- Tiene el potencial para llevar a cabo, tanto la eliminación de color, como la reducción de compuestos orgánicos en un solo paso.
- Se requiere poco espacio y se instala fácilmente el equipo.
- Es menos dañino que otros procesos oxidativos.
- Es de fácil manejo; el ozono residual se descompone fácilmente a oxígeno y agua una vez que ha servido a sus fines.
- Reacciona fácilmente con los productos orgánicos no saturados presentes en las aguas residuales.
- La tendencia a la formación de espuma de las aguas residuales se reduce después del tratamiento con ozono.
- La ruptura de los anillos y la oxidación parcial de los productos aromáticos deja a las aguas residuales más susceptibles de tratamiento convencional biológico.

El color y el consumo de ozono son los parámetros más importantes para evaluar el desempeño de la decoloración permanente de los efluentes textiles. La eliminación de color determina la posibilidad de reutilización de efluentes y el consumo de ozono determina la ventaja económica.¹⁴

Estos parámetros dependen de:

- El tiempo de contacto
- Dosis de ozono
- Concentración del colorante
- El pH

¹⁴ Yagüe, C. S. ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS DE INDUSTRIAS DE ACABADO DE PIEL MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España, 2001.

²⁴ G.P, Olívia Salomé S, José J.M. Órfao, Dionísia Portela, António Vieira, Manuel Fernando R. Pereira. OZONATION OF TEXTILE EFFLUENTS AND DYE SOLUTIONS UNDER CONTINUOUS OPERATION: INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS. Journal of Hazardous Materials B137 (2006) 1664–1673.

2.6 Tratamiento mediante ozono y peróxido de hidrógeno a pH alcalino

Entre las posibles mezclas de agentes oxidantes, la combinación peróxido de hidrógeno y ozono es sin duda la más usada. El proceso pretende combinar la oxidación directa (y selectiva) del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales HO• con los compuestos orgánicos.¹³

La ozonización transforma los contaminantes refractarios en compuestos más simples. Se logra una mejoría agregando agua oxigenada. El H₂O₂ es un ácido débil, un poderoso oxidante y un compuesto inestable.¹³

Para ilustrar la química fundamental sobre la cual se basa el proceso O₃/H₂O₂, se requiere una referencia de la química del ozono en soluciones alcalinas. Se ha demostrado que la descomposición de ozono en una solución acuosa produce la formación de radicales OH•. En el mecanismo de reacción, el ion OH⁻ tiene el papel de iniciador:²¹



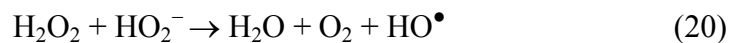
¹³ Domènech Xavier, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.

²¹ Andreozzi, Roberto, Vincenzo Caprio, Amedeo Insola y Raffaele Marotta. ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOP) FOR WATER PURIFICATION AND RECOVERY. Catalysis Today 53 (1999) 51–59.



El mecanismo también aclara el papel ejercido por el H_2O_2 , puesto que se forma durante la descomposición del ozono en la solución acuosa. Está claro, por lo tanto, que la adición de peróxido de hidrógeno a la solución acuosa del ozono incrementará la descomposición de O_3 para la formación de radicales OH^\bullet .²¹

El H_2O_2 puede iniciar la descomposición de O_3 por transferencia de electrones. La reacción genera HO^\bullet consumiendo H_2O_2 y O_3 , ecuación (21), a través de un mecanismo en cadena mostrado en las Ecuaciones (18) y (13) a (17'):¹³



¹³ Domènech Xavier, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.

²¹ Andreozzi, Roberto, Vincenzo Caprio, Amedeo Insola y Raffaele Marotta. ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOP) FOR WATER PURIFICATION AND RECOVERY.



El proceso es caro pero rápido y puede tratar contaminantes orgánicos presentes en muy bajas concentraciones (ppb), a pH entre 7 y 8; la relación molar óptima $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ es aproximadamente 2:1.¹³

El proceso se acelera a pH alcalino ($\text{pH} < 9$) como se deduce de los pre-equilibrios (18) y (13). A pesar de que el tratamiento mediante cloro no es un Proceso Avanzado de Oxidación, se estudia el efecto del mismo sobre la degradación del colorante.

2.7 Tratamiento mediante cloro

El cloro es un poderoso oxidante debido a su estructura de capa externa de 7 electrones, es por ello que posee alta reactividad.¹⁴

El cloro encuentra su principal aplicación como agente de blanqueo en las industrias papelera y textil; asimismo se emplea en la esterilización del agua potable y de las piscinas, y en las industrias de colorantes, medicamentos y desinfectantes. El cloro destruye, por desintegración, las materias orgánicas que contienen, por lo general, carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno.²⁶

¹³ Domènech Xavier, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.

¹⁴ Yagüe, C. S. ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS DE INDUSTRIAS DE ACABADO DE PIEL MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España, 2001.

²⁶ Compuestos. Aplicaciones. Cloro. Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en: <http://html.rincondelvago.com/halogenos.html>

El Cloro es un decolorante; muchas materias colorantes orgánicas pueden ser decoloradas por oxidación,²⁶ por ejemplo: en el tratamiento de la celulosa, en la industria papelera, textil, etc.²⁷

Las lejías contienen una disolución de la sustancia hipoclorito de sodio, NaClO. Esta disolución actúa sobre los colorantes haciendo que cambien de color.²⁸

Cuando se añade cloro o sus compuestos al agua, se desprenden los siguientes compuestos: ácido hipocloroso, ion hipoclorito y cloro elemental. Esta reacción tiene lugar en unos cuantos segundos a condiciones de presión y temperatura ambiente.²⁹

La distribución de las tres especies depende del pH. El cloro elemental, procedente del cloro gaseoso, sólo perdura durante poco tiempo dentro de la zona de pH normal. Tanto en el tratamiento de aguas destinadas a consumo humano, como en depuración de aguas residuales.¹⁴

Para la degradación de colorantes textiles, la acción del hipoclorito es muy fuerte sobre muchos colorantes, ataca por medio del cloro al grupo amino de los colorantes.³⁰

¹⁴ Yagüe, C. S. ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS DE INDUSTRIAS DE ACABADO DE PIEL MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España, 2001.

²⁶ Compuestos. Aplicaciones. Cloro. Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en: <http://html.rincondelvago.com/halogenos.html>

²⁷ Decolorantes y agentes blanqueadores. Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en: <http://www.jmcprl.net/glosario/decolorantes%20y%20agentes%20blanqueadores.htm>.

²⁸ Las aplicaciones del Cloro. Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en: <http://www.solvayiberica.es/static/wma/pdf/1/3/9/2/Ficha02a.pdf>

²⁹ EEP de Medellín, Departamento de Tratamiento de Acueducto, FUNDAMENTOS PARA LOS PROCESOS DE POTABILIZACIÓN, Tomos I y II.

³⁰ Misterios en los productos de limpieza, Marta Segura y Josep M Valls. Consultado el 30 de julio de 2010. Disponible en: http://www.consejogeneralcdl.es/jornadasfq_08/Misterios%20en%20los%20productos%20de%20limpieza.doc.

3 OBJETIVO GENERAL

Lograr experimentalmente la oxidación del colorante azul marino drimanen CL-R utilizado en la industria textil a través de diferentes procesos de oxidación como son: Tratamiento con peróxido de hidrógeno, Proceso Fenton, Ozonización y Tratamiento con cloro; así mismo, evaluar aquel proceso que sea capaz de degradar dicho colorante de manera más eficaz en cuanto a tiempo y costo.

3.1 Objetivos Particulares

- ④ Alcanzar la oxidación del colorante azul marino drimanen CL-R a través de Procesos Avanzados de Oxidación como una alternativa de tratamiento previo a los posibles procesos biológicos.
- ④ Determinar el efecto de los oxidantes químicos sobre el colorante azul marino drimanen CL-R a través de Espectroscopía de IR.
- ④ Comprobar la oxidación de la molécula del colorante a través de Espectroscopía de IR.
- ④ Evaluar el desempeño de la decoloración del colorante marino drimanen CL-R a través de Procesos Avanzados de Oxidación mediante la comparación de las gráficas obtenidas por espectrofotometría.
- ④ Optimizar la cantidad de oxidantes y las condiciones experimentales para lograr la oxidación del colorante azul marino drimanen CL-R.
- ④ Realizar un análisis comparativo del efecto de los oxidantes químicos y determinar cuál resulta más económico a nivel laboratorio.

4 MÉTODO EXPERIMENTAL

1.- Sujeto de estudio: Colorante azul marino drimanen CL-R.

2.- Material: Vasos de precipitados, matraces aforados, varilla de vidrio, espátula, pipetas volumétricas, placas cromatográficas, termómetro, tubos de ensayo, probeta graduada de 100 mL, tubos capilares.

3.- Equipo: Espectrofotómetro de UV-Visible, pH-metro, Espectroscopio de IR, Generador de ozono marca “ECO₃”, parrilla de calentamiento.

4.- Reactivos:

a) Peróxido de hidrógeno, marca comercial: “Grupo Dimacen”.

Fórmula: cada 100 mL contienen 25 gramos de peróxido de hidrógeno.

b) Hipoclorito de sodio, marca comercial: “Cloralex”.

Ingredientes: Agua, hipoclorito de sodio.

c) NaOH , H₂SO₄ y Sulfato Ferroso Amoniacal [Fe (NH₄)₂ (SO₄)₂ • 6H₂O] son reactivos Sigma.

d) Sílica gel, agua destilada, acetona, ácido acético, etanol.

5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1.- Para asegurarse que el colorante es puro y no se encuentra mezclado con algún otro color se procedió a realizar una cromatografía en capa fina utilizando como disolventes agua destilada, acetona, ácido acético y etanol.

2.- Se prepararon soluciones de diferentes concentraciones de colorante azul marino drimanen CL-R en “ppm”, en este caso fueron de: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60 ppm. Las soluciones fueron tratadas con diferentes procesos de oxidación.

3.- Una vez preparadas estas soluciones se procedió a hacer un barrido para determinar la Longitud de Onda máxima en la que absorbe dicho colorante, usando un Espectrofotómetro de UV-Visible marca Genesys TM 10 Series.

4.- A continuación se preparó una curva patrón para comparar y determinar la eficiencia del método empleado (en cuanto a eliminación de color). El “blanco” que se utilizó para las mediciones se preparó con cada reactivo que contiene el sistema en cada experimentación, sin adicionar el colorante azul marino drimanen CL-R.

5.- Posteriormente se llevaron a cabo pruebas con los diferentes tipos de oxidantes que sugiere el Proceso Fenton; en primer lugar, se trataron las soluciones del colorante únicamente con peróxido de hidrógeno de marca comercial a un pH ácido (pH=2) para estudiar el efecto de dicho reactivo. Posteriormente se realizaron las pruebas utilizando el catalizador de hierro para comparar los resultados obtenidos con el procedimiento antes mencionado.

6.- Para realizar la medida de pH se utilizó un pH-metro marca OAKTON PC510. La destrucción de la molécula se comprobó realizando pruebas de Espectroscopía de Infrarrojo con el aparato IR Affinity Shimadzu.

5.1 Procedimiento para el tratamiento con peróxido de hidrógeno:

Previamente, se hizo un estudio de la cantidad de ácido sulfúrico que se iba a agregar para acidular el sistema, ya que el tratamiento se lleva a cabo bajo condiciones ácidas, tanto para el tratamiento con peróxido de hidrógeno como para el tratamiento Fenton, en este caso, pH=2. Al momento de reproducir el sistema que arrojará los datos para la lectura de los resultados experimentales, se necesita contar por anticipado con la cantidad de ácido sulfúrico que se necesita para llevar el sistema hasta pH=2, ya que todas las lecturas se tomarán inmediatamente después de 10 segundos dado que la reacción es instantánea. Este estudio previo, por consiguiente, tuvo la finalidad de descubrir la cantidad de ácido

sulfúrico que el sistema requería. La forma de determinar dicha cantidad de H_2SO_4 fue la siguiente:

- ◆ Cuando se trató de la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno), primeramente se agregó en un tubo de ensayo 1 mL de colorante azul marino drimanen CL-R, se añadió 1 mL de peróxido de hidrógeno, la mezcla se agitó y se midió el pH inicial, se adicionaron cantidades conocidas de H_2SO_4 (0.1 M) hasta que llegar a pH=2 de la mezcla de reacción. Este procedimiento se repitió para las siguientes relaciones con las que se trabajó.

Una vez conocida la cantidad de H_2SO_4 (0.1 M) necesaria para llevar cada sistema a pH=2 se reprodujo cada uno de ellos de la siguiente manera:

- ◆ Para la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno), se midió 1 mL de colorante azul marino drimanen CL-R, se agregó 1 mL de peróxido de hidrógeno y se aciduló con la cantidad exacta de H_2SO_4 (0.1M) determinada previamente hasta pH=2, después, se midió la absorbancia pasados 10 segundos de reacción y se tomó la lectura medida en Espectrofotómetro. Este procedimiento se repitió para cada una de las relaciones con las que se trabajó, desde la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno), hasta la relación 1:12 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 12 partes de peróxido de hidrógeno) y para cada una de las soluciones preparadas del colorante que fueron: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60 ppm.

5.2 Procedimiento para el tratamiento mediante proceso Fenton:

Para un mejor uso del catalizador de Fe^{2+} (Solución de Sulfato Ferroso Amoniacal) se procedió a buscar la mejor concentración que se iba a emplear, esto con el fin de optimizar el sistema.

5.2.1 Optimización del catalizador de Fe²⁺

Se prepararon diferentes soluciones de Sulfato Ferroso Amoniacal [Fe (NH₄)₂ (SO₄)₂ • 6H₂O] de las siguientes concentraciones: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 y 600 ppm. Posteriormente se llevó a cabo la técnica del Proceso Fenton para cada una de las soluciones preparadas de sulfato ferroso, todas las pruebas se realizaron con la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso), la concentración escogida del colorante para esta determinación fue de 30 ppm. El procedimiento es el siguiente:

- ◆ Primeramente, se midió 1 mL de solución de colorante azul marino drimanen CL-R de 30 ppm, se agregó 1 mL de peróxido de hidrógeno y se aciduló con la cantidad exacta de H₂SO₄ (0.1M) hasta pH=2, se adicionó de igual manera, 1 mL de sulfato ferroso de 50 ppm, después, se midió la absorbancia pasados 10 segundos de reacción y se tomó la lectura medida en el Espectrofotómetro.
Este procedimiento se repitió con el resto de las once soluciones de las diferentes concentraciones de sulfato ferroso preparadas.

Una vez conocida la cantidad de H₂SO₄ necesaria para llevar cada sistema hasta pH=2 y la concentración óptima de catalizador, se reprodujo cada uno de ellos de la siguiente manera:

- ◆ Para la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso), se midió 1 mL de colorante azul marino drimanen CL-R, se agregó 1 mL de peróxido de hidrógeno y se aciduló con la cantidad exacta de H₂SO₄ (0.1 M) determinada previamente hasta pH=2, se adicionó de igual manera, 1 mL de sulfato ferroso (concentración óptima), después, se midió la absorbancia pasados 10 segundos de reacción y se tomó la lectura arrojada por el Espectrofotómetro.
Este procedimiento se repitió para cada una de las relaciones con las que se trabajó.

5.2.2 Efecto de la temperatura

Se llevó a cabo un estudio del comportamiento de los sistemas de reacción al aumentar la temperatura de trabajo, se establecen las temperaturas de: 30, 40 y 50°C. Se escogieron dichas temperaturas porque son mayores a la temperatura ambiente pero además no son excesivamente elevadas. Se trabajó con la concentración óptima de hierro, la reacción se llevó a cabo con la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso).

5.3 Procedimiento para el tratamiento con ozono:

Este tratamiento consistió en burbujear ozono a las soluciones de colorante, para ello se empleó un generador de ozono marca “ECO₃”. Se midió una alícuota de 40 mL de las soluciones de colorante azul marino drimanen CL-R de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm y posteriormente se hizo burbujear ozono para estudiar la de degradación de color en cada caso. El efecto catalizador del peróxido de hidrógeno se estudió al momento de agregar el reactivo a las diferentes muestras para observar dicho efecto, este procedimiento se llevó a cabo bajo condiciones alcalinas, para el ajuste de pH se utilizó una solución de NaOH (0.5 M).

5.4 Procedimiento para el tratamiento con cloro:

Se estudió, así mismo, el efecto que tiene el cloro de marca comercial en las soluciones de colorante azul marino drimanen CL-R de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm. Dependiendo de los resultados obtenidos, se puede llevar a cabo una dilución de la solución concentrada de cloro como mejor convenga al estudio. Se añadió la solución de cloro a la muestra de colorante azul marino drimanen CL-R en relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de solución de cloro) y se sigue la secuencia de degradación de color.

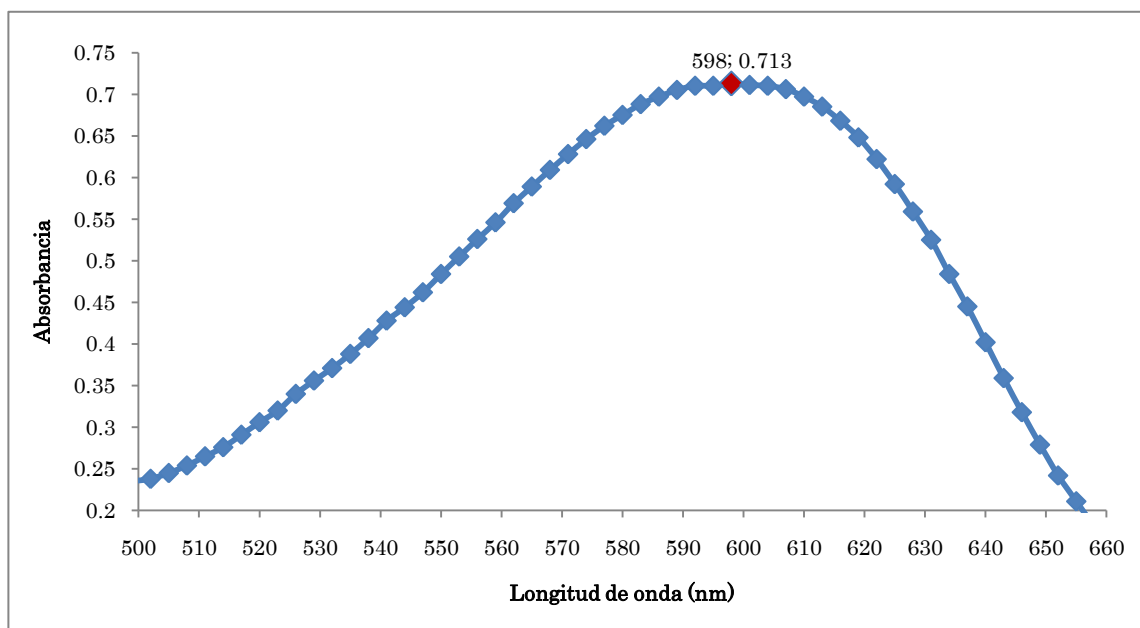
6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Al llevar a cabo la cromatografía en capa fina se establece que el colorante es puro y no se encuentra mezclado con alguna otra molécula que pueda atribuirle otro color. Ya que tras varias pruebas se obtuvo que el colorante se desplazaba a lo largo de la placa cromatográfica sin dejar rastros de algún otro compuesto.

Para determinar la Longitud de Onda máxima en la que absorbe el colorante en estudio, se procedió a realizar un barrido de la muestra de 20 ppm, en este caso se determinó que fue de 598 nm. Para comprobar el dato obtenido se realiza un segundo barrido con la muestra de 40 ppm y el resultado fue el mismo, una Longitud de Onda máxima de 598 nm.

Una vez establecida la Longitud de Onda en que se leerán todas las muestras se procede a medir la absorbancia de las muestras de colorante a las diferentes concentraciones de trabajo. Cabe resaltar que todas las lecturas de absorbancia de los experimentos analizados se llevaron a cabo a temperatura ambiente, posteriormente se estudiará el efecto que tiene el aumento de la temperatura de trabajo sobre las reacciones.

Gráfica 1: Determinación de la Longitud de Onda máxima para la muestra de 20 ppm de colorante azul marino drimanen CL-R.



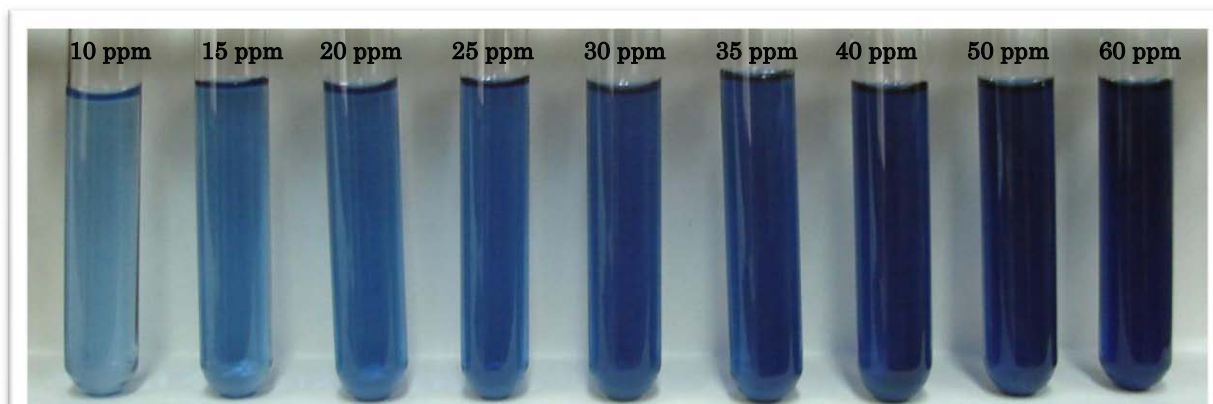
El siguiente cuadro representa los datos determinados de la absorbancia medida a 598 nm para cada una de las concentraciones de colorante azul marino drimanen CL-R que se escogieron para este trabajo.

Cuadro 1: Determinación de la Absorbancia inicial para cada concentración del colorante azul marino drimanen CL-R en ppm.

| Concentración del colorante (ppm) | Absorbancia inicial |
|--|----------------------------|
| 10 | 0.354 |
| 15 | 0.536 |
| 20 | 0.713 |
| 25 | 0.894 |
| 30 | 1.096 |
| 35 | 1.254 |
| 40 | 1.433 |
| 50 | 1.732 |
| 60 | 2.081 |

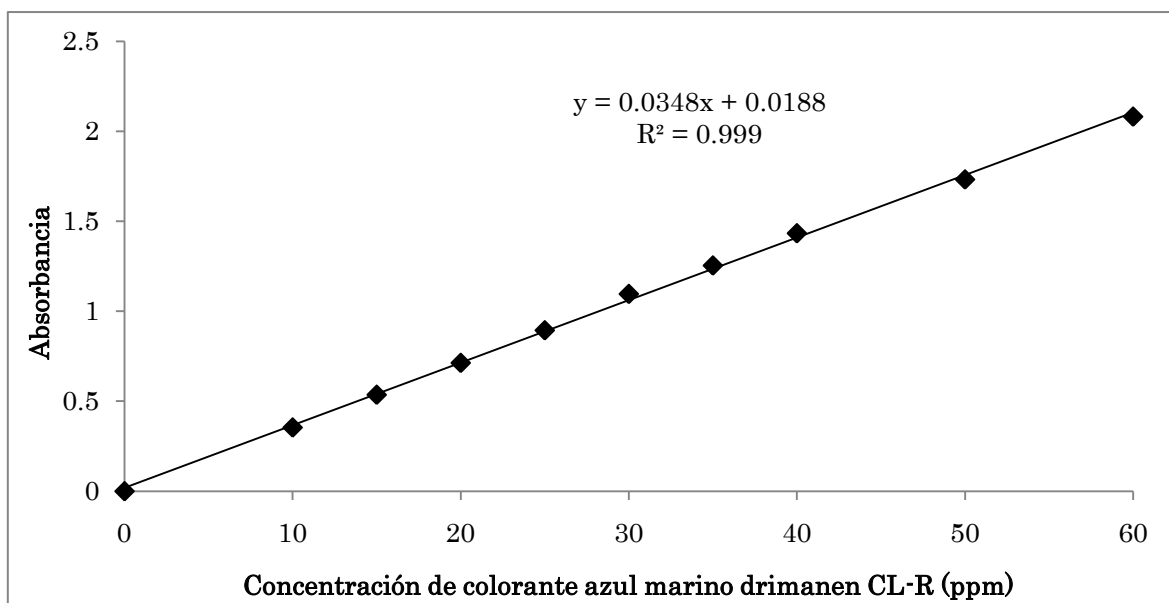
A continuación se presenta una figura donde se pueden apreciar las diferentes soluciones preparadas del colorante azul marino drimanen CL-R (ppm) para este experimento.

Figura 1: Representación de las soluciones de colorante azul marino drimanen CL-R.



La siguiente gráfica representa los datos obtenidos de la absorbancia medida a 598 nm para cada una de las concentraciones de colorante azul marino drimanen CL-R en ppm.

Gráfica 1.1: Curva patrón de la determinación de la Absorbancia inicial para cada concentración del colorante azul marino drimanen CL-R.



Como puede observarse en la gráfica 1.1, los datos de absorbancia obtenida guardan una linealidad casi exacta, ya que, al hacer regresión lineal, el coeficiente **R** es igual a 0.999.

Con esta gráfica de absorbancia inicial de cada solución preparada de colorante azul marino drimanen CL-R, se determinará después la eficiencia de cada método empleado en este estudio y se podrá evaluar cuál de ellos es el más conveniente.

6.1 Tratamiento con peróxido de hidrógeno

Tras llevar a cabo varios experimentos para la determinación de la influencia del peróxido de hidrógeno sobre las muestras de colorante, se establece que la reacción de oxidación ocurre instantáneamente, es por ello que todas las lecturas de absorbancia del tratamiento con peróxido de hidrógeno y tratamiento Fenton se tomaron tras haber pasado 10 segundos de reacción.

Se realizaron los experimentos en los que se colocó 1 mL de colorante azul marino drimanen CL-R de las diferentes concentraciones preparadas y se varió el volumen de peróxido de hidrógeno, desde la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno), hasta la relación 1:12 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 12 partes de peróxido de hidrógeno), se acidula con H₂SO₄ (0.1 M) hasta pH=2 y se mide la absorbancia. El pH al cual se manejó el tratamiento fue de 2, ya que a este pH se logró obtener la máxima degradación del colorante azul marino drimanen CL-R.

El siguiente cuadro muestra los datos de la absorbancia obtenida de cada una de las diferentes concentraciones del colorante azul marino drimanen CL-R en ppm sometidas al tratamiento con peróxido de hidrógeno desde la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno), hasta la relación 1:12 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 12 partes de peróxido de hidrógeno)

Así mismo, los resultados que se muestran en la gráfica 2 corresponden a dicha determinación.

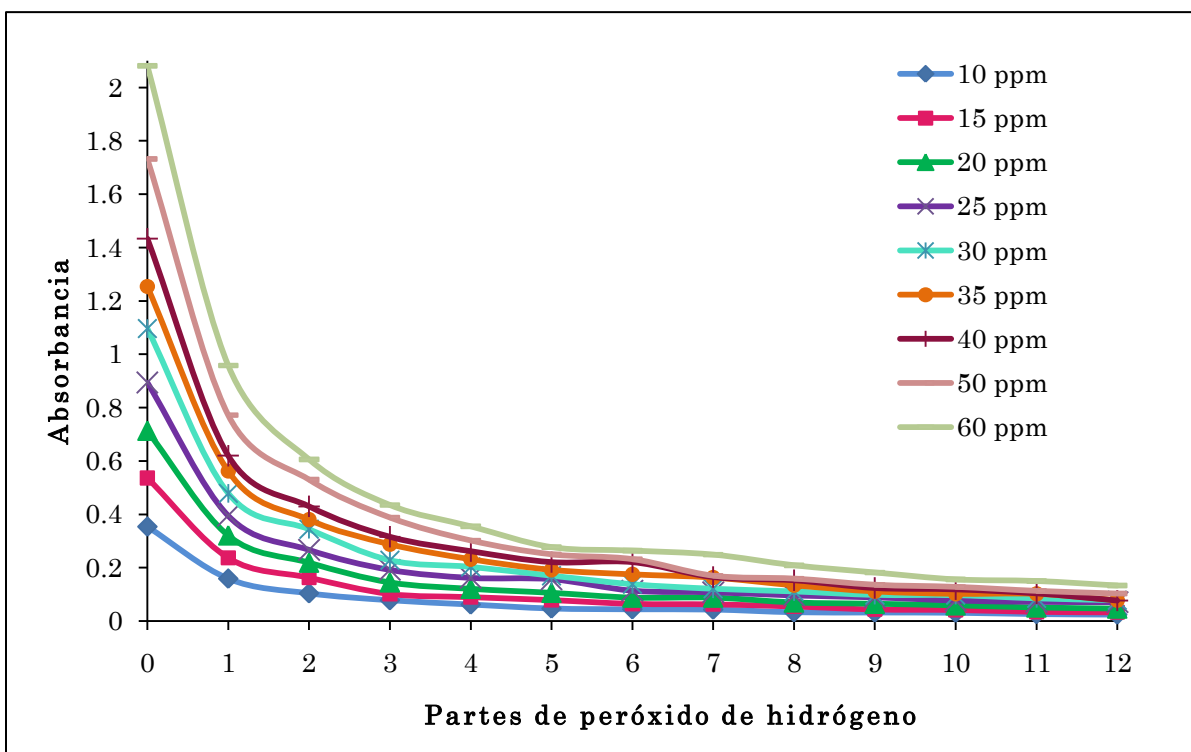
Cuadro 2: Datos obtenidos de la absorbancia de cada concentración del colorante sometida al tratamiento con peróxido de hidrógeno.

| Relación | Concentración del colorante azul marino drimanen CL-R (ppm) | | | | | | | | |
|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 |
| | Absorbancia | | | | | | | | |
| 0 | 0.354 | 0.536 | 0.713 | 0.894 | 1.096 | 1.254 | 1.433 | 1.732 | 2.081 |
| 1:1 | 0.159 | 0.237 | 0.321 | 0.395 | 0.479 | 0.562 | 0.62 | 0.772 | 0.958 |
| 1:2 | 0.104 | 0.163 | 0.219 | 0.267 | 0.344 | 0.38 | 0.43 | 0.53 | 0.606 |
| 1:3 | 0.078 | 0.102 | 0.145 | 0.192 | 0.228 | 0.288 | 0.316 | 0.388 | 0.435 |
| 1:4 | 0.062 | 0.09 | 0.121 | 0.162 | 0.203 | 0.232 | 0.262 | 0.302 | 0.355 |
| 1:5 | 0.047 | 0.079 | 0.106 | 0.157 | 0.17 | 0.192 | 0.221 | 0.25 | 0.277 |
| 1:6 | 0.044 | 0.065 | 0.088 | 0.114 | 0.138 | 0.175 | 0.221 | 0.232 | 0.264 |
| 1:7 | 0.043 | 0.063 | 0.088 | 0.108 | 0.121 | 0.163 | 0.165 | 0.17 | 0.249 |
| 1:8 | 0.033 | 0.055 | 0.07 | 0.096 | 0.111 | 0.134 | 0.153 | 0.159 | 0.209 |
| 1:9 | 0.032 | 0.044 | 0.065 | 0.089 | 0.098 | 0.111 | 0.124 | 0.136 | 0.182 |
| 1:10 | 0.031 | 0.042 | 0.059 | 0.077 | 0.097 | 0.102 | 0.119 | 0.128 | 0.156 |
| 1:11 | 0.026 | 0.035 | 0.051 | 0.072 | 0.085 | 0.102 | 0.104 | 0.113 | 0.15 |
| 1:12 | 0.024 | 0.033 | 0.047 | 0.071 | 0.078 | 0.078 | 0.077 | 0.103 | 0.133 |

Como puede observarse en el cuadro 2, los datos obtenidos de la absorbancia disminuyen al aumentar la cantidad de peróxido de hidrógeno presente en el sistema, lógicamente, ya que conforme se incrementa la cantidad de oxidante en el medio de reacción, el colorante se degrada potencialmente.

Por supuesto, a menor concentración de colorante, mayor será el porcentaje de degradación respecto a las soluciones mas concentradas del colorante. Estos resultados se representan gráficamente a continuación:

Gráfica 2: Representación de los datos obtenidos de la absorbancia de cada concentración del colorante utilizando peróxido de hidrógeno como oxidante a condiciones ácidas, desde la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno), hasta la relación 1:12 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 12 partes de peróxido de hidrógeno).



En la gráfica 2 se observa que a una relación 1:4 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 4 partes de peróxido de hidrógeno) la tendencia de degradación prácticamente permanece constante y por lo tanto, no sería necesario trabajar con dosis más elevadas de peróxido de hidrógeno.

Se observa también, que a una concentración de colorante de 10 ppm con una relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno),

ocurre una reducción de absorbancia de 0.354 a 0.159, lo que representa un porcentaje de reducción de color de 55.08 %.

Sólo con la adición de peróxido de hidrógeno, se observó que el color descendió en intensidad y la absorbancia medida disminuyó. En el Anexo “A” se incluyen las fotografías de las pruebas realizadas para cada concentración de colorante sometida al tratamiento con peróxido de hidrógeno.

Para comprobar que esta reducción de absorbancia no fuera por simple dilución de las muestras, se realizaron pruebas de IR en donde se comprobó que ocurre la ruptura de la estructura molecular (ver Diagrama 3). Por tanto, el peróxido de hidrógeno por sí sólo es capaz de degradar el colorante.

6.2 Tratamiento mediante proceso Fenton

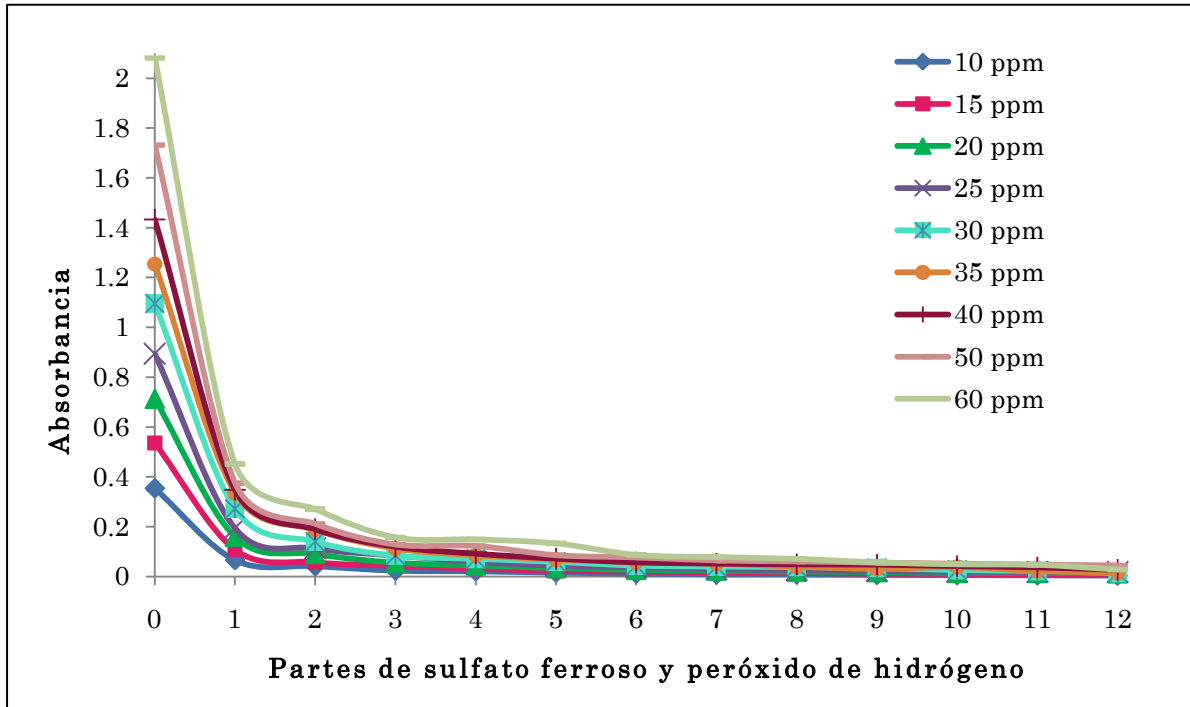
Se determinó que la concentración de Fe^{2+} de 500 ppm era la ideal para la experimentación, ya que con esta concentración se obtuvo la menor absorbancia, lo que significa que con una concentración de sulfato ferroso de 50 ppm a 450 ppm no es suficiente la fuerza de degradación sobre el colorante azul marino drimanen CL-R, es hasta 500 ppm que se obtiene la mayor degradación de color que se traduce en la menor lectura de absorbancia. En 550 y 600 ppm las lecturas de absorbancia prácticamente permanecen constantes y no es necesario usar esas concentraciones.

Al agregar la solución de sulfato ferroso de 500 ppm se observó un efecto de desaparición del color casi inmediata en comparación a las pruebas realizadas utilizando únicamente peróxido de hidrógeno comercial. Con la finalidad de comprobar la oxidación del colorante por la disminución de coloración que se muestra en la gráfica 3, se llevó a cabo el análisis espectroscópico de IR (ver Diagrama 3 pág. 65).

Cuadro 3: Datos obtenidos de la absorbancia de cada concentración del colorante sometida al tratamiento mediante Proceso Fenton.

| Relación | Concentración del colorante Azul Marino Drimanen CL-R (ppm) | | | | | | | | |
|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 |
| | Absorbancia | | | | | | | | |
| 0 | 0.354 | 0.536 | 0.713 | 0.894 | 1.096 | 1.254 | 1.433 | 1.732 | 2.081 |
| 1:1 | 0.066 | 0.108 | 0.159 | 0.194 | 0.272 | 0.335 | 0.348 | 0.375 | 0.452 |
| 1:2 | 0.042 | 0.057 | 0.09 | 0.113 | 0.14 | 0.188 | 0.19 | 0.211 | 0.271 |
| 1:3 | 0.024 | 0.043 | 0.055 | 0.084 | 0.084 | 0.112 | 0.12 | 0.128 | 0.157 |
| 1:4 | 0.021 | 0.032 | 0.044 | 0.059 | 0.071 | 0.085 | 0.092 | 0.122 | 0.149 |
| 1:5 | 0.016 | 0.023 | 0.033 | 0.043 | 0.059 | 0.068 | 0.072 | 0.085 | 0.133 |
| 1:6 | 0.012 | 0.02 | 0.026 | 0.037 | 0.044 | 0.058 | 0.057 | 0.076 | 0.087 |
| 1:7 | 0.009 | 0.017 | 0.023 | 0.03 | 0.04 | 0.052 | 0.052 | 0.064 | 0.078 |
| 1:8 | 0.009 | 0.015 | 0.019 | 0.026 | 0.038 | 0.039 | 0.049 | 0.06 | 0.071 |
| 1:9 | 0.007 | 0.011 | 0.017 | 0.022 | 0.034 | 0.031 | 0.048 | 0.055 | 0.057 |
| 1:10 | 0.006 | 0.011 | 0.014 | 0.019 | 0.026 | 0.038 | 0.042 | 0.051 | 0.049 |
| 1:11 | 0.005 | 0.008 | 0.014 | 0.018 | 0.022 | 0.022 | 0.037 | 0.047 | 0.047 |
| 1:12 | 0.004 | 0.008 | 0.012 | 0.018 | 0.014 | 0.015 | 0.027 | 0.044 | 0.028 |

Gráfica 3: Representación de los datos obtenidos de la absorbancia de cada concentración del colorante utilizando peróxido de hidrógeno y solución de sulfato ferroso como catalizador a condiciones ácidas.



En la gráfica 3 se observa que a una relación 1:2 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 2 partes de peróxido de hidrógeno y 2 partes de sulfato ferroso) la tendencia de degradación prácticamente permanece constante y por lo tanto, no sería necesario trabajar con dosis más elevadas de peróxido de hidrógeno ni del catalizador de hierro, este resultado era de esperarse, ya que al tratarse del sistema catalizado del tratamiento con peróxido de hidrógeno es lógico que la degradación ocurriera más rápidamente, de igual forma que la tendencia de degradación se hiciera constante a menor relación a comparación del tratamiento con peróxido de hidrógeno.

A continuación se hace una comparación entre ambas características de los sistemas, tratamiento con peróxido de hidrogeno y tratamiento Fenton para observar a más detalle la diferencia entre ambos, se incluye desde la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno) y (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso)

respectivamente, hasta la relación 1:12 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 12 partes de peróxido de hidrógeno) y (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R , 12 partes de peróxido de hidrógeno y 12 partes de sulfato ferroso) respectivamente.

Cuadro 4: Comparación de absorbancia medida del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones utilizando el tratamiento con peróxido de hidrógeno comercial (TP) y tratamiento Fenton (TF).

| Relación | Concentración del colorante Azul Marino Drimanen CL-R (ppm) | | | | | | | | | | | |
|----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | | 20 | | 30 | | 40 | | 50 | | 60 | |
| | Absorbancia | | | | | | | | | | | |
| | TP | TF | TP | TF | TP | TF | TP | TF | TP | TF | TP | TF |
| 0 | 0.354 | | 0.713 | | 1.096 | | 1.433 | | 1.732 | | 2.081 | |
| 1:1 | 0.159 | 0.066 | 0.321 | 0.159 | 0.479 | 0.272 | 0.62 | 0.348 | 0.772 | 0.375 | 0.958 | 0.452 |
| 1:2 | 0.104 | 0.042 | 0.219 | 0.09 | 0.344 | 0.14 | 0.43 | 0.19 | 0.53 | 0.211 | 0.606 | 0.271 |
| 1:3 | 0.078 | 0.024 | 0.145 | 0.055 | 0.228 | 0.084 | 0.316 | 0.12 | 0.388 | 0.128 | 0.435 | 0.157 |
| 1:4 | 0.062 | 0.021 | 0.121 | 0.044 | 0.203 | 0.071 | 0.262 | 0.092 | 0.302 | 0.122 | 0.355 | 0.149 |
| 1:5 | 0.047 | 0.016 | 0.106 | 0.033 | 0.17 | 0.059 | 0.221 | 0.072 | 0.25 | 0.085 | 0.277 | 0.133 |
| 1:6 | 0.044 | 0.012 | 0.088 | 0.026 | 0.138 | 0.044 | 0.221 | 0.057 | 0.232 | 0.076 | 0.264 | 0.087 |
| 1:7 | 0.043 | 0.009 | 0.088 | 0.023 | 0.121 | 0.04 | 0.165 | 0.052 | 0.17 | 0.064 | 0.249 | 0.078 |
| 1:8 | 0.033 | 0.009 | 0.07 | 0.019 | 0.111 | 0.038 | 0.153 | 0.049 | 0.159 | 0.06 | 0.209 | 0.071 |
| 1:9 | 0.032 | 0.007 | 0.065 | 0.017 | 0.098 | 0.034 | 0.124 | 0.048 | 0.136 | 0.055 | 0.182 | 0.057 |
| 1:10 | 0.031 | 0.006 | 0.059 | 0.014 | 0.097 | 0.026 | 0.119 | 0.042 | 0.128 | 0.051 | 0.156 | 0.049 |
| 1:11 | 0.026 | 0.005 | 0.051 | 0.014 | 0.085 | 0.022 | 0.104 | 0.037 | 0.113 | 0.047 | 0.15 | 0.047 |
| 1:12 | 0.024 | 0.004 | 0.047 | 0.012 | 0.078 | 0.014 | 0.077 | 0.027 | 0.103 | 0.044 | 0.133 | 0.028 |

Como se aprecia en el cuadro 4, el tratamiento Fenton, para todas las concentraciones, resulta más efectivo para la degradación del colorante azul marino drimanen CL-R porque

implica un sistema catalizado por hierro y por consiguiente la decoloración es más evidente ya que la Absorbancia obtenida en cada sistema tratado mediante proceso Fenton es mucho menor que la que se obtuvo con el tratamiento con peróxido de hidrogeno.

En los siguientes cuadros se incorpora el porcentaje de reducción de color para ambos tratamientos de cada concentración de colorante azul marino drimanen CL-R en ppm para la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno) y (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R , 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso) respectivamente, también se incluye la relación 1:4 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 4 partes de peróxido de hidrógeno) y (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 4 partes de peróxido de hidrógeno y 4 partes de sulfato ferroso) respectivamente.

Se elige la relación 1:1 ya que aquí se puede comparar qué tratamiento resulta más adecuado con igual número de partes de colorante, peróxido de hidrogeno y sulfato ferroso respectivamente, así mismo, la relación 1:4 da la posibilidad de comparar hasta que punto la tendencia de degradación permanece constante. En el Anexo “A” (pág. 74) se aprecian mejor los resultados de la secuencia de degradación para cada concentración de colorante azul marino drimanen CL-R empleando los tratamientos con peróxido de hidrógeno y tratamiento Fenton.

Cuadro 5: Porcentaje de disminución de color en relación 1:1 para el tratamiento con peróxido de hidrogeno (**TP**) (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno) y tratamiento Fenton (**TF**) (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso).

| Concentración de colorante (ppm) | Absorbancia inicial | Porcentaje de reducción de color | |
|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|-------|
| | | (TP) | (TF) |
| 10 | 0.354 | 55.08 | 81.36 |
| 15 | 0.536 | 55.78 | 79.85 |
| 20 | 0.713 | 54.98 | 77.70 |
| 25 | 0.894 | 55.82 | 78.30 |
| 30 | 1.096 | 56.30 | 75.18 |
| 35 | 1.254 | 55.18 | 73.29 |
| 40 | 1.433 | 56.73 | 75.72 |
| 50 | 1.732 | 55.43 | 78.35 |
| 60 | 2.081 | 53.96 | 78.28 |

Así que, como se puede observar en el cuadro 5, los mayores porcentajes de reducción son cuando se trabaja con el proceso Fenton, mientras que con el tratamiento con peróxido de hidrógeno el porcentaje de reducción de color es de 55.47 % en promedio, el proceso Fenton aporta 77.55% de reducción promedio de color, lo que rectifica nuevamente que el sistema catalizado aporta mejores beneficios para la degradación del color y además ocurre instantáneamente.

Cuadro 6: Porcentaje de disminución de color en relación 1:4 para el tratamiento con peróxido de hidrógeno **(TP)** (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 4 partes de peróxido de hidrógeno) y tratamiento Fenton **(TF)** (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 4 partes de peróxido de hidrógeno y 4 partes de sulfato ferroso).

| Concentración de colorante (ppm) | Absorbancia inicial | Porcentaje de reducción de color | |
|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------|
| | | (TP) | (TF) |
| 10 | 0.354 | 82.49 | 94.07 |
| 15 | 0.536 | 83.21 | 94.03 |
| 20 | 0.713 | 83.03 | 93.83 |
| 25 | 0.894 | 81.88 | 93.40 |
| 30 | 1.096 | 81.48 | 93.52 |
| 35 | 1.254 | 81.50 | 93.22 |
| 40 | 1.433 | 81.72 | 93.58 |
| 50 | 1.732 | 82.56 | 92.96 |
| 60 | 2.081 | 82.94 | 92.84 |

El cuadro 6 indica, de igual forma, que los mayores porcentajes de reducción son cuando se trabaja con el proceso Fenton, en este caso se usó una relación de 1:4, tanto el tratamiento con peróxido de hidrógeno como el proceso Fenton se potencializan, sin embargo, no es suficiente para que el tratamiento con peróxido rebase los mejores resultados que se obtienen con el proceso Fenton. En este caso, el tratamiento con peróxido de hidrógeno da un porcentaje de reducción de color es de 82.31 % en promedio y el proceso Fenton aporta 93.49 %

6.2.1 Efecto de la temperatura en la reacción sobre el proceso Fenton

Dado que, la temperatura a la que se encuentra la reacción es un factor de consideración, se realizaron diferentes pruebas en las que se establecen las temperaturas de: 30, 40 y 50°C. Se trabajó con la concentración óptima de Fe^{2+} , que es de 500 ppm, la reacción se llevó a cabo con la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso), la concentración elegida de colorante fue de 30 ppm y ya que la tendencia de la curva patrón de las diferentes soluciones preparadas del colorante es lineal, se puede visualizar el comportamiento del resto de las soluciones de colorante.

En el siguiente cuadro se encuentran plasmados los resultados obtenidos al incrementar la temperatura de trabajo, la absorbancia inicial que se obtuvo a temperatura ambiente de la solución de 30 ppm es de 1.096.

Cuadro 7: Efecto de la temperatura sobre la reacción tratada con el proceso Fenton.

| Temperatura (°C) | Absorbancia | Porcentaje de degradación de color |
|------------------|-------------|------------------------------------|
| 30 | 0.223 | 79.65 % |
| 40 | 0.201 | 81.66% |
| 50 | 0.113 | 89.68% |

El resultado obtenido fue que al incrementar la temperatura de trabajo desde 30 hasta 50°C se va alcanzando una mayor degradación de color, por consiguiente, el mejor resultado obtenido fue con la temperatura de 50°C, es decir, mayor degradación del color y menor absorbancia. Por lo tanto, para conseguir un mejor resultado, rápido y optimizado, se puede incrementar la temperatura de trabajo.

6.3 Tratamiento mediante ozono

En el cuadro 8 se muestran los resultados obtenidos de absorbancia de las muestras tratadas únicamente con ozono (O₃), se utilizan las concentraciones de colorante azul marino drimanen CL-R de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm.

Cuadro 8: Datos obtenidos de absorbancia siguiendo la secuencia de degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones en ppm, empleando ozono.

| Tiempo (min) | Concentración del colorante azul marino drimanen CL-R (ppm) | | | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| | Absorbancia | | | | | |
| 0 | 0.354 | 0.713 | 1.096 | 1.433 | 1.732 | 2.081 |
| 20 | 0.054 | 0.243 | 0.514 | 0.761 | 0.957 | 1.123 |
| 40 | 0.008 | 0.051 | 0.213 | 0.393 | 0.532 | 0.714 |
| 60 | 0.004 | 0.012 | 0.063 | 0.188 | 0.274 | 0.449 |
| 80 | 0.003 | 0.005 | 0.017 | 0.069 | 0.113 | 0.255 |
| 160 | | 0.003 | 0.004 | 0.006 | 0.009 | 0.016 |
| 230 | | | 0.003 | 0.003 | 0.005 | 0.01 |
| 300 | | | | 0.002 | 0.005 | 0.007 |
| 360 | | | | | 0.004 | 0.006 |
| 450 | | | | | | 0.005 |

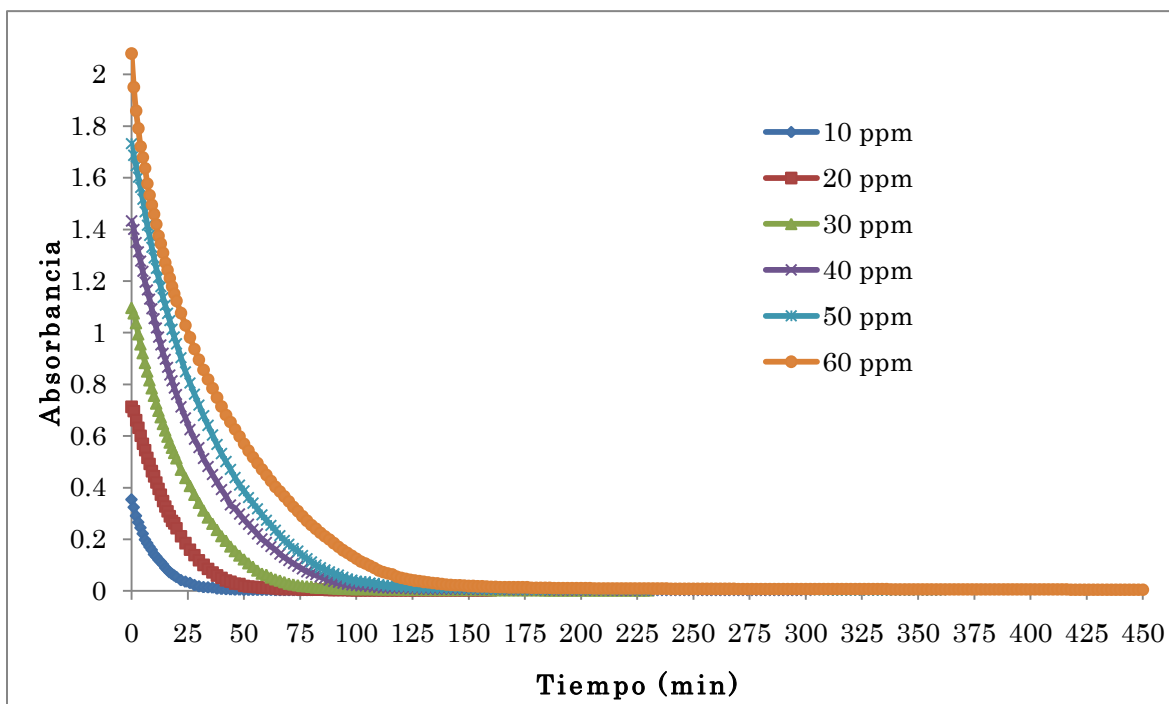
En este cuadro se nota que a menor concentración del colorante es menor el tiempo que tarda en desaparecer o degradarse el color y viceversa, que a mayor concentración del colorante, mayor tiempo tarda en actuar el ozono para la degradación del color, en este punto, el colorante se ha oxidado.

Para una concentración de colorante azul marino drimanen CL-R de 10 ppm el ozono tarda 1 hora con 20 minutos en degradar el colorante, para el caso de una concentración de colorante azul marino drimanen CL-R de 20 ppm el resultado es proporcional, incrementa hasta 2 horas con 40 minutos el tiempo de degradación, para 30 ppm el ozono tarda en degradar el colorante 3 horas con 50 minutos, para 40 ppm tarda 5 horas, para 50 ppm el tiempo es de 6 horas y por ultimo tarda 7 horas con 30 minutos en degradar el colorante de concentración de 60 ppm.

Se buscó llegar hasta una lectura mínima de absorbancia, en este caso, la mínima fue de 0.005, a pesar de que el colorante prácticamente estaba incoloro mucho antes de llegar hasta las últimas lecturas, seguía presentando lectura de absorbancia, en el Anexo “B” (pág. 79) se puede apreciar con mayor claridad los resultados obtenidos gracias a las fotografías representantes de la experimentación.

La siguiente gráfica constituye los datos obtenidos en el cuadro anterior donde se podrá apreciar mejor la secuencia de degradación de color de las muestras de colorante tratadas con ozono.

Gráfica 4: Representación de los datos obtenidos de absorbancia siguiendo la secuencia degradación de color de cada concentración del colorante empleando ozono.



Aunque prácticamente a 100 minutos (1 hora con 40 minutos) de estar actuando el ozono sobre las muestras, aún presentaban un poco de color y muy baja absorbancia, por tanto, se buscó llegar hasta la lectura más mínima posible.

A pesar de que el tratamiento con ozono da buenos resultados respecto a la degradación máxima del colorante, el tiempo mínimo de degradación del colorante fue de 80 minutos para una concentración de 10 ppm y el máximo fue de 450 minutos para 60 ppm, entonces, con el fin de reducir el tiempo de degradación por medio de ozono se estudia el efecto del ozono con peróxido de hidrógeno a pH alcalino, se trata de agregar agua oxigenada a las diferentes muestras manteniendo un pH básico, que fue modificado con una solución de NaOH (0.5M)

Sin embargo, tras realizar varias pruebas siguiendo la secuencia de reacción con ozono en donde se trataron las soluciones, primeramente, con peróxido de hidrógeno como catalizador a condiciones básicas y en segundo lugar, se trataron las soluciones solo

modificando el pH de la solución de colorante azul marino drimanen CL-R con NaOH hasta pH básico, se concluye que, únicamente modificando el pH hasta volverlo básico con NaOH, se obtiene un mejor resultado en comparación con el de ozono con peróxido de hidrógeno a las mismas condiciones alcalinas.

Una vez determinado que se obtiene mayor degradación del colorante azul marino drimanen CL-R con ozono adicionando únicamente NaOH para modificar el pH hasta hacerlo básico, se realiza una optimización de pH para determinar cuál es el más adecuado para trabajar con cada una de las concentraciones de colorante preparadas, ya que, para menores concentraciones de colorante no es necesario trabajar con un pH mayor o más básico que implica mayor cantidad de NaOH agregado.

El resultado obtenido de esta optimización de pH se muestra en el cuadro 9.

Cuadro 9: Optimización de pH que se realizó con Hidróxido de Sodio (0.5 M) para llevar a cabo el tratamiento de ozono en medio básico.

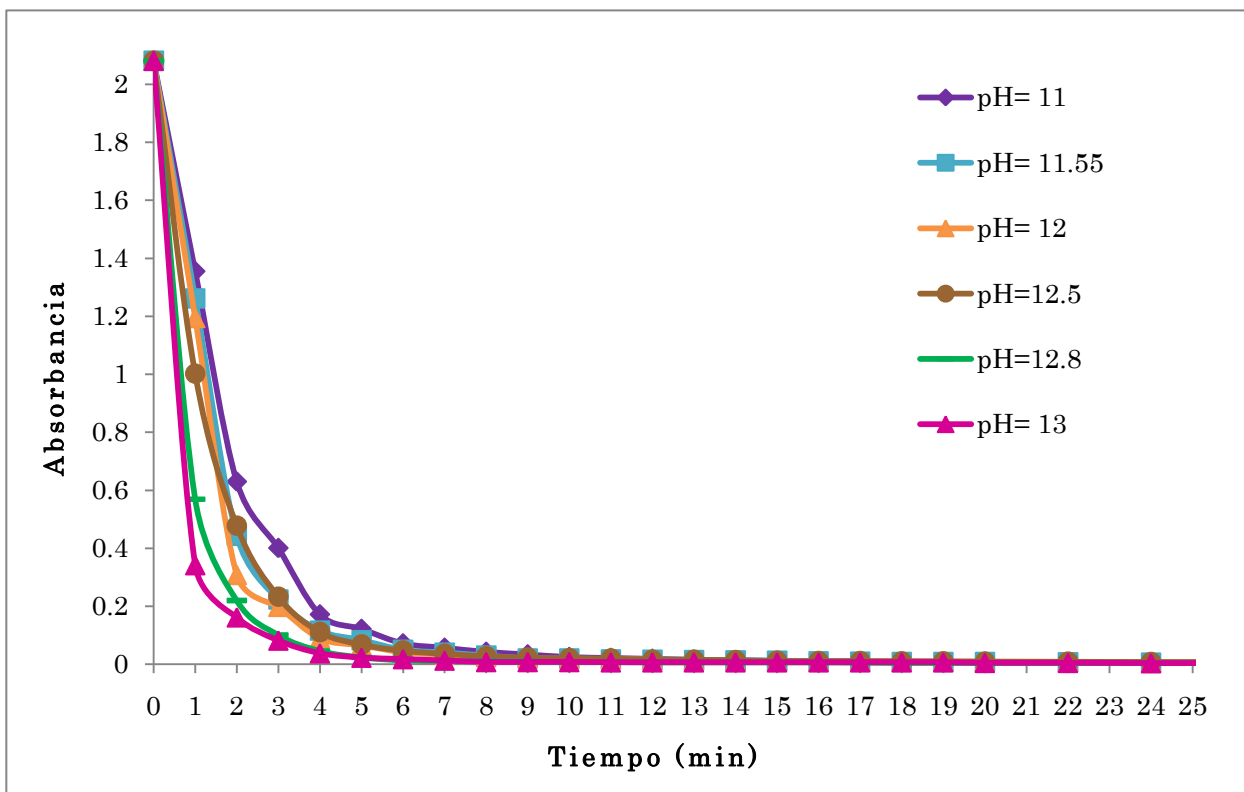
| Concentración de colorante (ppm) | pH optimizado con NaOH (0.5M) |
|---|--------------------------------------|
| 10 | 9.5 |
| 20 | 10 |
| 30 | 10 |
| 40 | 10.5 |
| 50 | 10.5 |
| 60 | 11 |

Como puede observarse en el cuadro 9, para una concentración de colorante de 10 ppm, con el ajuste de pH a 9.5 es necesario para lograr una degradación óptima, para el caso de la concentración de colorante de 60 ppm, es necesario aumentar el pH hasta 11 ya que la solución se encuentra mucho más concentrada, aun así, la degradación es óptima.

Para cada concentración de colorante se llevó a cabo el estudio para determinar que pH era el óptimo.

La gráfica 4.1 muestra los resultados obtenidos con las diferentes pruebas para la optimización de pH para el caso de una concentración de 60 ppm, los resultados ejemplifican el procedimiento que se llevó a cabo para el resto de las concentraciones empleadas del colorante.

Gráfica 4.1: Representación de los datos obtenidos de la absorbancia siguiendo la degradación de la concentración de 60 ppm del colorante a diferentes pH's empleando ozono.



Como se puede observar en la gráfica 4.1, al trabajar con diferentes valores de pH, el color se degrada en el mismo tiempo y da el mismo valor de absorbancia al trabajar con pH=11 o pH=13, por lo tanto, es recomendable utilizar pH=11 en este caso.

Explicado todo la anterior, el siguiente cuadro representa los datos que se obtuvieron del tratamiento con ozono a pH alcalino, en donde únicamente se modifica el pH de las soluciones con NaOH hasta volverlo básico.

Cuadro 10: Datos obtenidos de la absorbancia siguiendo la secuencia de degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones empleando ozono en medio básico.

| Tiempo (min) | Concentración del colorante azul marino drimanen CL-R (ppm) | | | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| | Absorbancia | | | | | |
| 0 | 0.354 | 0.713 | 1.096 | 1.433 | 1.732 | 2.081 |
| 2 | 0.071 | 0.211 | 0.242 | 0.264 | 0.377 | 0.63 |
| 4 | 0.03 | 0.085 | 0.116 | 0.101 | 0.136 | 0.172 |
| 5 | 0.024 | 0.06 | 0.092 | 0.076 | 0.088 | 0.122 |
| 15 | 0.003 | 0.012 | 0.021 | 0.012 | 0.014 | 0.013 |
| 20 | | 0.003 | 0.011 | 0.008 | 0.009 | 0.009 |
| 30 | | | 0.003 | 0.004 | 0.005 | 0.005 |
| 40 | | | | 0.003 | 0.004 | 0.004 |
| 50 | | | | | 0.003 | 0.004 |
| 60 | | | | | | 0.003 |

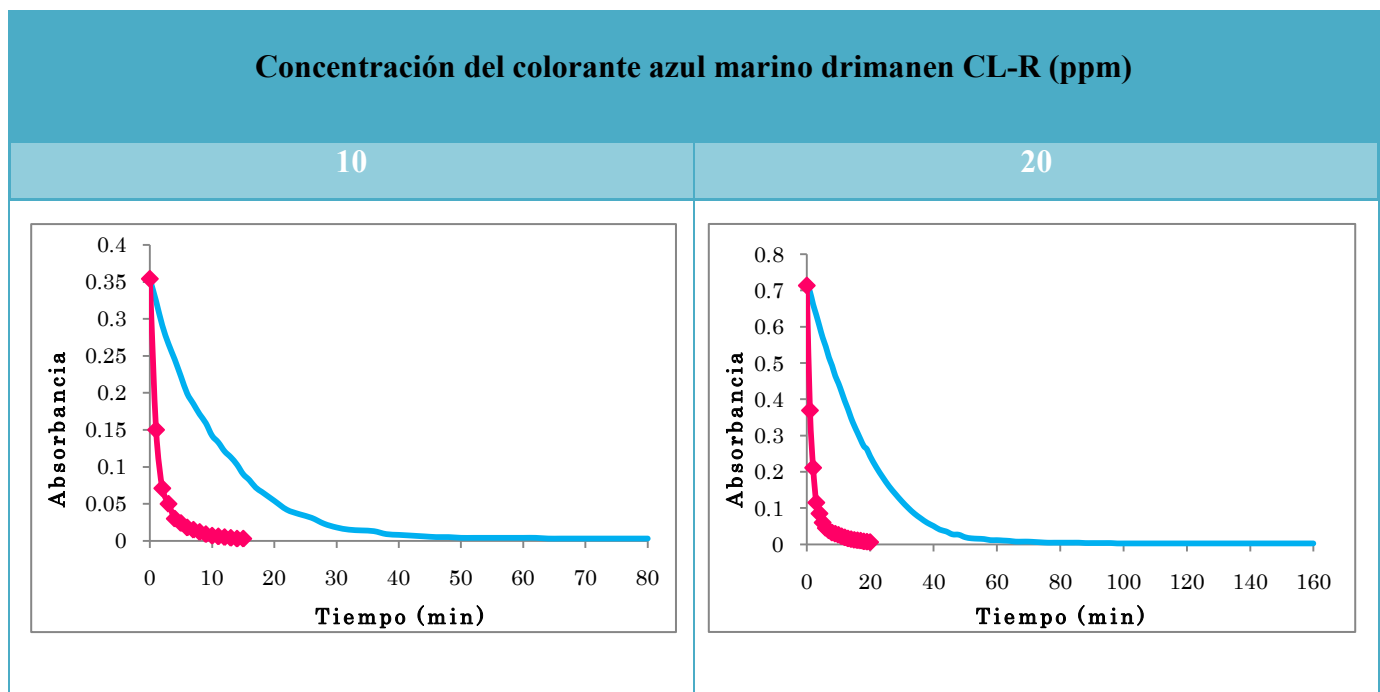
El cuadro 10 muestra que el tiempo de reacción del ozono en medio alcalino es mucho menor en comparación con el sistema empleado ozono únicamente. El tiempo que tarda una solución de 10 ppm en degradarse se reduce de 1 hora con 20 minutos hasta solo 15 minutos, de igual manera, cuando para una solución de 20 ppm el ozono tardó 2 horas con 40 minutos, ahora con el sistema empleando ozono en medio básico el tiempo de degradación es de solo 20 minutos, para la concentración de 30 ppm el tiempo se reduce a

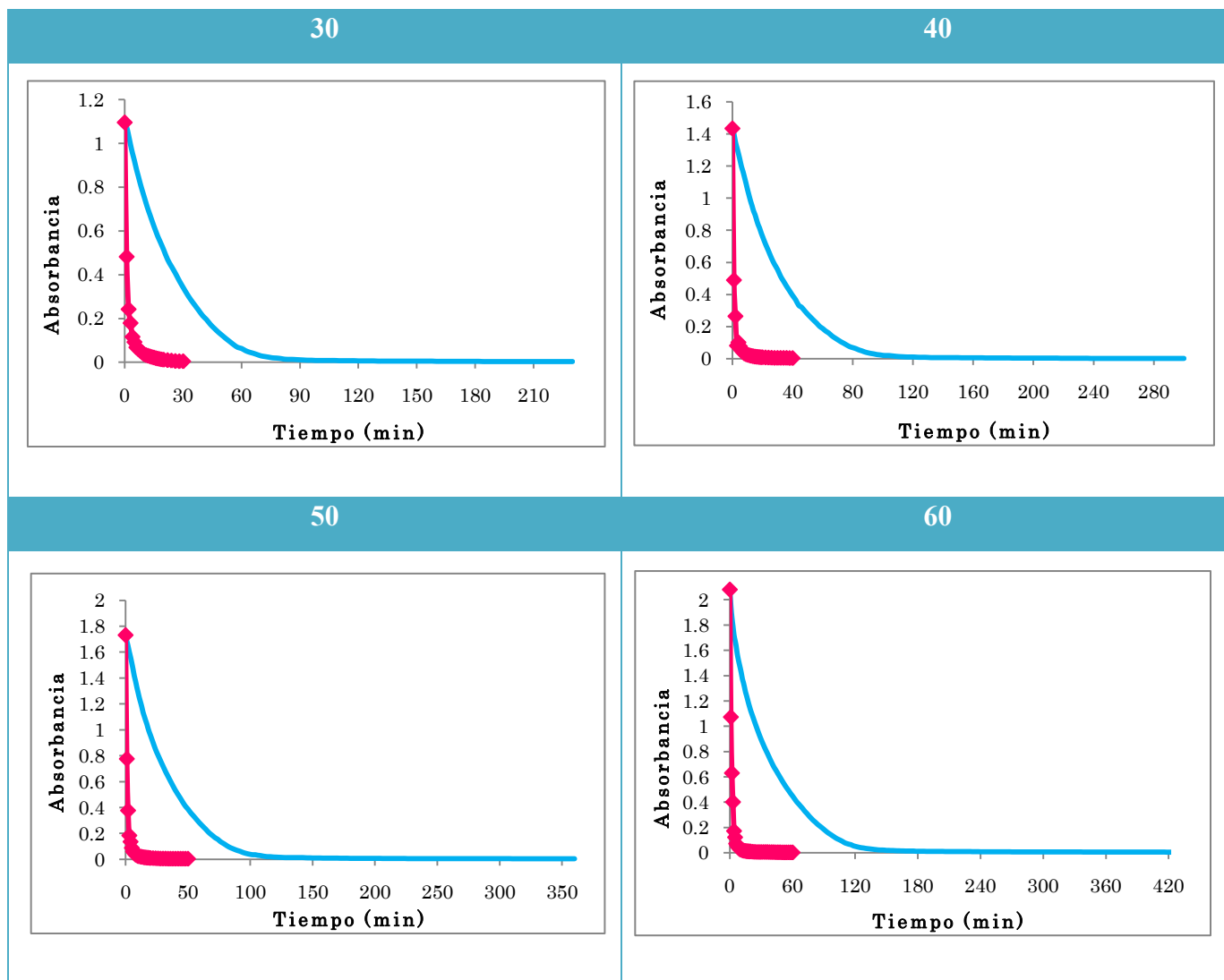
solo 30 minutos en comparación con las 3 horas y 50 minutos del sistema empleando únicamente ozono, para las soluciones de 40 ppm, 50 ppm y 60 ppm los tiempos de degradación son de 40 minutos, 50 minutos y 60 minutos respectivamente en comparación con las 5 horas, 6 horas y 7 horas con 30 minutos correspondientemente con el sistema empleando ozono solamente.

En el Anexo “B” se muestra con mayor detalle los datos obtenidos de estos experimentos donde se observa la gran diferencia que aporta el trabajar con ozono y ozono en medio alcalino.

A continuación se hace una comparación entra ambos sistemas empleados, el tratamiento con ozono y tratamiento con ozono en medio alcalino.

Esquema 1: Comparación entre la secuencia de degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones utilizando ozono y ozono a pH básico.





La leyenda de las gráficas del esquema 1 es la siguiente:

- Tratamiento con ozono
- Tratamiento con ozono a pH alcalino

Como se muestra en el esquema 1, el Sistema con ozono a pH alcalino da mejores resultados ya que reduce el tiempo para la degradación del colorante significativamente.

La diferencia de degradación de color entre el método de ozonificación simple y el sistema a pH alcalino es mínima, lo que habla de la eficacia del método de ozonificación en

general, en el primero, ozonificación simple, se obtiene en promedio una degradación del 99.63 % y en el segundo, sistema a pH alcalino, se obtiene del 99.65%, sin embargo, lo que aquí se debe resaltar es que el sistema a pH alcalino es mucho más conveniente ya que reduce el tiempo de reacción, el promedio de ahorro de tiempo que ofrece es del 85.85 % y por tanto un ahorro de energía significativa.

Lógicamente es mejor utilizar el sistema a pH alcalino ya que ayuda a ahorrar cantidades importantes de tiempo y energía eléctrica.

6.4 Tratamiento con cloro

Para estudiar el efecto del cloro, primero se hace una dilución de la solución original, ya que al usar la solución concentrada no se puede seguir una secuencia de degradación de color ya que ocurre muy rápidamente, por lo tanto, es necesario hacer esta dilución y así obtener datos medibles.

Se probaron diferentes diluciones de cloro, la concentración más conveniente para llevar a cabo el estudio fue de 10% en volumen. A partir de esta concentración se pudieron obtener los datos siguiendo la secuencia de degradación, se realizaron todos los experimentos con las diferentes concentraciones del colorante azul marino drimanen CL-R que fueron de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm. La relación entre colorante y oxidante empleada fue de 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de cloro).

A continuación, se representa en el siguiente cuadro los datos que se obtuvieron del tratamiento con cloro de las muestras, ya que la secuencia de degradación es muy rápida, se siguió solo hasta los primeros 5 minutos.

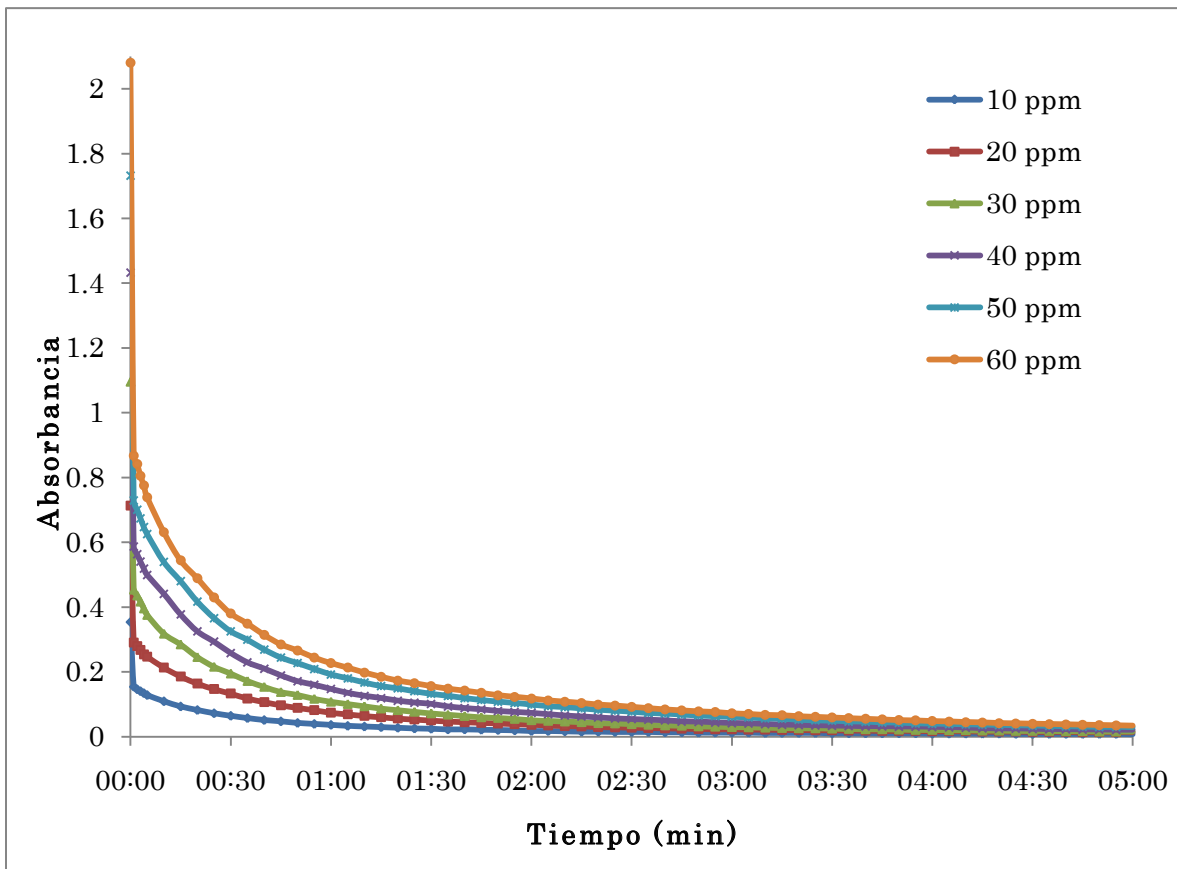
Cuadro 11: Datos obtenidos del estudio de la degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones empleando cloro, (10/100 mL).

| Tiempo (min) | Concentración del colorante azul marino drimanen CL-R (ppm) | | | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| | Absorbancia | | | | | |
| 00:00 | 0.354 | 0.713 | 1.096 | 1.433 | 1.732 | 2.081 |
| 00:01 | 0.154 | 0.291 | 0.454 | 0.587 | 0.729 | 0.867 |
| 00:02 | 0.146 | 0.28 | 0.436 | 0.563 | 0.701 | 0.842 |
| 00:03 | 0.14 | 0.268 | 0.417 | 0.54 | 0.674 | 0.805 |
| 00:04 | 0.134 | 0.254 | 0.396 | 0.519 | 0.647 | 0.776 |
| 00:05 | 0.128 | 0.247 | 0.376 | 0.499 | 0.625 | 0.739 |
| 00:10 | 0.109 | 0.213 | 0.318 | 0.441 | 0.539 | 0.631 |
| 00:15 | 0.093 | 0.186 | 0.285 | 0.377 | 0.48 | 0.544 |
| 00:20 | 0.082 | 0.164 | 0.246 | 0.325 | 0.417 | 0.489 |
| 00:25 | 0.072 | 0.147 | 0.216 | 0.293 | 0.366 | 0.43 |
| 00:30 | 0.064 | 0.133 | 0.195 | 0.258 | 0.325 | 0.38 |
| 00:35 | 0.057 | 0.118 | 0.172 | 0.229 | 0.299 | 0.349 |
| 00:40 | 0.051 | 0.107 | 0.154 | 0.21 | 0.269 | 0.314 |
| 00:45 | 0.047 | 0.097 | 0.138 | 0.189 | 0.244 | 0.285 |
| 00:50 | 0.042 | 0.089 | 0.129 | 0.171 | 0.227 | 0.266 |
| 00:55 | 0.039 | 0.082 | 0.117 | 0.16 | 0.209 | 0.244 |
| 01:00 | 0.036 | 0.074 | 0.108 | 0.147 | 0.192 | 0.227 |
| 01:30 | 0.024 | 0.05 | 0.072 | 0.101 | 0.132 | 0.156 |
| 02:00 | 0.017 | 0.037 | 0.051 | 0.073 | 0.099 | 0.118 |
| 02:30 | 0.014 | 0.028 | 0.039 | 0.054 | 0.077 | 0.092 |
| 03:00 | 0.012 | 0.023 | 0.03 | 0.042 | 0.061 | 0.072 |
| 03:30 | 0.01 | 0.02 | 0.025 | 0.034 | 0.049 | 0.059 |

| | | | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 04:00 | 0.009 | 0.017 | 0.021 | 0.03 | 0.04 | 0.048 |
| 04:30 | 0.008 | 0.015 | 0.018 | 0.024 | 0.034 | 0.04 |
| 05:00 | 0.007 | 0.014 | 0.016 | 0.021 | 0.029 | 0.034 |

En el Anexo “C” (pág. 91), se puede apreciar con más claridad la degradación de color que sufre el colorante. La siguiente gráfica representa los datos obtenidos en el cuadro anterior.

Gráfica 5: Secuencia de degradación del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones utilizando cloro.



Como se muestra en la gráfica 5, un considerable porcentaje de degradación de color ocurre en los primeros 15 segundos de la reacción, a partir de 2 minutos la tendencia es prácticamente lineal. A los 5 minutos las muestras permanecen con un ligero color

amarillo, pero, al paso de alrededor de 1 hora las muestras se tornan incoloras totalmente, las siguientes figuras muestran tal diferencia.

Figura 2: Representación de las soluciones de colorante azul marino drimanen CL-R tratadas con cloro al cabo de 5 minutos.

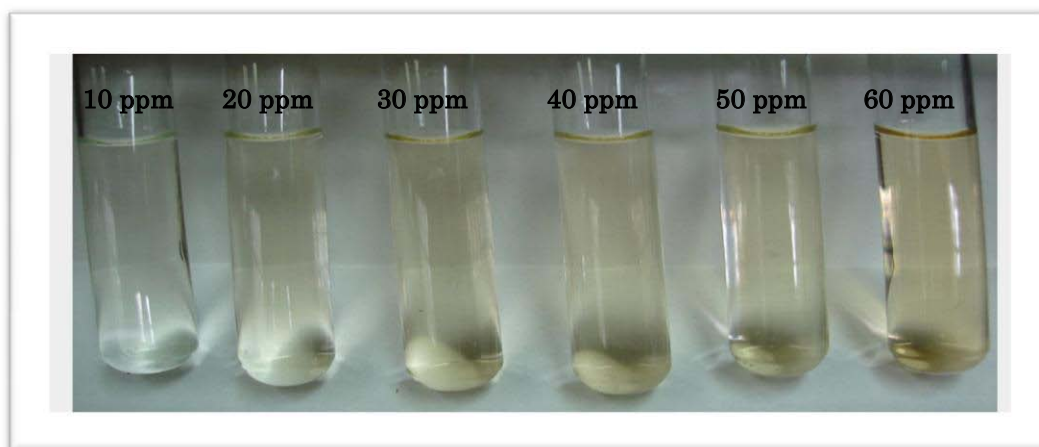
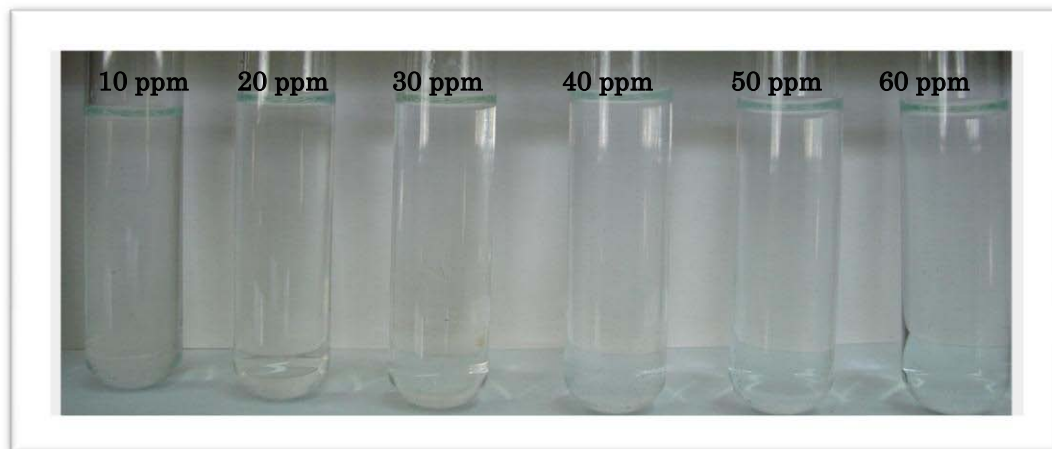


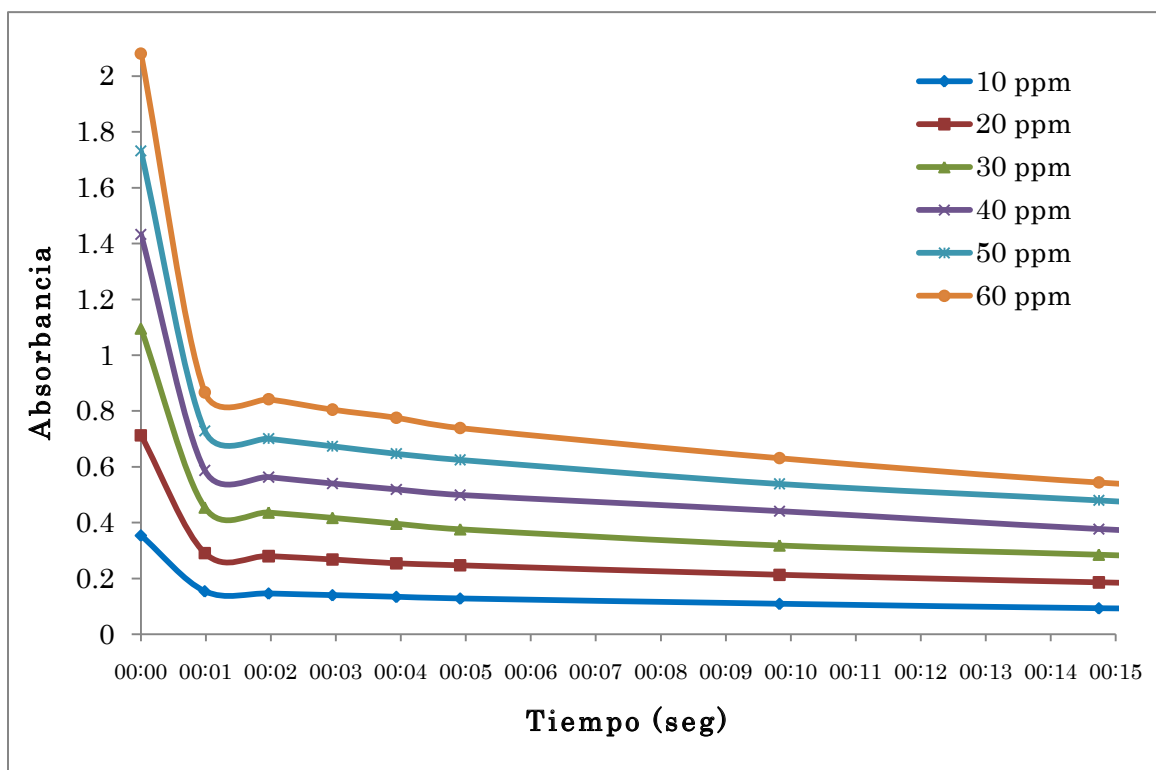
Figura 3: Representación de las soluciones de colorante azul marino drimanen CL-R tratadas con cloro al cabo de 1 hora.



Las figuras 2 y 3 representan el cambio de coloración de las soluciones tratadas con cloro, como puede observarse, al cabo de 1 hora las soluciones han quedado incoloras totalmente.

Con el fin de hacer notar que el mayor porcentaje de degradación color ocurre en los primeros 15 segundos de la reacción, se realiza la siguiente gráfica.

Gráfica 6: Secuencia de degradación en los primeros 15 segundos de reacción del colorante azul marino drimanen CL-R con cloro.



En la gráfica 6 se aprecia mucho mejor la secuencia de degradación de color en los primeros 15 segundos de reacción, esto también puede observarse en el Anexo “C”.

Con el fin de mostrar las cualidades de degradación del tratamiento con cloro que se aplicó a las muestras del colorante azul marino drimanen CL-R, se procede a representar el porcentaje de degradación que obtuvieron las muestras.

Cuadro 12: Porcentajes de degradación de color mediante el tratamiento con cloro para las muestras del colorante azul marino drimanen CL-R a diferentes concentraciones.

| Concentración del colorante (ppm) | Absorbancia inicial | Tiempo (min) | | | | |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 00:00 | 00:15 | 01:00 | 03:00 | 05:00 |
| | | Porcentaje de degradación (%) | | | | |
| 10 | 0.354 | 0 | 73.7 | 89.8 | 96.6 | 98.0 |
| 20 | 0.713 | 0 | 73.9 | 89.6 | 96.8 | 98.0 |
| 30 | 1.096 | 0 | 74.0 | 90.1 | 97.3 | 98.5 |
| 40 | 1.433 | 0 | 73.7 | 89.7 | 97.1 | 98.5 |
| 50 | 1.732 | 0 | 72.3 | 88.9 | 96.5 | 98.3 |
| 60 | 2.081 | 0 | 73.9 | 89.1 | 96.5 | 98.4 |

Como se puede ver, en los primeros 15 segundos de reacción la muestra ya se ha degradado un 73.58% en general, en el primer minuto de reacción el cloro ha logrado degradar el 89.53% en promedio del color, la máxima degradación se observa tras finalizar el seguimiento de la secuencia de degradación a los 5 minutos, el promedio de degradación es de 98.28%.

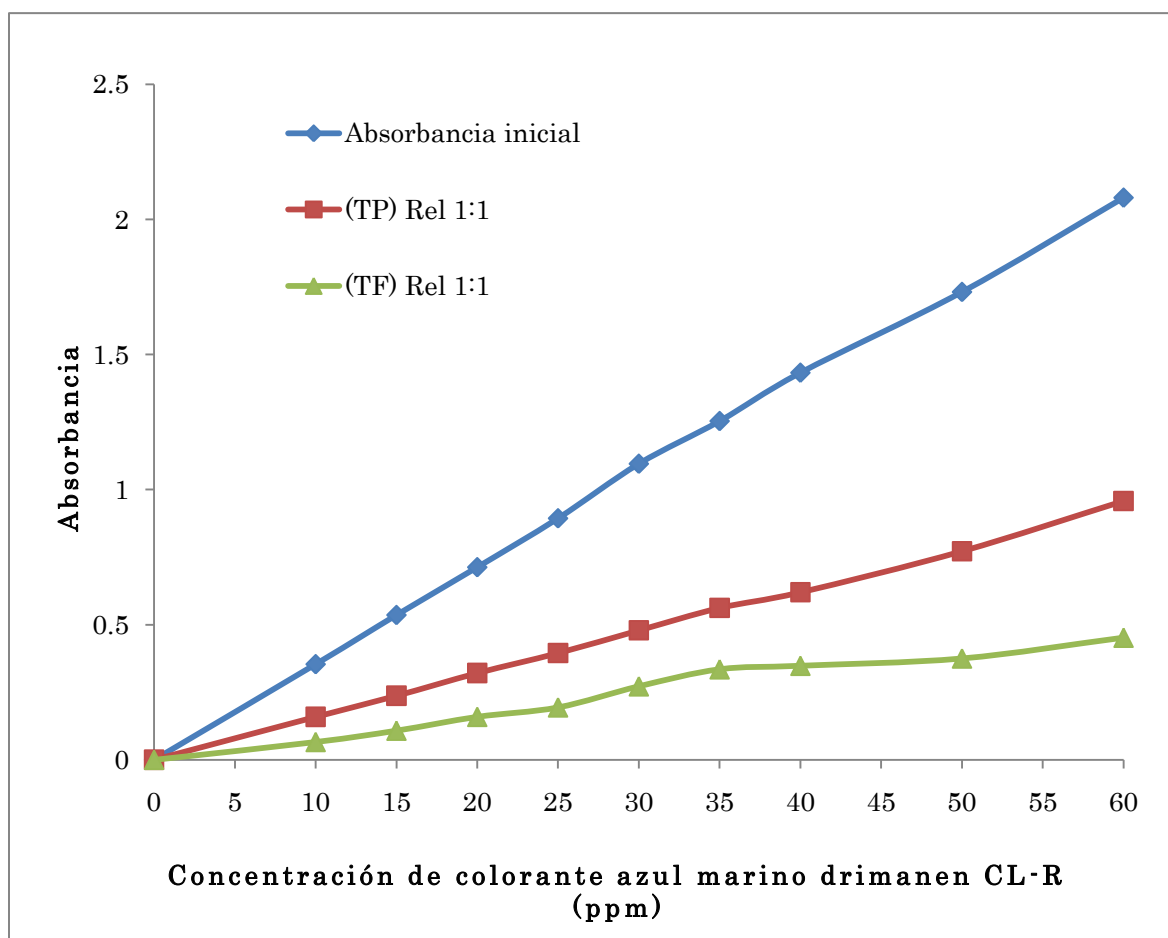
6.5 Comparación entre los tratamientos

Hasta este punto los 5 tratamientos para la degradación de color ya han sido estudiados (tratamiento con peróxido de hidrógeno, tratamiento mediante proceso Fenton, tratamiento con ozono, tratamiento con ozono en medio básico y tratamiento con cloro), al respecto se hace una comparación de cada uno de ellos para analizar sus características.

A continuación, se hace una comparación entre las curvas de la determinación de la Absorbancia inicial para cada concentración del colorante azul marino drimanen CL-R con los tratamientos con peróxido de hidrógeno (TP) y tratamiento Fenton (TF), ambos en relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de

hidrógeno) y (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso) respectivamente. Se hace esta comparación en relación 1:1 para estudiar el efecto de aplicar solo 1 parte de oxidante por cada parte de colorante.

Gráfica 7: Comparación entre los tratamientos con peróxido de hidrógeno (TP) y Fenton (TF) en relación 1:1.

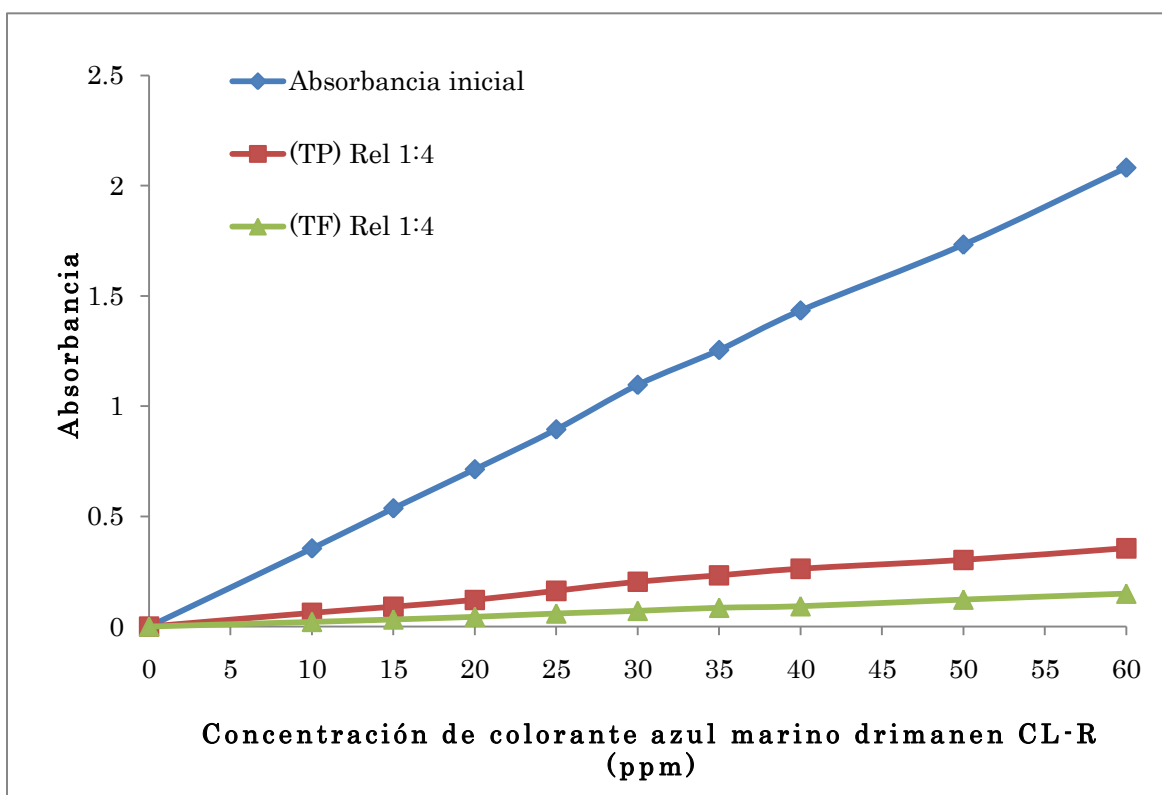


En la gráfica anterior se puede notar que el proceso Fenton resulta más efectivo para la degradación del colorante azul marino drimanen CL-R ya que la lectura de absorbancia es mucho menor que la comparada con el tratamiento con peróxido de hidrógeno.

En el tratamiento mediante proceso Fenton se observó que a una relación 1:2 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 2 partes de peróxido de hidrógeno y 2 partes de

sulfato ferroso) la tendencia de degradación prácticamente permanece constante, sin embargo, para realizar otra gráfica de comparación entre tratamiento con peróxido de hidrogeno y el tratamiento mediante proceso Fenton se escoge la relación 1:4 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 4 partes de peróxido de hidrógeno) y (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R , 4 partes de peróxido de hidrógeno y 4 partes de sulfato ferroso) respectivamente, ya que en esta relación, la degradación con el tratamiento con peróxido de hidrógeno se vuelve en un comportamiento lineal.

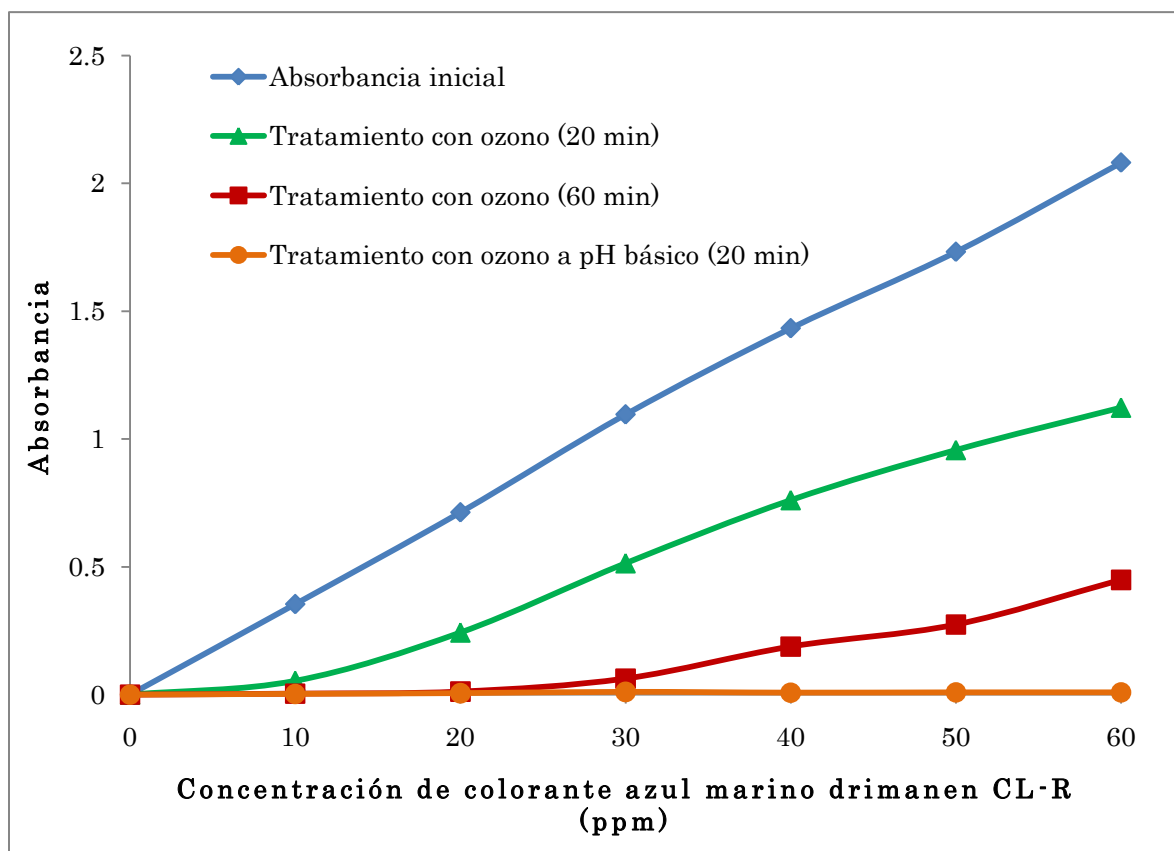
Gráfica 8: Comparación entre los tratamientos con peróxido de hidrógeno (TP) y Fenton (TF) en relación 1:4.



A pesar de que en relación 1:1 el proceso Fenton es muy efectivo para degradar el colorante, en relación 1:4 el proceso se potencializa o aumenta su efectividad, ya que se agregan 4 partes más de peróxido de hidrogeno y de catalizador de hierro respecto al colorante, tal y como puede observarse en la gráfica anterior.

Posteriormente se hace una comparación entre las curvas de la determinación de la Absorbancia inicial para cada concentración del colorante azul marino drimanen CL-R con los tratamientos con ozono y ozono en medio básico. La siguiente gráfica representa dicha comparación en los primeros 20 minutos de reacción para ambos sistemas, además se incluyen los datos del tratamiento con ozono en los primeros 60 minutos de reacción para analizar la eficiencia de los métodos.

Gráfica 9: Comparación entre los tratamientos con ozono y ozono en medio alcalino, con tiempo de reacción de 20 y 60 minutos.

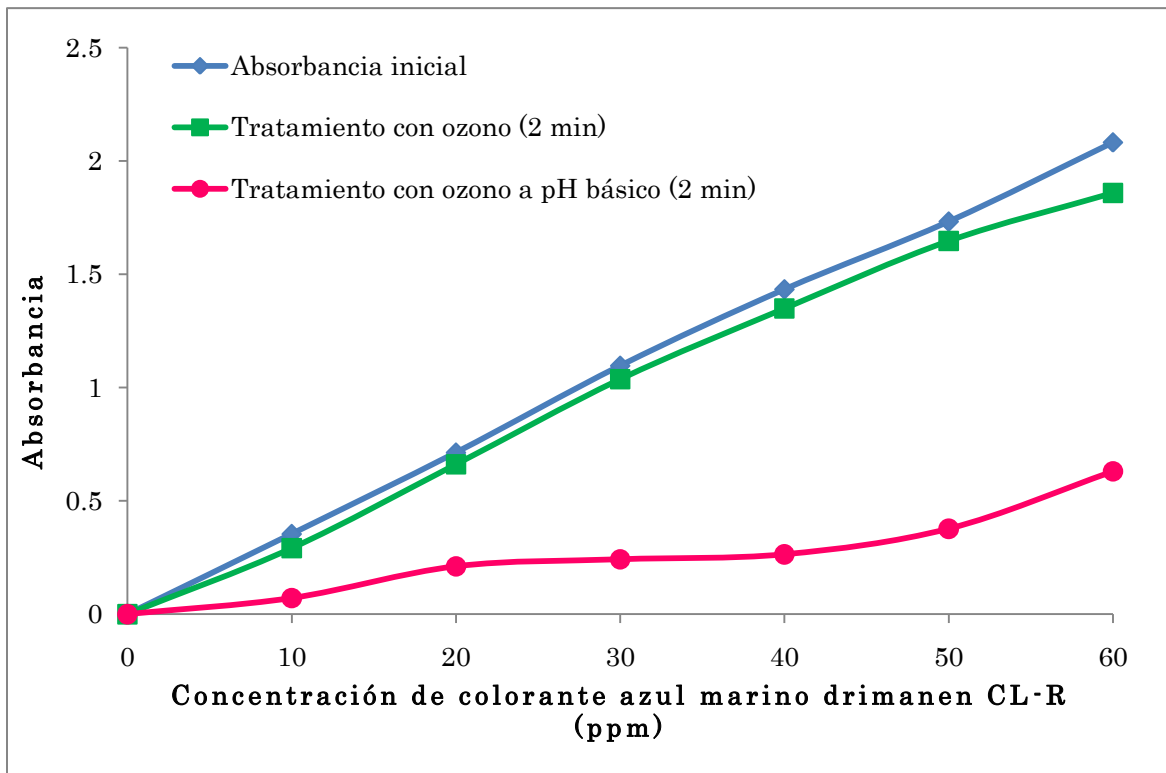


La gráfica 9 muestra que, a 20 minutos de reacción, el tratamiento de ozonificación simple ha degradado el colorante pero aún no significativamente, tras 60 minutos de reacción, todavía presenta lectura de absorbancia, lógicamente, el resultado es mejor, el colorante se ha degradado mucho más ya que ha pasado más tiempo de reacción, sin embargo, con tan

solo 20 minutos de reacción, el tratamiento con ozono en medio básico ha logrado degradar totalmente el colorante.

La siguiente gráfica representa la misma comparación entre el tratamiento con ozono y ozono en medio básico, pero, en este caso, se compara en los primeros 2 minutos de reacción.

Gráfica 9.1: Comparación entre tratamiento con ozono y tratamiento con ozono en medio alcalino, con tiempo de reacción de 2 minutos.

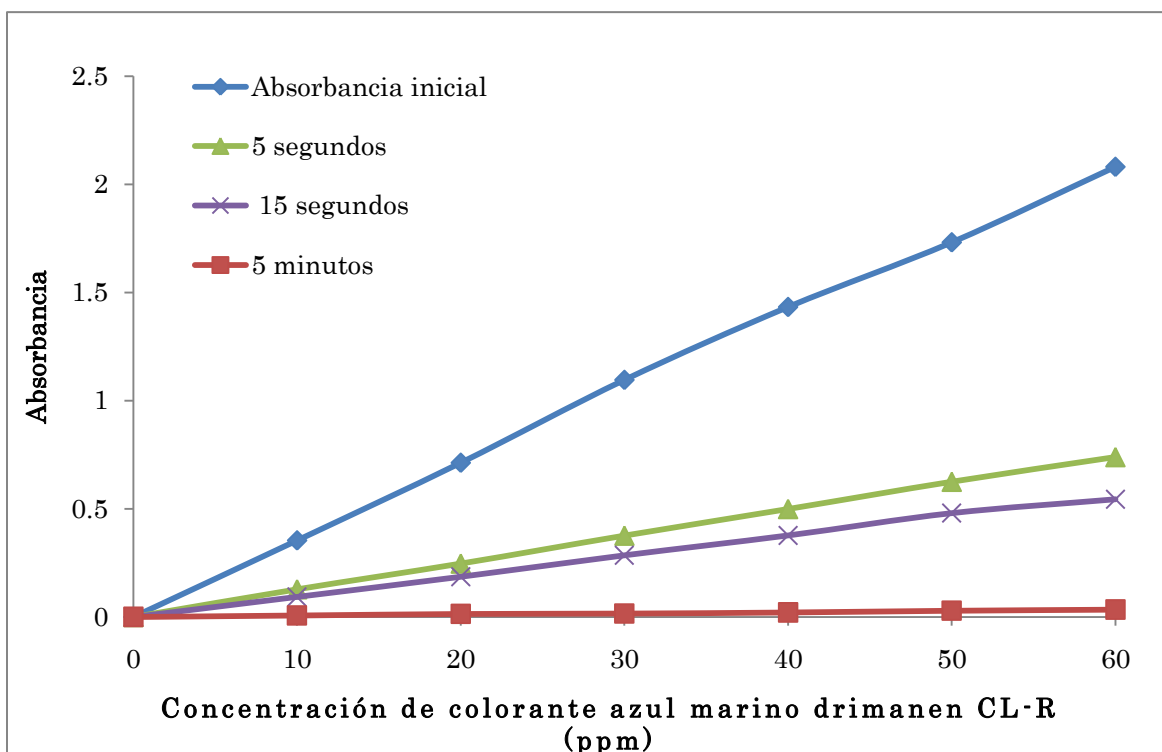


En la gráfica 9.1 se puede observar más claramente lo que pasa cuando se trabaja con un sistema de ozono a pH básico, la degradación ocurre más rápidamente; con el tratamiento de ozonificación simple, en los primeros 2 minutos, prácticamente no se ha degradado el color.

Ahora se procede a comparar las curvas de la determinación de la Absorbancia inicial para cada concentración del colorante azul marino drimanen CL-R con el tratamiento con cloro.

La siguiente gráfica muestra tal comparación, incluye los primeros 5 segundos de reacción, 15 segundos de reacción y por último los 5 minutos de reacción, que es el tiempo total que se siguió la secuencia de degradación

Gráfica 10: Comparación del tratamiento con cloro a diferentes tiempos.



La gráfica 10 muestra que la máxima degradación de color ocurre a los 5 minutos.

Nótese, que para las gráficas 7, 8, 9, 9.1 y 10, se hace únicamente una comparación entre las curvas y los métodos empleados para observar la disminución de absorbancia y por consiguiente, la degradación del color.

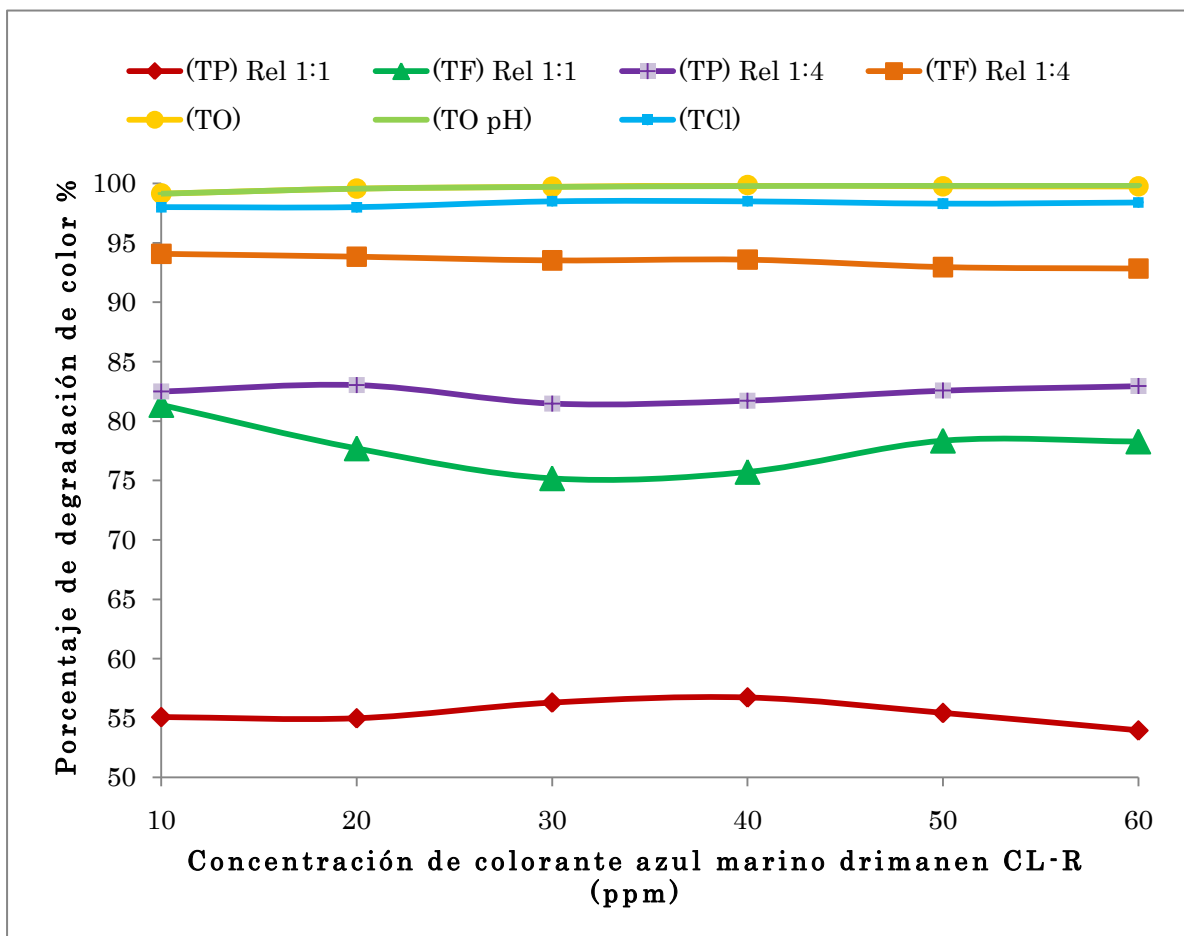
Ahora bien, a continuación se muestra un cuadro donde se plasman los porcentajes de degradación de cada tratamiento empleado en esta investigación que son: el tratamiento con peróxido de hidrógeno (TP), tratamiento Fenton (TF) en relación 1:1 y 1:4, tratamiento con ozono (TO) y ozono en a pH alcalino (TO pH) y tratamiento con cloro (TCl), con el fin de analizar cada uno de ellos, determinar con cuál se obtuvo el mayor porcentaje de

degradación de color y de igual manera, analizar cuál es la mejor opción dependiendo del tiempo aplicado, costo de los reactivos y cuál afecta menos al medio ambiente.

Cuadro 13: Porcentajes de degradación de color de cada uno de los tratamientos empleados.

| Concentración de colorante (ppm) | Tratamientos empleados | | | | | | |
|----------------------------------|---|--------------|--------------|--------------|------|---------|-------|
| | (TP) rel 1:1 | (TF) rel 1:1 | (TP) rel 1:4 | (TF) rel 1:4 | (TO) | (TO pH) | (TCl) |
| | Porcentajes de degradación de color (%) | | | | | | |
| 10 | 55.08 | 81.36 | 82.49 | 94.07 | 99.2 | 99.2 | 98.0 |
| 20 | 54.98 | 77.7 | 83.03 | 93.83 | 99.6 | 99.6 | 98.0 |
| 30 | 56.3 | 75.18 | 81.48 | 93.52 | 99.7 | 99.7 | 98.5 |
| 40 | 56.73 | 75.72 | 81.72 | 93.58 | 99.9 | 99.8 | 98.5 |
| 50 | 55.43 | 78.35 | 82.56 | 92.96 | 99.8 | 99.8 | 98.3 |
| 60 | 53.96 | 78.28 | 82.94 | 92.84 | 99.8 | 99.9 | 98.4 |

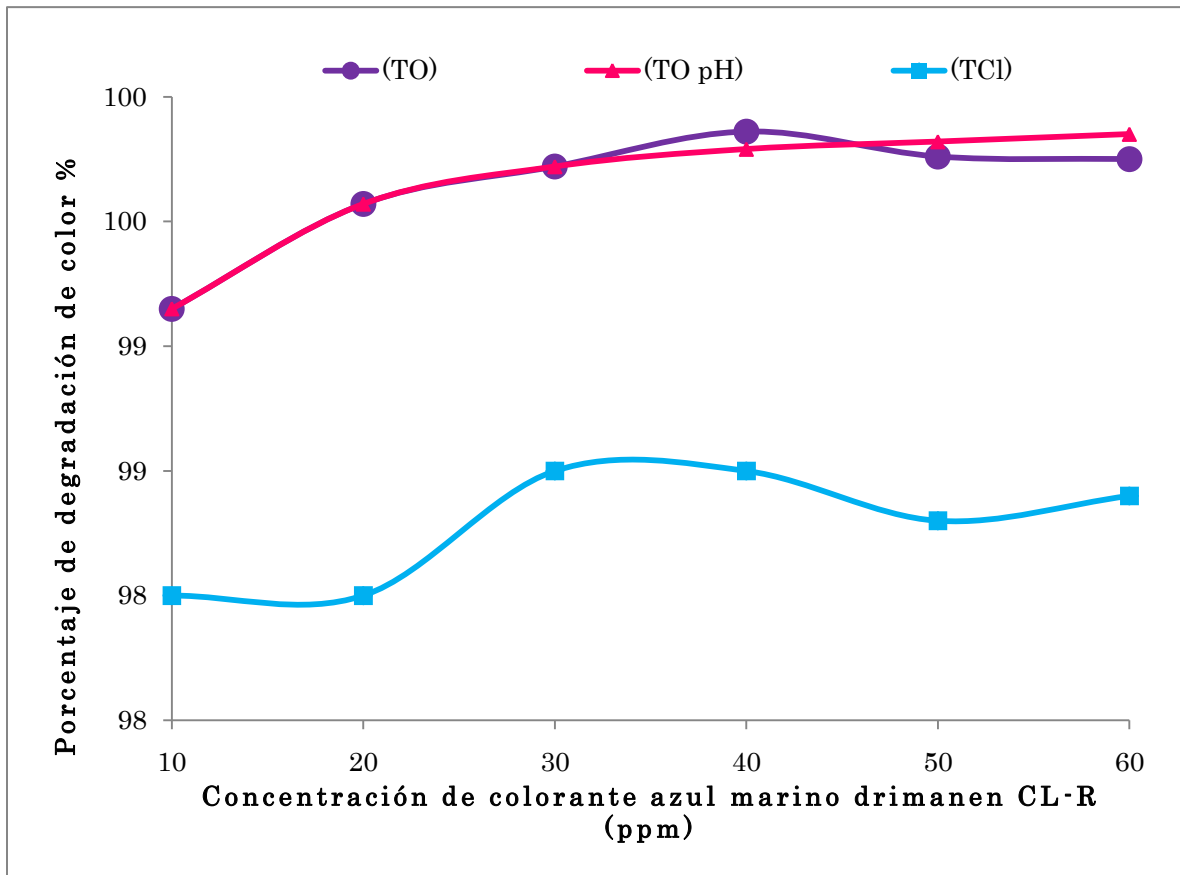
Gráfica 11: Porcentajes de degradación de color de cada uno de los tratamientos empleados.



Esta gráfica muestra que el porcentaje más bajo obtenido es con el tratamiento con peróxido de hidrógeno en relación 1:1, el tratamiento Fenton eleva el porcentaje a la misma relación, sin embargo, en relación 1:4, el tratamiento Fenton logra superar al tratamiento con peróxido.

En esta gráfica no se alcanza a distinguir con total claridad los porcentajes del tratamiento con ozono, ozono a pH alcalino ni tratamiento con cloro, es por ello que en la siguiente gráfica se representan tales porcentajes de manera individual para distinguir cada uno de ellos.

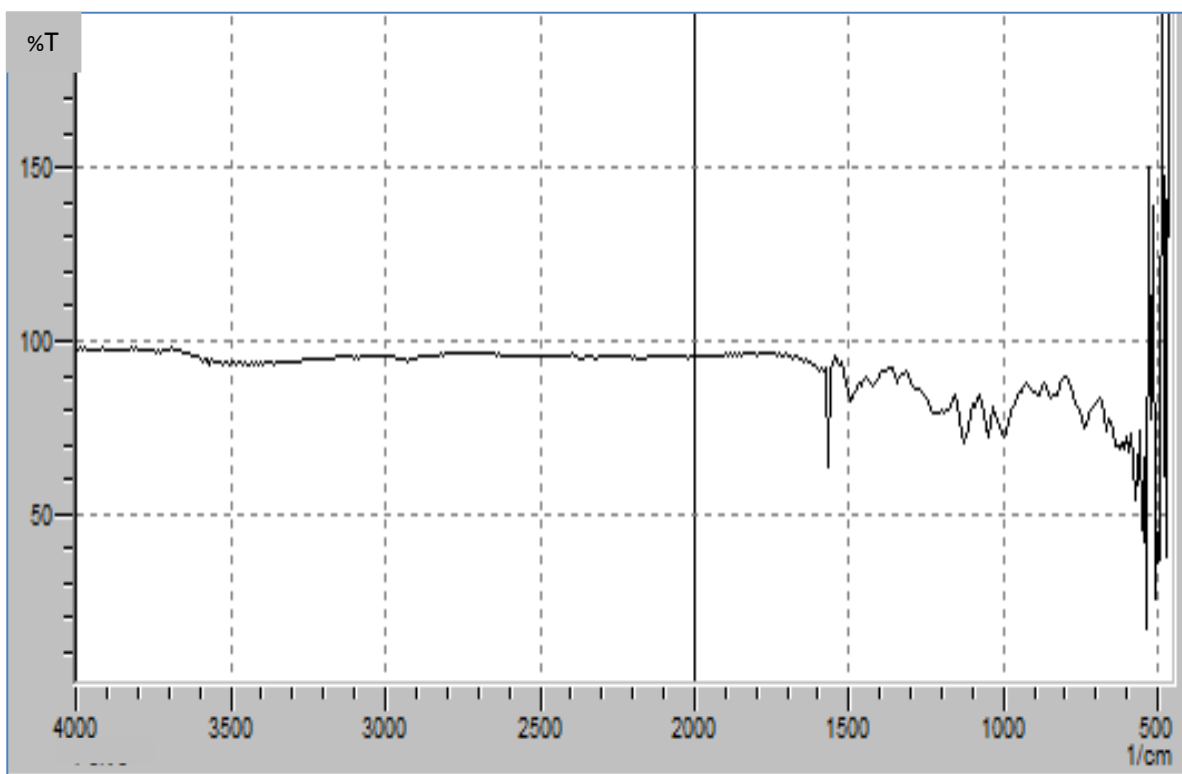
Gráfica 12: Porcentajes de degradación de color de los tratamientos con ozono, ozono a pH alcalino y tratamiento con cloro.



En esta gráfica el porcentaje de degradación de cada método se hace más evidente, se puede observar que los porcentajes obtenidos entre el tratamiento con ozono y ozono a pH alcalino son prácticamente los mismos, no obstante, es mejor utilizar el tratamiento mediante ozono a pH alcalino ya que reduce en gran manera el tiempo de reacción. El tratamiento con cloro resulta también muy efectivo; en comparación con el costo del ozono y el tiempo.

A continuación se muestran los diagramas obtenidos en los análisis de IR para comparar los tratamientos empleados.

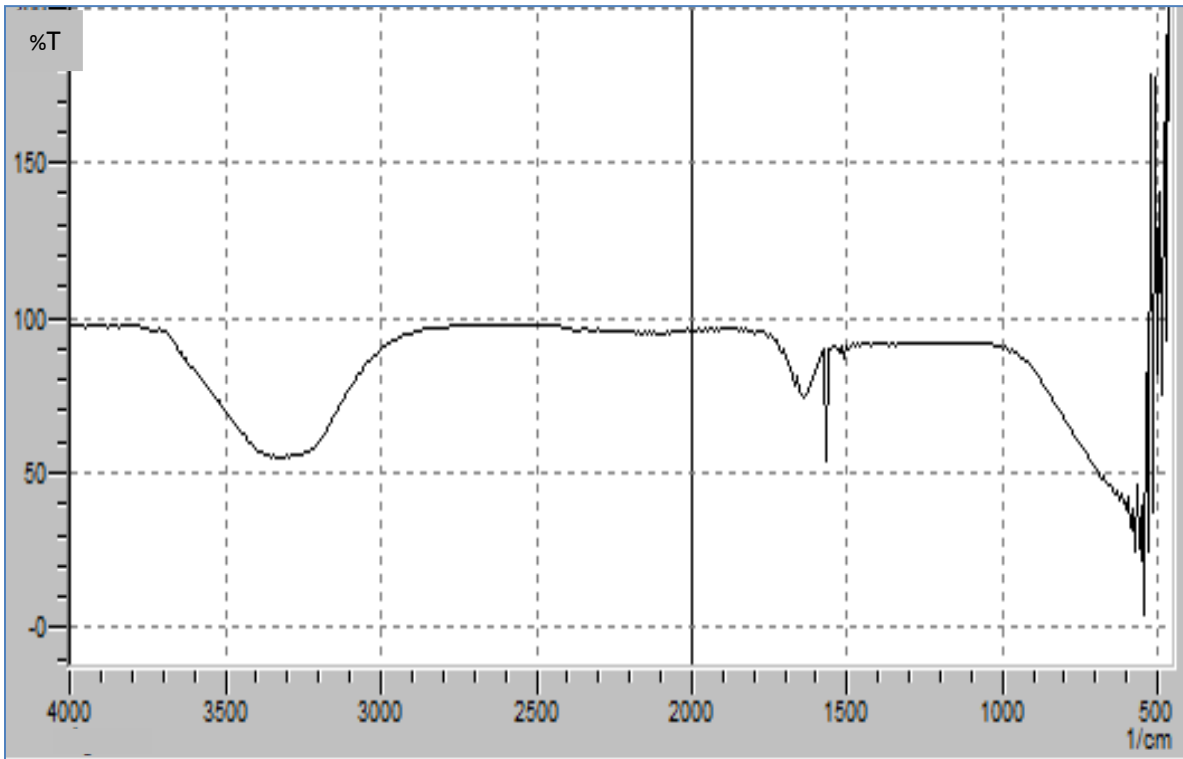
Diagrama 1: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro.



Inicialmente se corre el análisis espectroscópico para la muestra de colorante puro en polvo, (diagrama 1) dando la primer referencia, los picos característicos de la estructura molecular del colorante aparecen en el rango de 1600-500 cm^{-1} , señales características de grupos OH que aparecen en un rango de 3500-3000 cm^{-1} no están presentes, estas señales pueden deberse a la presencia de agua; lógicamente al tratarse del colorante puro, se corrobora que no hay señales características de grupos OH.

Como se trata de comprobar el rompimiento de la estructura molecular del colorante en solución, se procede a correr el análisis para una muestra de agua pura (agua destilada).

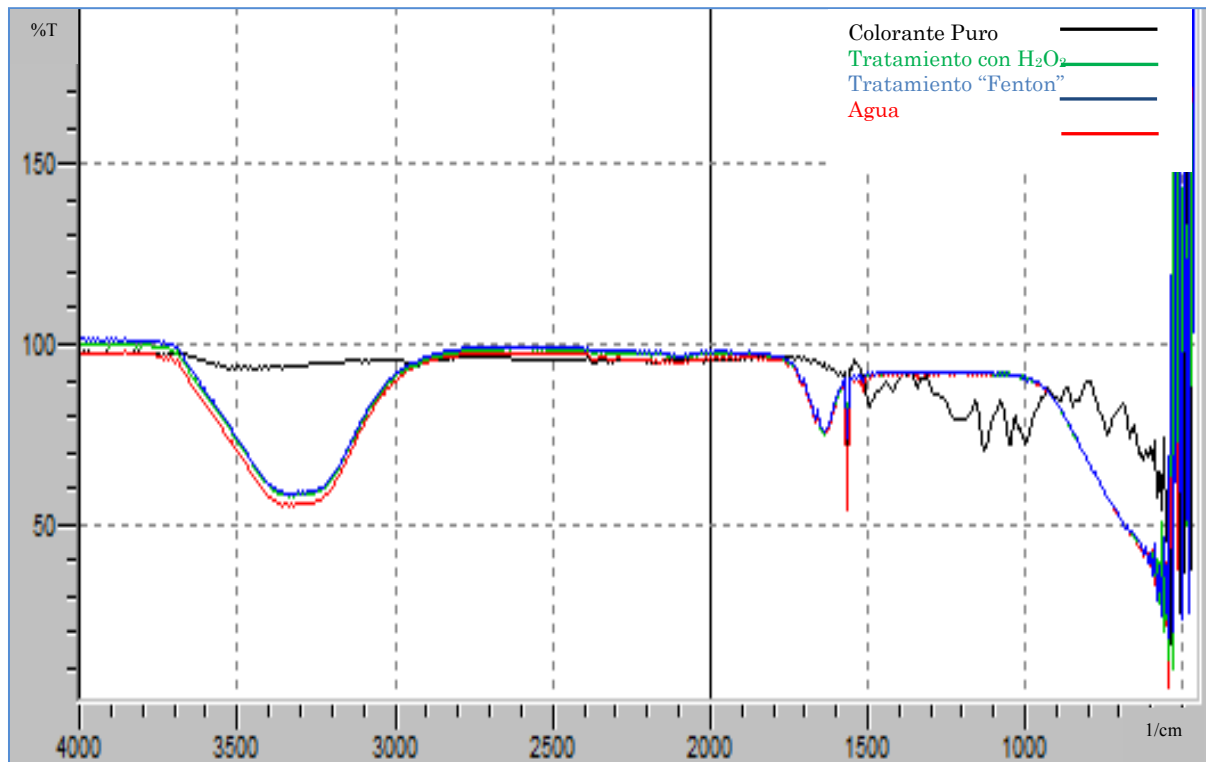
Diagrama 2: Análisis espectroscópico de IR para agua destilada.



Este segundo espectro del agua ayudará para poder comprobar la ruptura de la estructura molecular del colorante, en este caso, como se trata de agua destilada, las señales características de los grupos OH aparecen en el rango de $3500\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$, como era de esperarse.

Una vez que se tienen estos dos patrones de comparación se llevan a cabo los análisis espectroscópicos para las muestras tratadas con los diferentes métodos que se están estudiando.

Diagrama 3: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro y las muestras tratadas con peróxido de hidrógeno y peróxido de hidrógeno /Fe (Tratamiento Fenton).



Se corrieron muestras tratadas con peróxido de hidrógeno y peróxido de hidrógeno /Fe (tratamiento Fenton), se elije un diagrama que ejemplifique los resultados obtenidos con los demás sistemas de reacción. En el diagrama 3 se compara el espectro obtenido por el colorante puro, agua, tratamiento con peróxido de hidrógeno y tratamiento Fenton.

Como puede observarse, gracias a los colores se puede distinguir cual es exactamente el tratamiento con peróxido de hidrógeno y el tratamiento Fenton, sin embargo, ambos tratamientos dan casi la misma lectura y sus espectros se traslapan un poco, esto quiere decir que aportan el mismo resultado. Estos espectros siguen el comportamiento del resultado obtenido con el agua, los picos característicos del espectro difieren con el colorante puro con las muestras ya tratadas para ambos casos. Como puede apreciarse, el tratamiento con peróxido de hidrógeno y el tratamiento Fenton degradan el colorante hasta dejar prácticamente agua, ahora, el rango de 1600-500 cm⁻¹ donde había señales

características del colorante aparece sin señales, lo que significa que al final de los tratamientos la estructura original del colorante ya no existe. El análisis comprueba la ruptura de la molécula orgánica.

El mismo procedimiento es empleado para estudiar los demás sistemas de tratamiento.

Diagrama 4: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro y la muestra tratada con ozono.

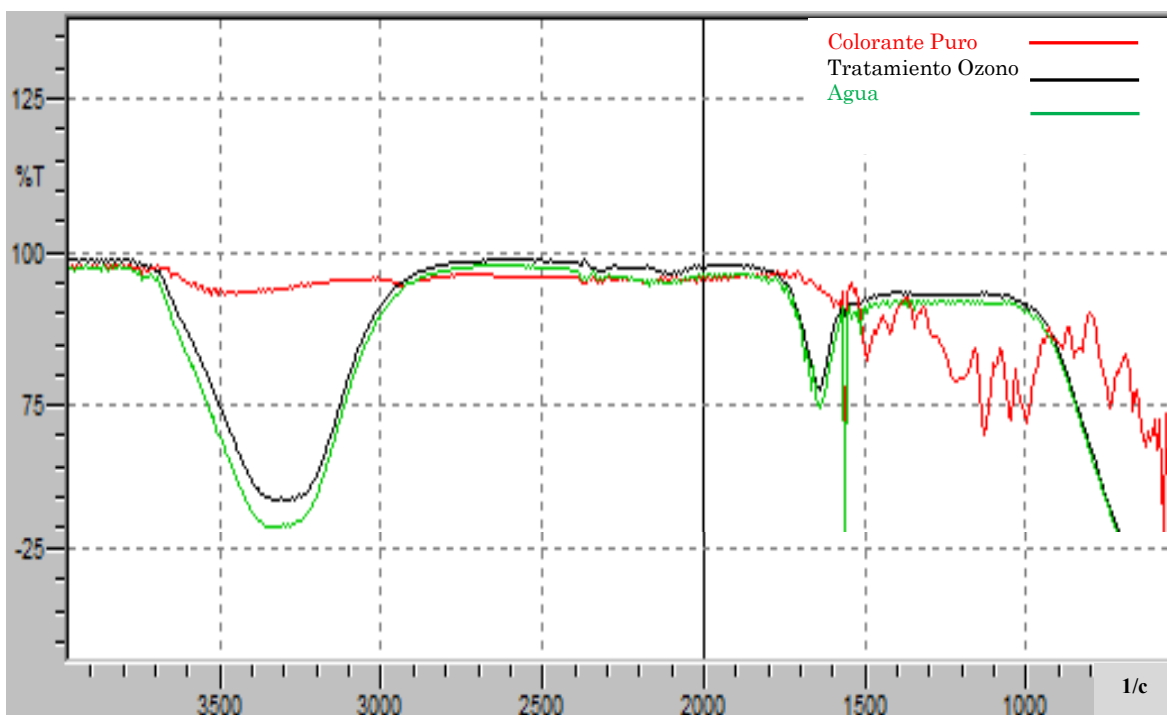
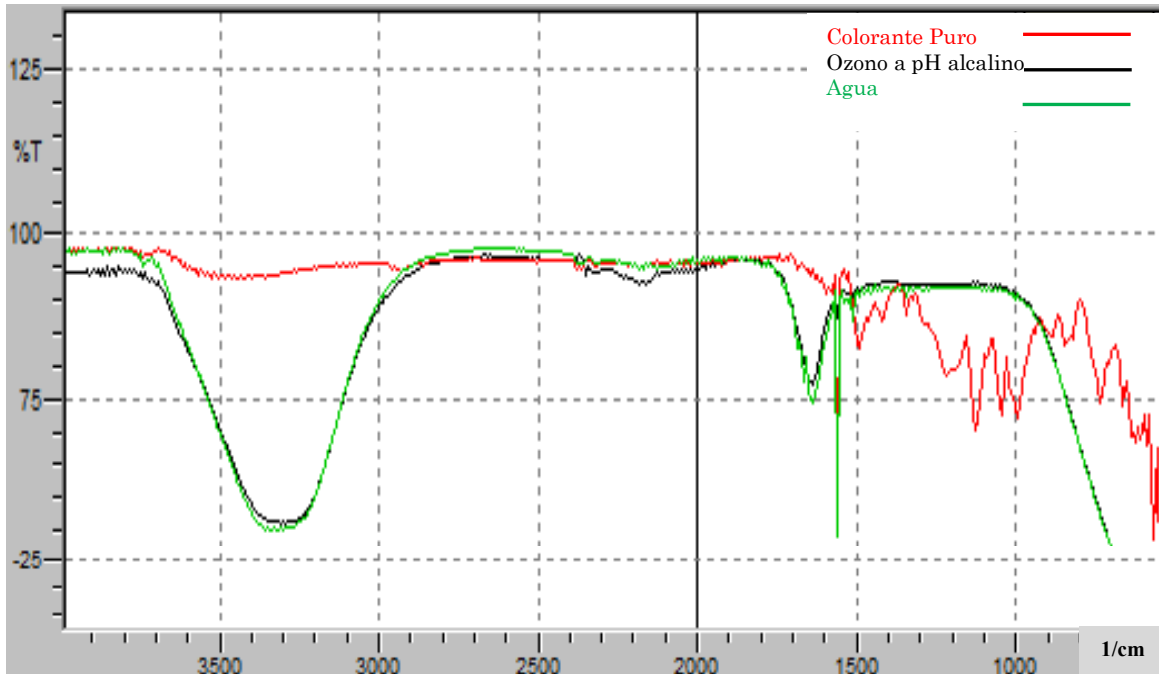
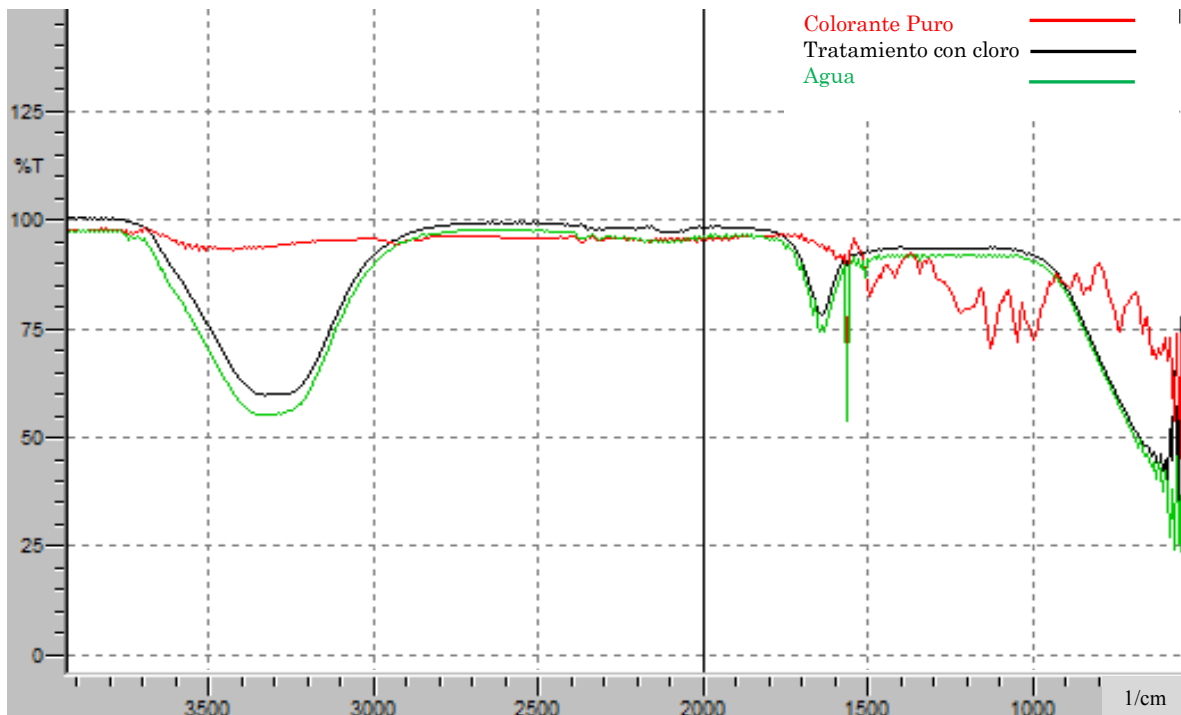


Diagrama 5: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro y la muestra tratada con ozono a pH alcalino.



Los diagramas 4 y 5 se refieren a las muestras tratadas con ozono, para ambos casos, el análisis muestra la ruptura de la molécula ya que, los picos característicos del espectro difieren del colorante puro con las muestras ya tratadas con ozono y ozono en medio alcalino, nuevamente se puede observar que, en el rango de $1600-500\text{ cm}^{-1}$, donde se presenta la característica específica del colorante, ahora ya no se presentan dichas señales. La estructura molecular original del colorante, al ser tratado con ozono, resulta en una señal similar a la del agua.

Diagrama 6: Análisis espectroscópico de IR para el colorante puro y la muestra tratada con cloro.



Las señales en el rango de $1600-500\text{ cm}^{-1}$, donde antes se podía identificar al colorante puro, se han sustituido por señales características del agua. La estructura molecular original del colorante, al ser tratado con cloro, ha dado una señal similar a todas las anteriores, esto es, señales características del agua.

Del análisis espectroscópico de IR se establece que todos los tratamientos resultan efectivos para la degradación del colorante, sin embargo, existen procedimientos que convienen más que otros por sus características que incluyen: tiempo de reacción, costo de los reactivos, costo del proceso, etc.

7 CONCLUSIONES

Se realizó experimentalmente la oxidación del colorante azul marino drimanen CL-R utilizando el tratamiento con peróxido de hidrógeno, Proceso Fenton, ozonización y tratamiento con cloro; con el tratamiento con peróxido de hidrógeno se obtiene una reducción del color del orden del 82.3% en relación 1:4 y la reacción es instantánea, con el tratamiento Fenton se consiguen elevadas reducciones de color, aproximadamente del 94.4%, esto reafirma que el proceso Fenton es mucho mejor que el tratamiento empleando únicamente peróxido de hidrógeno.

En el tratamiento con cloro se obtiene una reducción del color próxima al 100% al igual que en el tratamiento con ozono y el sistema de ozono a pH alcalino.

En todos los tratamientos se alcanzó la oxidación del colorante, esto pudo ser corroborado gracias a la determinación espectroscópica con IR que se realizó, ya que la estructura del colorante original difiere con las muestras ya tratadas con cada uno de los sistemas que se estudiaron.

El tratamiento del colorante mediante el proceso Fenton es la mejor opción que se encontró para esta investigación ya que los porcentajes de degradación son casi totales, es rápido, económico, fácil de utilizar y se puede utilizar el peróxido de hidrógeno comercial, que es mucho más barato que el H_2O_2 reactivo analítico, además, con el aumento de temperatura se puede obtener una degradación más rápida aunada a los beneficios de manejar H_2O_2 comercial.

En términos de efectividad, en un sistema optimizado, el reactivo Fenton no daña el medio ambiente, ya que el impacto medioambiental se ve reducido por la dosis necesaria de reactivos. El proceso Fenton es seguro, permite la oxidación de la estructura del colorante, así, el efluente tratado se podría descargar de una forma segura sin necesidad de un tratamiento posterior, aunque no queda descartada la posibilidad de usarlo ya que logra un incremento de la biodegradabilidad de los contaminantes orgánicos.

El peróxido de hidrógeno comercial es muy accesible, el precio de 500 mL de agua oxigenada es de \$9.50 pesos. El costo de 1 kilogramo de reactivo de Sulfato ferroso amoniacal es de aproximadamente \$1,280.00 pesos; la concentración necesaria para catalizar el sistema es muy bajo, por lo que el costo resulta poco afectado.

El costo del tratamiento con ozono radica principalmente en el gasto de energía eléctrica y el equipo necesario.

El precio de 500 mL de cloro es alrededor de \$6.00 pesos y es muy fácil de conseguir, desafortunadamente se conoce que produce compuestos organoclorados los cuales pueden ser cancerígenos, pero en este caso, al analizar el espectro de IR la molécula del colorante se oxida totalmente.

8 REFERENCIAS

1. Andreozzi, Roberto, Vincenzo Caprio, Amedeo Insola y Raffaele Marotta. ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOP) FOR WATER PURIFICATION AND RECOVERY. *Catalysis Today* 53 (1999) 51–59.
2. Barros, A.L. y cols. DECOLORIZING DYE WASTEWATER FROM THE AGATE INDUSTRY WITH FENTON OXIDATION PROCESS. *Minerals Eng.* 19 (2006) 87–90.
3. Behnajady, M.A., N. Modirshahla y F. Ghanbary. A KINETIC MODEL FOR THE DECOLORIZATION OF C.I. ACID YELLOW 23 BY FENTON PROCESS. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 98–102.
4. Constapel, M., Marc Schellenträger, Joachim Michael Marzinkowski y Siegmur Gäb. DEGRADATION OF REACTIVE DYES IN WASTEWATER FROM THE TEXTILE INDUSTRY BY OZONE: ANALYSIS OF THE PRODUCTS BY ACCURATE MASSES. *Water research* 43 (2009) 733–743.
5. Domènech Xavier, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 1998.
6. EEPP de Medellín, Departamento de Tratamiento de Acueducto, FUNDAMENTOS PARA LOS PROCESOS DE POTABILIZACIÓN, Tomos I y II.
7. Figueroa, Sandra y cols. DECOLORIZING TEXTILE WASTEWATER WITH FENTON'S REAGENT ELECTROGENERATED WITH A SOLAR PHOTOVOLTAIC CELL. *Water Res.* 43 (2009) 283–294.
8. G.P, Olívia Salomé S, José J.M. Órfao, Dionísia Portela, António Vieira, Manuel Fernando R. Pereira. OZONATION OF TEXTILE EFFLUENTS AND DYE SOLUTIONS UNDER CONTINUOUS OPERATION: INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS. *Journal of Hazardous Materials* B137 (2006) 1664–1673.
9. Guerrero. M. Elena, Roberto Briones Méndez e Ilangovan Kuppusamy. BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA DE COLORANTES TIPO AZO VÍA SULFATO-REDUCTORAS. Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1996.
10. Hameed, B.H. y T.W. Lee. DEGRADATION OF MALACHITE GREEN IN AQUEOUS SOLUTION BY FENTON PROCESS. *Journal of Hazardous Materials* 164 (2009) 468–472.

11. Lodha, Bharat y Sanjeev Chaudhari. OPTIMIZATION OF FENTON-BIOLOGICAL TREATMENT SCHEME FOR THE TREATMENT OF AQUEOUS DYE SOLUTIONS. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 459–466.
12. Mansilla, Héctor D., Cristian Lizama, Abel Gutarra y Juan Rodríguez. TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA DE CELULOSA Y TEXTIL. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, 2001.
13. P, Nilesh Tantak y Sanjeev Chaudhari. DEGRADATION OF AZO DYES BY SEQUENTIAL FENTON'S OXIDATION AND AEROBIC BIOLOGICAL TREATMENT. *Journal of Hazardous Materials* B136 (2006) 698–705
14. Papić, Sanja, Dinko Vujević, Natalija Koprivanac y Danijel Šinko. DECOLOURIZATION AND MINERALIZATION OF COMMERCIAL REACTIVE DYES BY USING HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS FENTON AND UV/FENTON PROCESSES. *Journal of Hazardous Materials* 164 (2009) 1137–1145.
15. Pignatello, Joseph J, Esther Oliveros y Allison MacKay. ADVANCED OXIDATION PROCESSES FOR ORGANIC CONTAMINANT DESTRUCTION BASED ON THE FENTON REACTION AND RELATED CHEMISTRY. *Environmental Science and Technology* 35(2006) 1-84.
16. Quezada, Maribel y Germán Buitrón. BIODEGRADACIÓN AEROBIA DE COLORANTES TIPO AZO (ROJO ÁCIDO 151). Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1996.
17. Rajkumar, D. y Jong Guk Kim. OXIDATION OF VARIOUS REACTIVE DYES WITH IN SITU ELECTRO-GENERATED ACTIVE CHLORINE FOR TEXTILE DYEING INDUSTRY WASTEWATER TREATMENT. *Journal of Hazardous Materials* B136 (2006) 203–212.
18. W, Laura Lackey, Richard O. Mines Jr. y Philip T. McCreanor. OZONATION OF ACID YELLOW 17 DYE IN A SEMI-BATCH BUBBLE COLUMN. *Journal of Hazardous Materials* B138 (2006) 357–362.
19. Wu, Jiangning, Huu Doan y Simant Upreti. DECOLORIZATION OF AQUEOUS TEXTILE REACTIVE DYE BY OZONE. *Chemical Engineering Journal* 142 (2008) 156–160.
20. Yagüe, C. S. ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS DE INDUSTRIAS DE ACABADO DE PIEL MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España, 2001.

21. Zhang H., Choi H.J., HUANG C. OPTIMIZATION OF FENTON PROCESS FOR THE TREATMENT OF LANDFILL LEACHATE. *Journal of Hazardous Materials* 125 (2005) 166-174.
22. Investigación y desarrollo. Industria textil. Consultado el 9 de agosto de 2010. Disponible en:
www.invdes.com.mx/index.php?option=com_contentview=articleidlogranprometedo-raformaparadestenirmezcilla.
23. Compuestos. Aplicaciones. Cloro. Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en: <http://html.rincondelvago.com/halogenos.html>
24. Decolorantes y agentes blanqueadores. Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en:
<http://www.jmcprl.net/glosario/decolorantes%20y%20agentes20blanqueadores.htm>
25. El agua potable segura y esencial. Oxidantes. Consultado el 15 de julio de 2010. Disponible en: <http://www.drinking-water.org/html/es/Treatment/Chemical-DisinfectionOxidants.html>
26. El agua y la contaminación Ambiental. Consultado el 10 de Agosto de 2010. Disponible en: www.scribd.com/doc/.../agua-contaminacionambiental.
27. Las aplicaciones del Cloro. Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en: <http://www.solvayiberica.es/static/wma/pdf/1/3/9/2/Ficha02a.pdf>
28. *Misterios en los productos de limpieza*, Marta Segura y Josep M Valls. Consultado el 30 de julio de 2010. Disponible en:
http://www.consejogeneralcdl.es/jornadasfq_08/Misterios%20en%20los%20productos%20de%20limpieza.doc.
29. Potabilización del agua. Antonio Sarmiento Sera. Profesor Titular del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en:
http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia24/HTML_articulo04
30. Tehuacán: Divining Destiny (En español). Consultado el 29 de julio de 2010. Disponible en:
<http://www.circleofblue.org/waternews/2010/world/tehuacan-divining-destiny-en-espanol/>

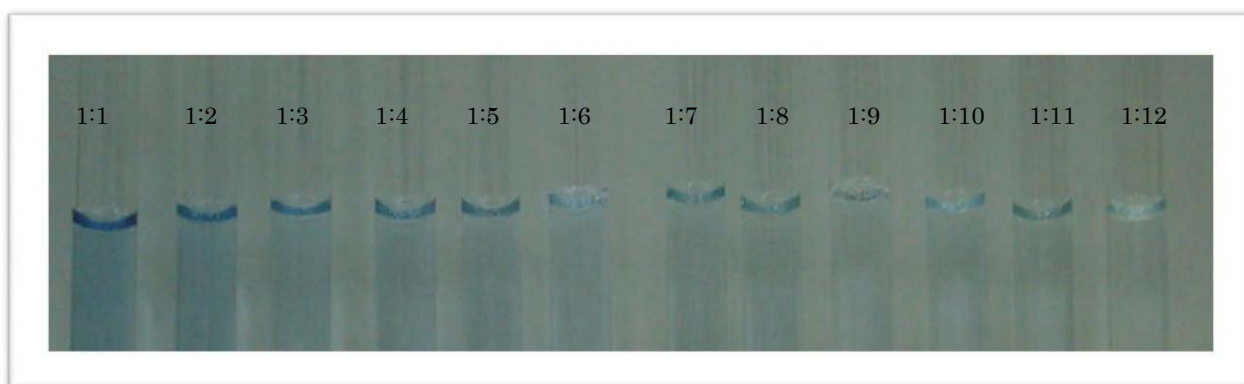
9 ANEXOS

9.1 ANEXO "A"

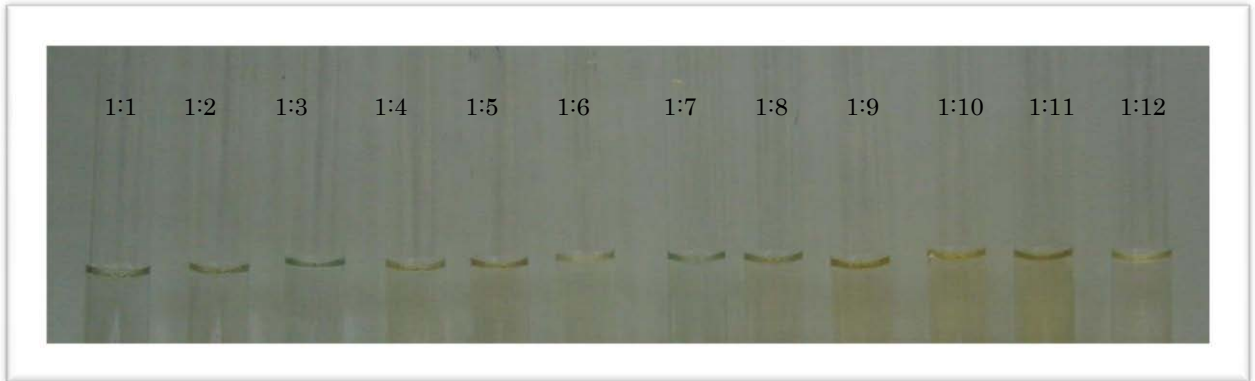
Comparación entre el tratamiento con peróxido de hidrógeno y tratamiento Fenton

- 1) Pruebas realizadas para las concentración de colorante azul marino drimanen CL-R de: 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm desde la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 1 parte de peróxido de hidrógeno) hasta la relación 1:12 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R y 12 partes de peróxido de hidrógeno) sometidas al tratamiento con peróxido de hidrógeno como oxidante **(TP)**.

 - 2) Pruebas realizadas para las concentración de colorante azul marino drimanen CL-R de: 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm desde la relación 1:1 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 1 parte de peróxido de hidrógeno y 1 parte de sulfato ferroso) hasta la relación 1:12 (1 parte de colorante azul marino drimanen CL-R, 12 partes de peróxido de hidrógeno y 12 partes de sulfato ferroso) sometidas al tratamiento Fenton **(TF)**.
- a) **Concentración del colorante de 10 ppm.**
- 1) **Tratamiento con peróxido de hidrogeno (TP)**

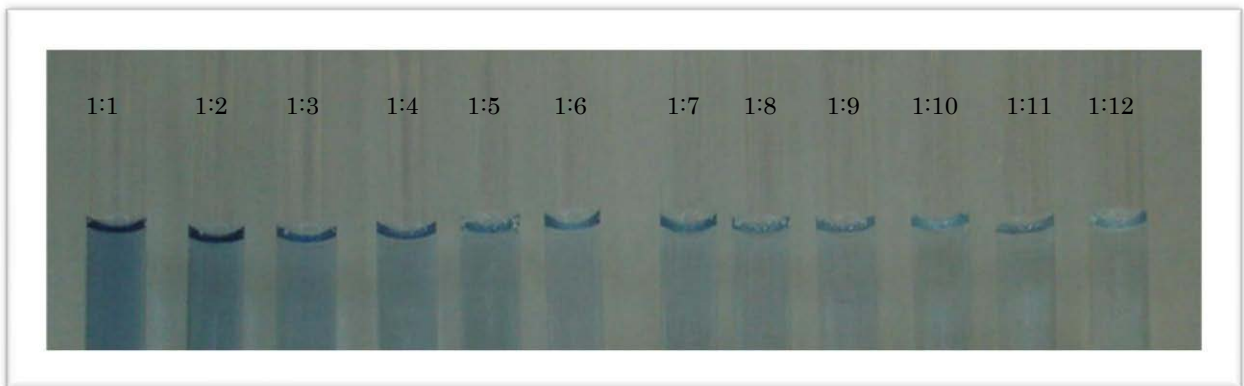


2) Tratamiento Fenton (TF)

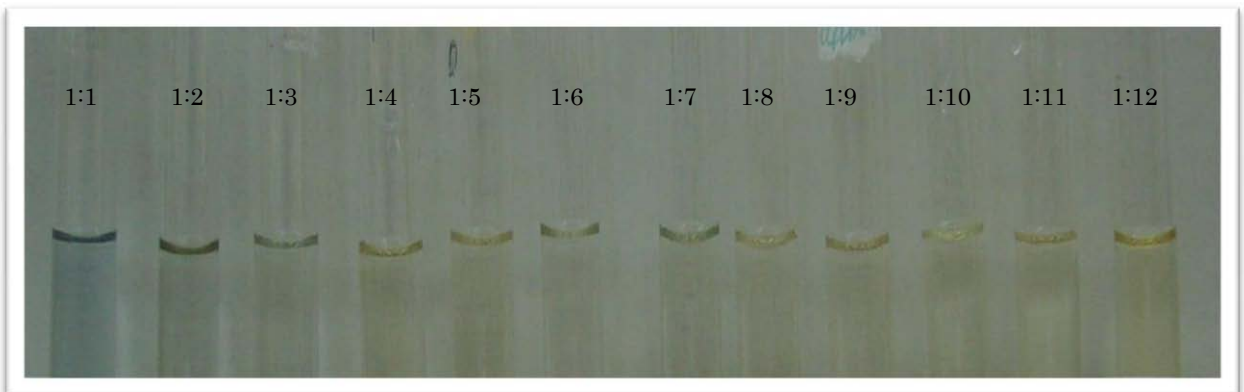


b) Concentración del colorante de 20 ppm.

1) Tratamiento con peróxido de hidrógeno (TP)

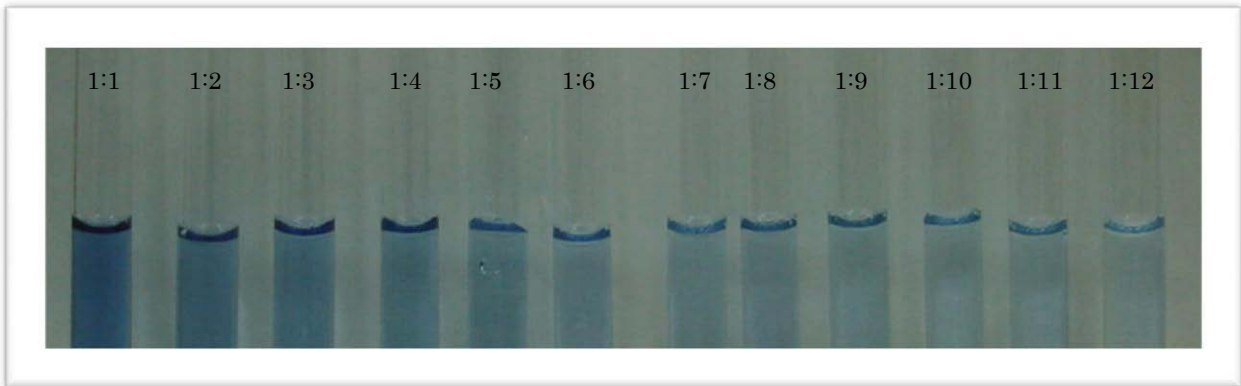


2) Tratamiento Fenton (TF)

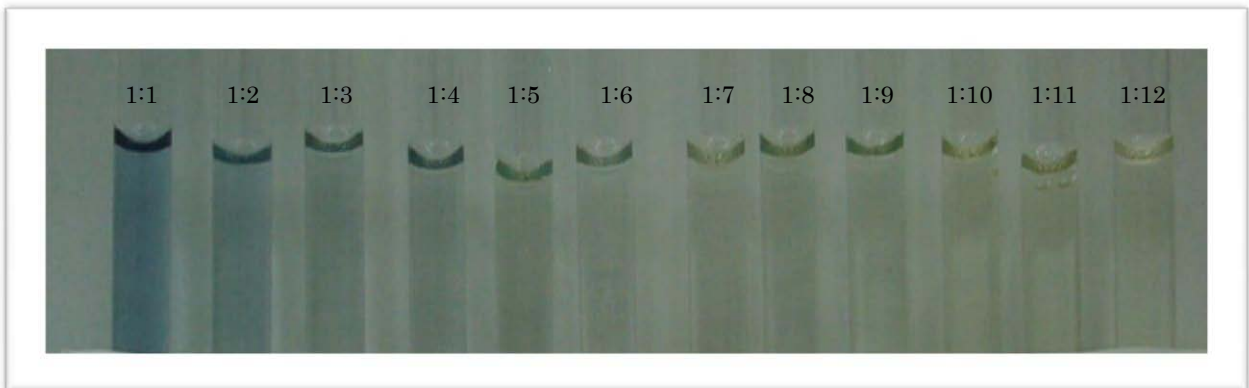


c) Concentración del colorante de 30 ppm.

1) Tratamiento con peróxido de hidrógeno (TP)

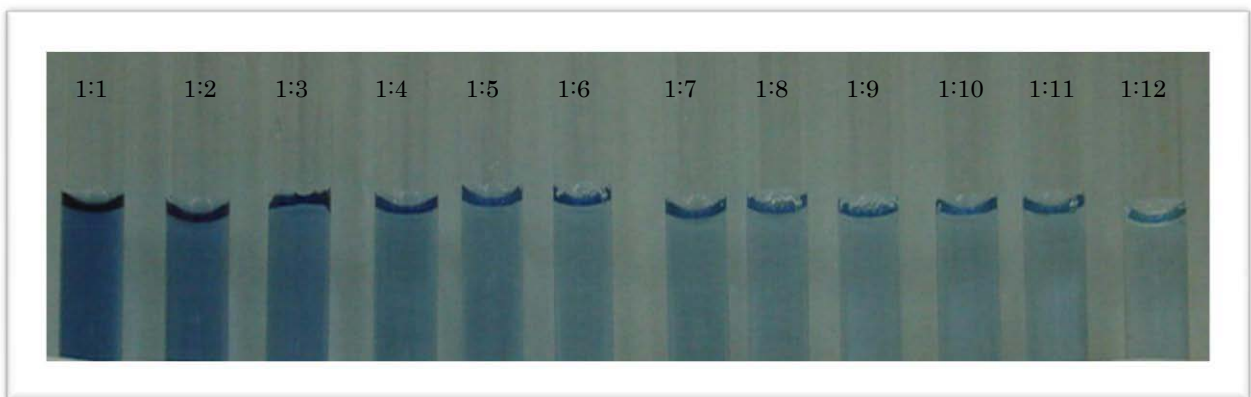


2) Tratamiento Fenton (TF)

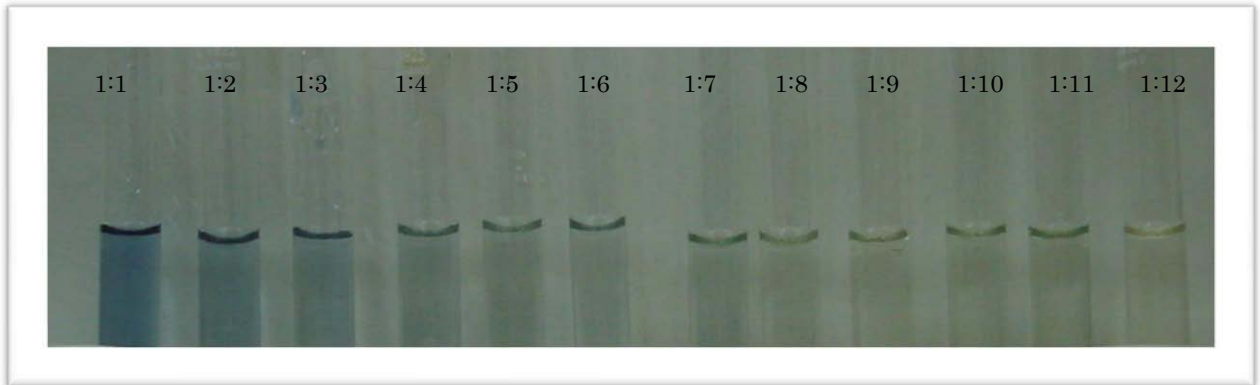


d) Concentración del colorante de 40 ppm.

1) Tratamiento con peróxido de hidrógeno (TP)

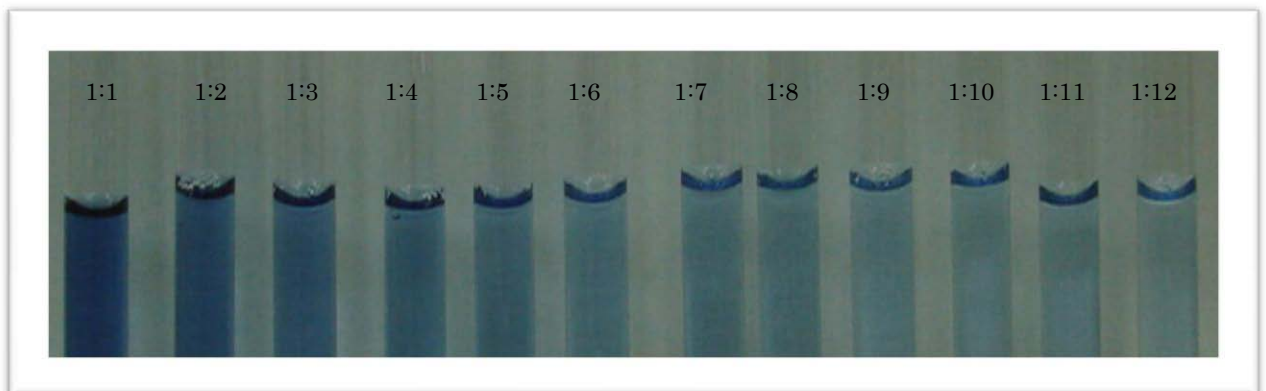


2) Tratamiento Fenton (TF)

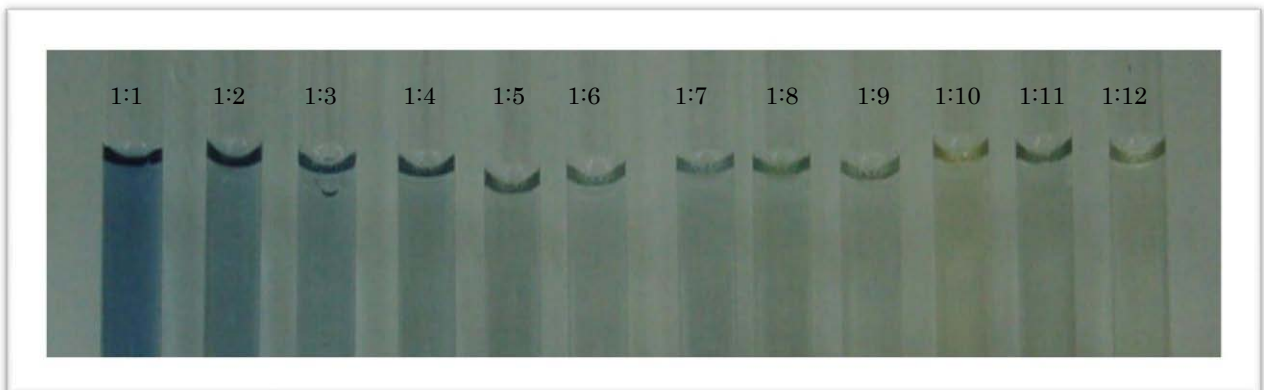


e) Concentración del colorante de 50 ppm.

1) Tratamiento con peróxido de hidrógeno (TP)

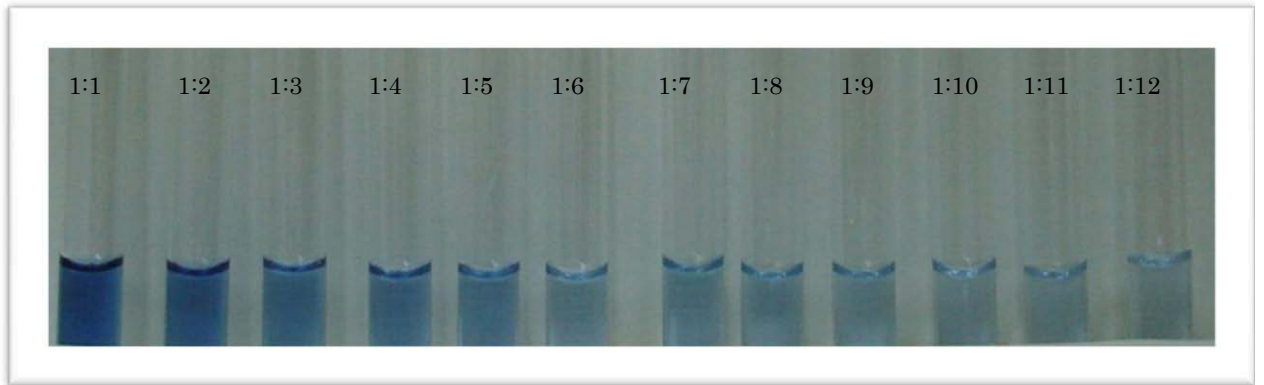


2) Tratamiento Fenton (TF)

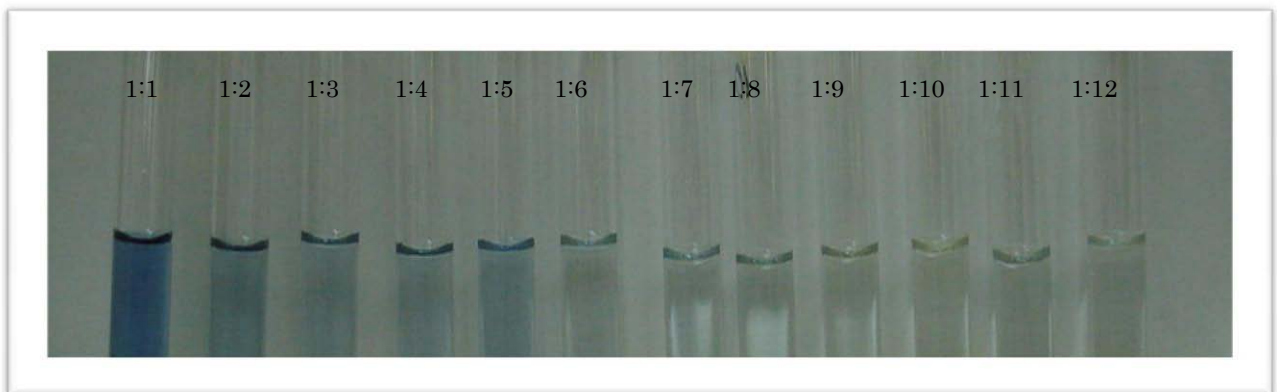


f) Concentración del colorante de 60 ppm.

1) Tratamiento con peróxido de hidrógeno (TP)



2) Tratamiento Fenton (TF)

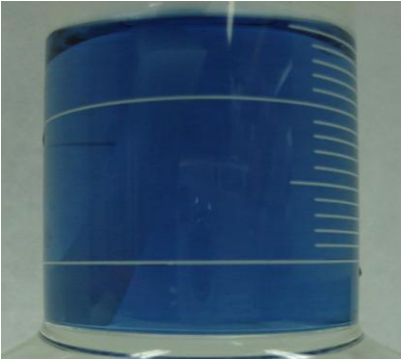
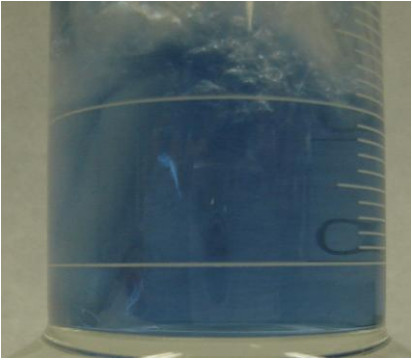







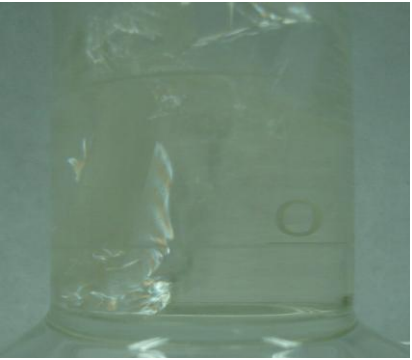
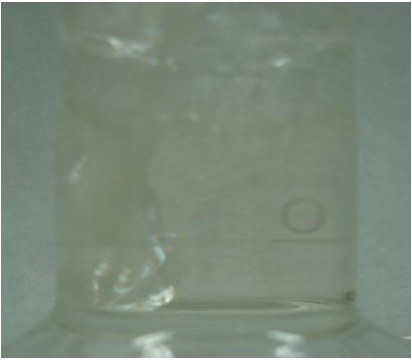


9.2 ANEXO “B”

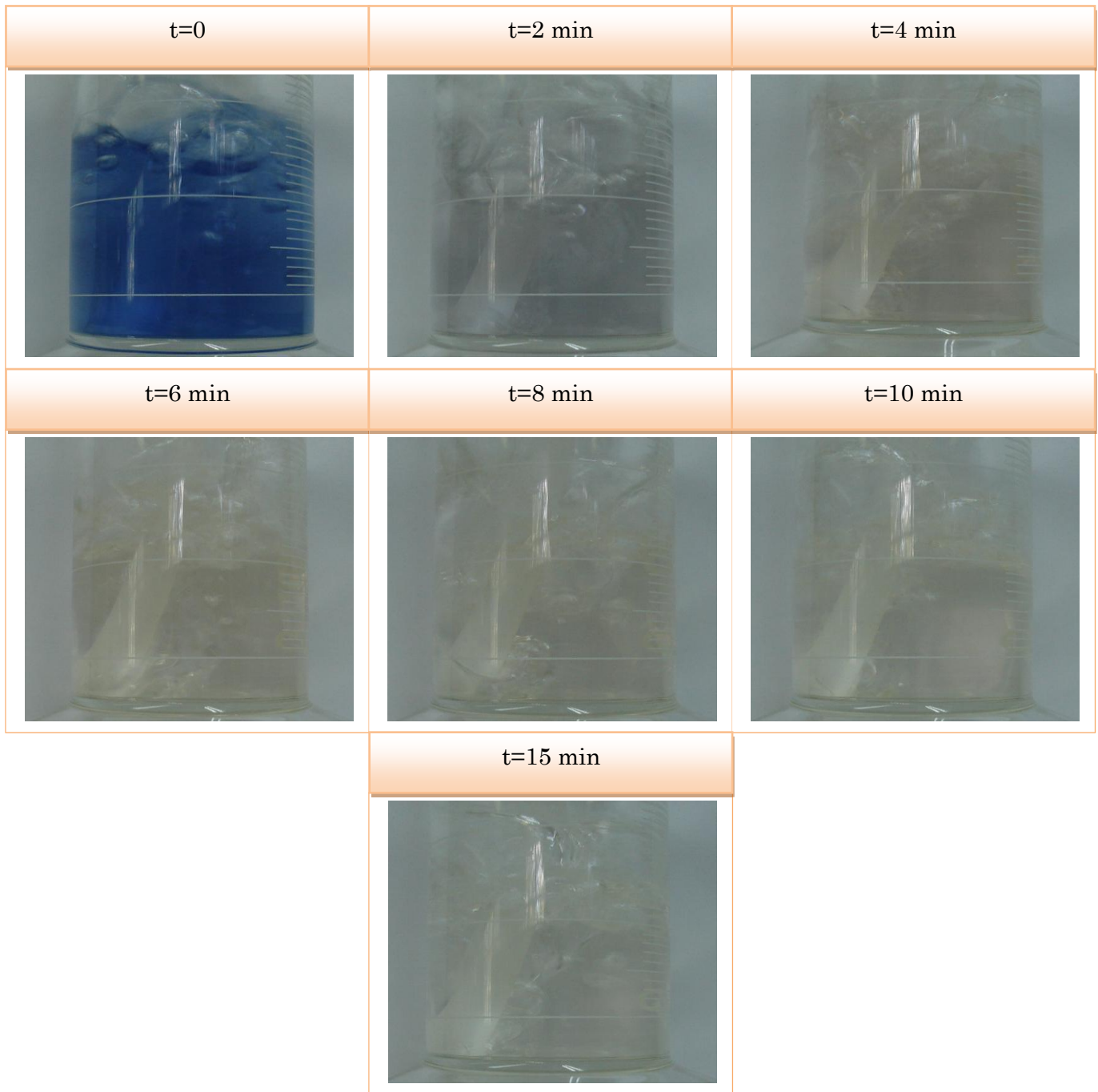
Comparación entre el tratamiento con ozono y ozono a pH alcalino

A continuación se hace una comparación de la secuencia de degradación para ambos tratamientos, los siguientes cuadros especifican el tiempo total de degradación para cada tratamiento empleado y para cada una de las concentraciones manejadas que son de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm.



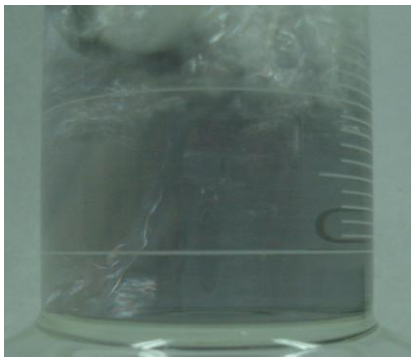
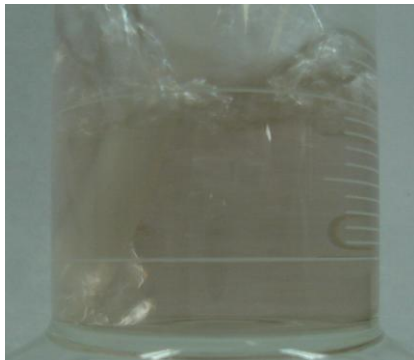
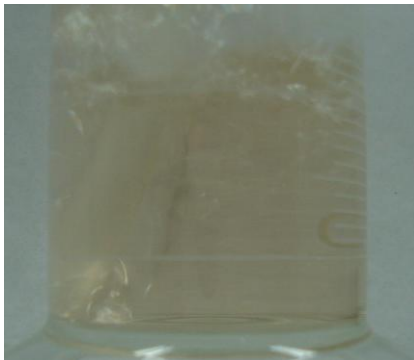
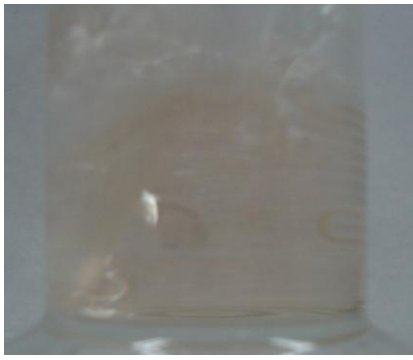


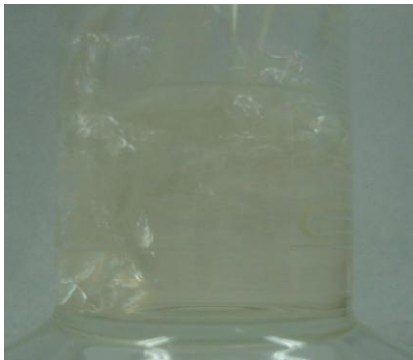

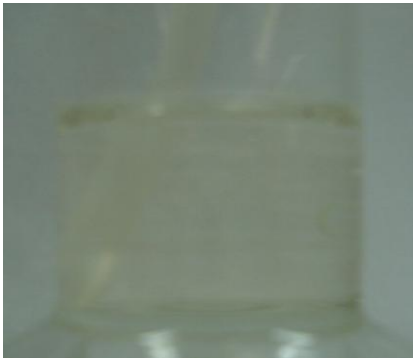
Esquema A: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 10 ppm.

| | | |
|---|--|---|
| t=0 | t=5 min | t=10 min |
|  |  |  |
| t=15 min | t=20 min | t=30 min |
|  |  |  |
| t=40 min | t=50 min | t=60 min |
|  |  |  |
| t=70 min | | t=80 min |
|  | |  |

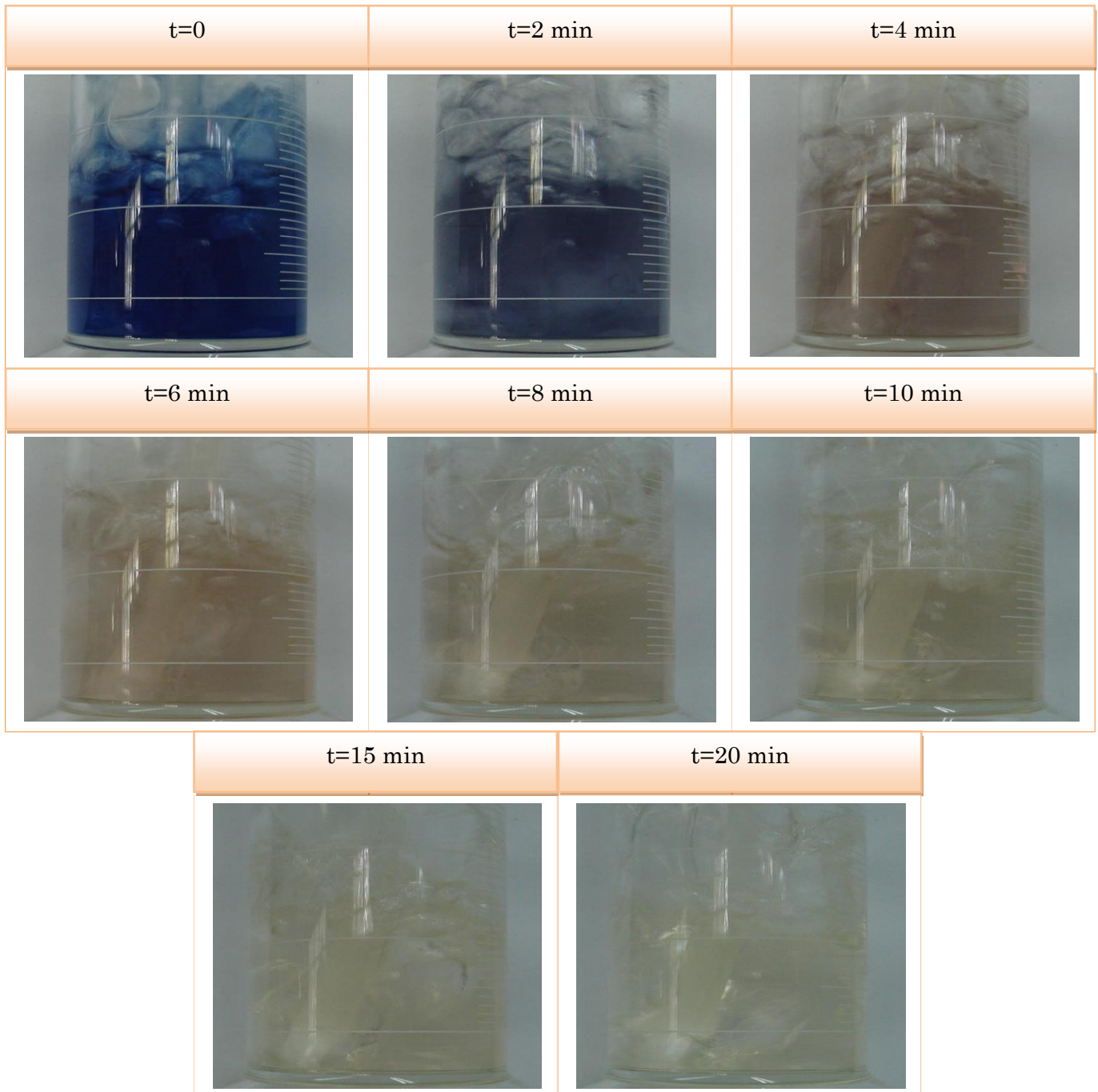
Esquema B: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 10 ppm.



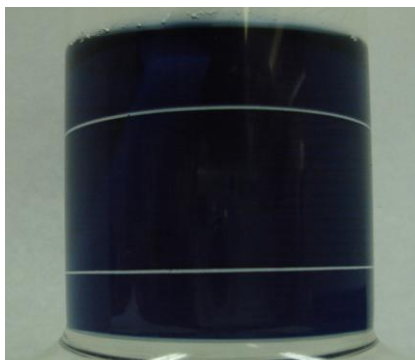
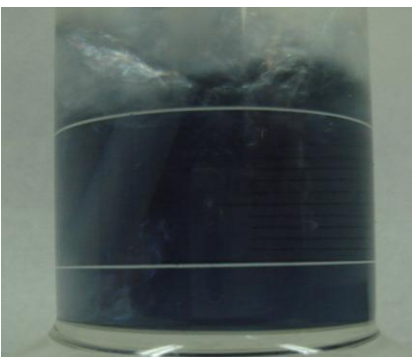

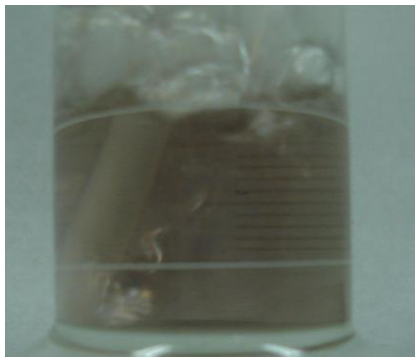

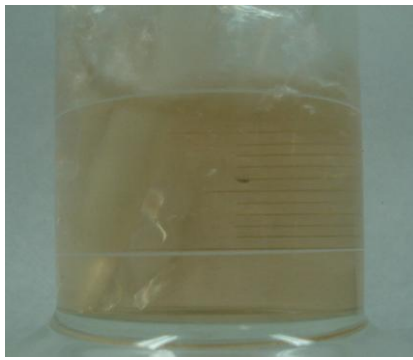


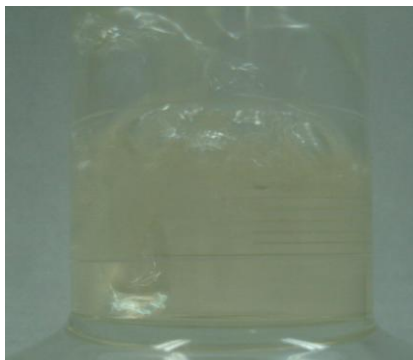


Esquema C: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 20 ppm.

| | | |
|---|--|---|
| t=0 | t=20 min | t=30 min |
|  |  |  |
| t=40 min | t=50 min | t=60 min |
|  |  |  |
| t=80 min | t=100 min | t=120 min |
|  |  |  |
| t=140 min | | t=160 min |
|  |  | |

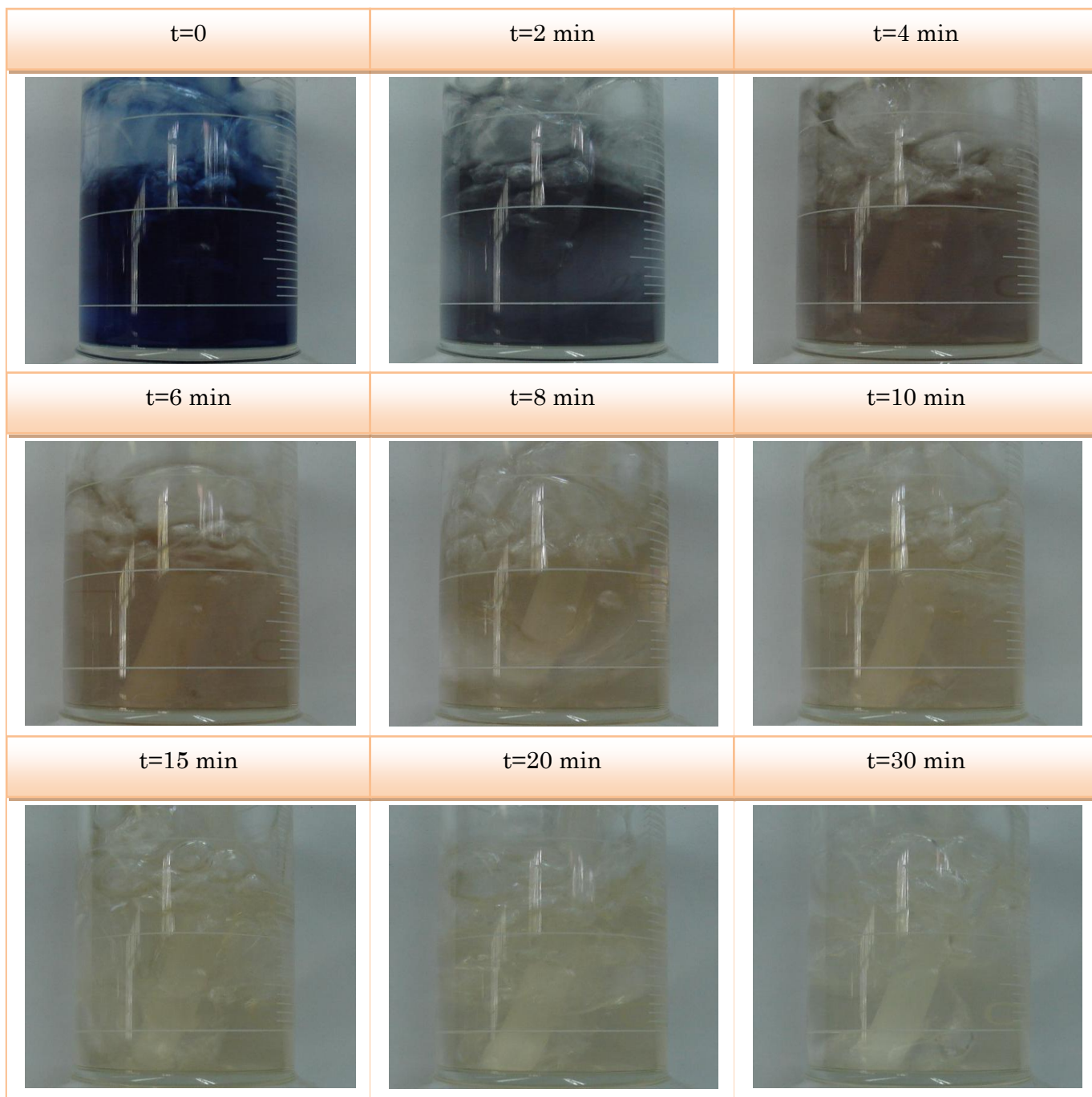
Esquema D: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 20 ppm.



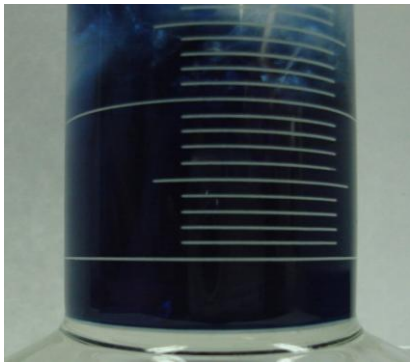
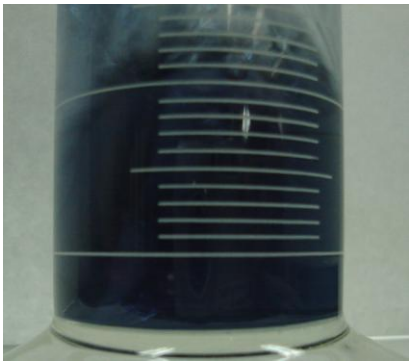
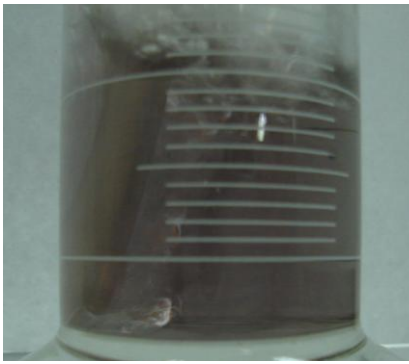
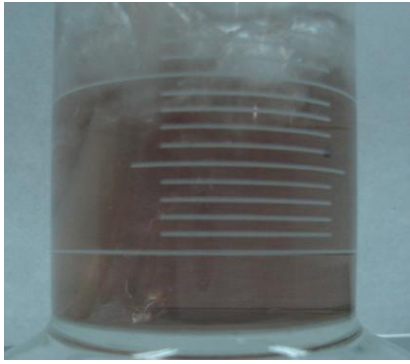
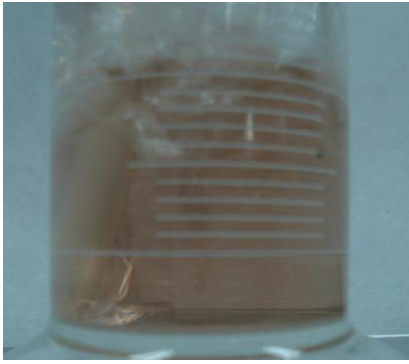
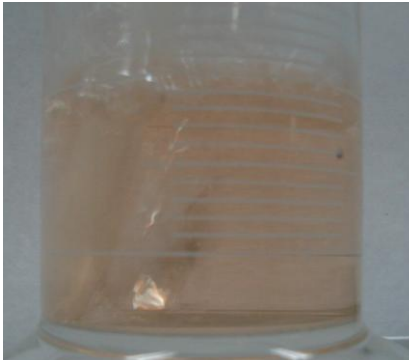





Esquema E: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 30 ppm.

| | | |
|---|--|---|
| t=0 | t=30 min | t=40 min |
|  |  |  |
| t=50 min | t=60 min | t=70 min |
|  |  |  |
| t=90 min | t=130 min | t=170 min |
|  |  |  |
| t=220 min | | t=230 min |
|  |  | |


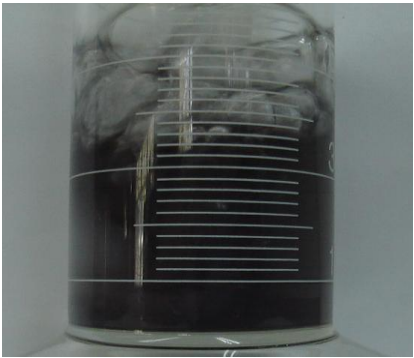

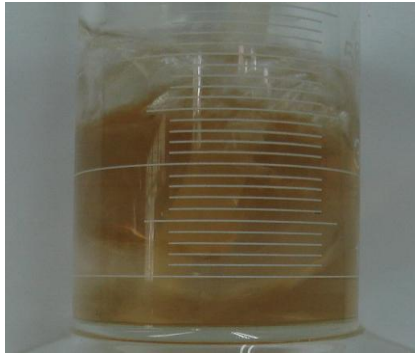






Esquema F: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 30 ppm.












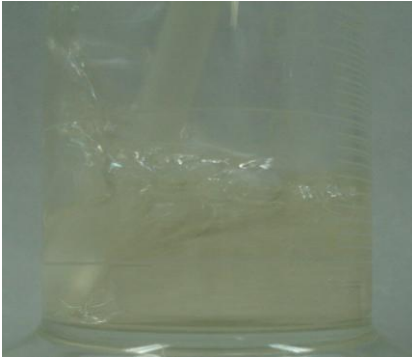

Esquema G: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 40 ppm.

| | | |
|---|--|---|
| t=0 | t=30 min | t=60 min |
|  |  |  |
| t=70 min | t=80 min | t=120 min |
|  |  |  |
| t=160 min | t=200 min | t=230 min |
|  |  |  |
| t=260 min | t=300 min | |
|  |  | |

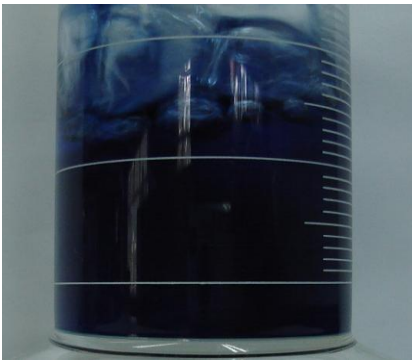
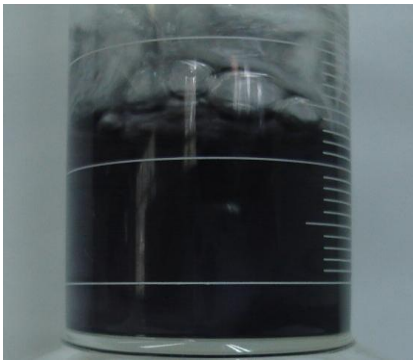


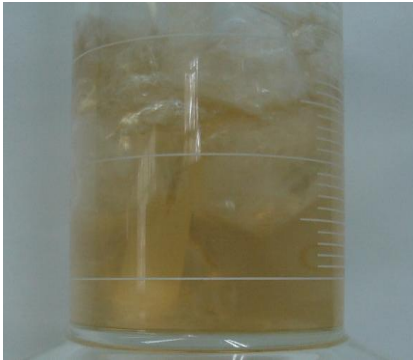






Esquema H: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 40 ppm.

| | | |
|---|--|---|
| t=0 | t=2 min | t=4 min |
|  |  |  |
| t=6 min | t=8 min | t=10 min |
|  |  |  |
| t=15 min | t=20 min | t=30 min |
|  |  |  |
| | | t=40 min |
| | |  |

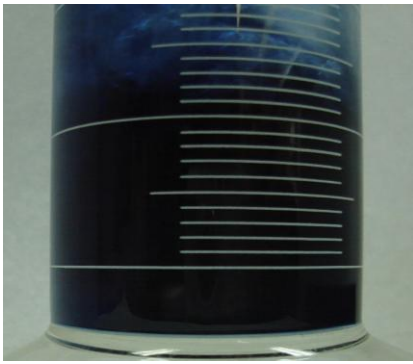
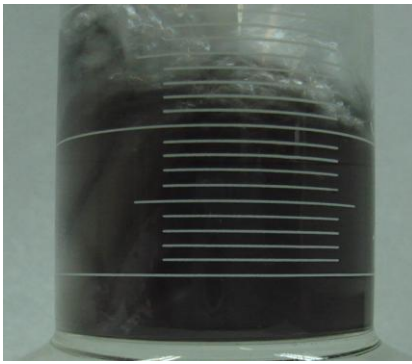
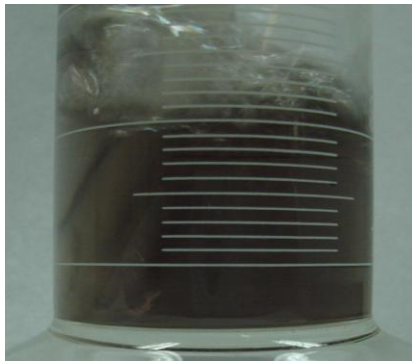
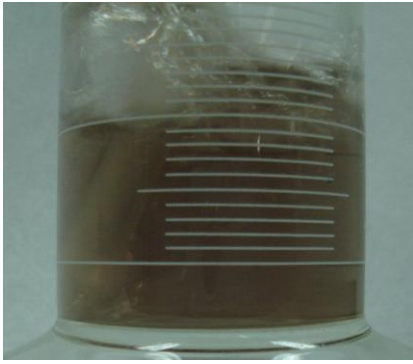
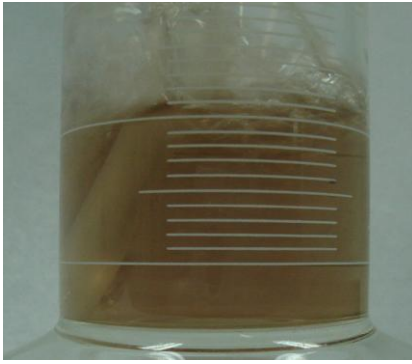
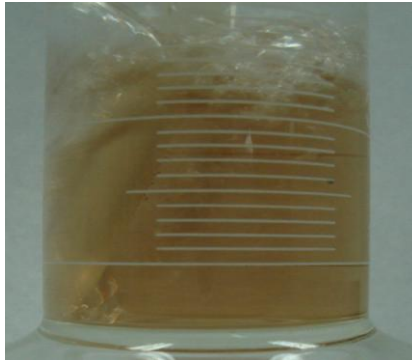
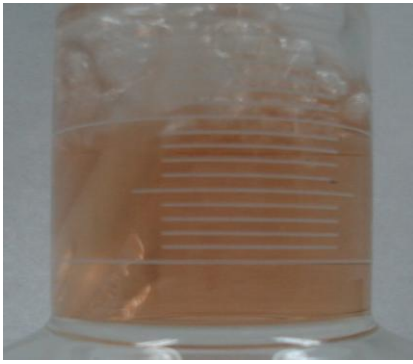



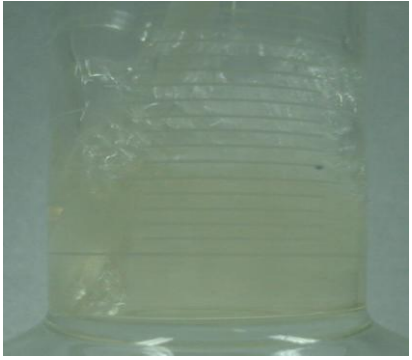
Esquema I: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 50 ppm.

| | | |
|---|--|---|
| t=0 | t=60 min | t=80 min |
|  |  |  |
| t=100 min | t=120 min | t=140 min |
|  |  |  |
| t=160 min | t=180 min | t=200 min |
|  |  |  |
| t=300 min | | t=360 min |
|  |  | |

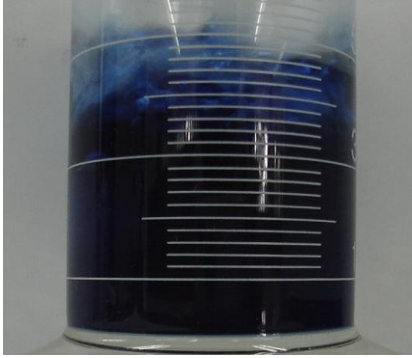
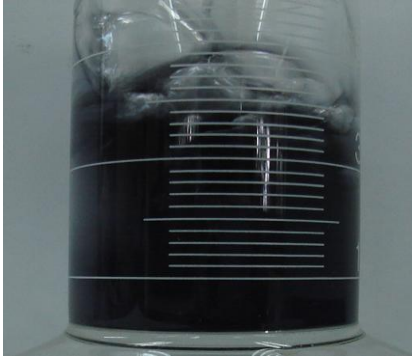
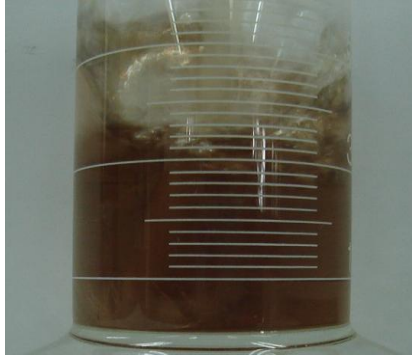









Esquema J: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 50 ppm.

| | | |
|---|--|---|
| t=0 | t=2 min | t=4 min |
|  |  |  |
| t=6 min | t=8 min | t=10 min |
|  |  |  |
| t=15 min | t=20 min | t=30 min |
|  |  |  |
| t=40 min | t=50 min | |
|  |  | |

Esquema K: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a una concentración de colorante de 60 ppm.

| | | |
|---|--|---|
| t=0 | t=70 min | t=80 min |
|  |  |  |
| t=90 min | t=100 min | t=110 min |
|  |  |  |
| t=120 min | t=230 min | t=270 min |
|  |  |  |
| t=340 min | | t=450 min |
|  |  | |

Esquema L: Representación de la secuencia de degradación para el tratamiento con ozono a pH alcalino, concentración de colorante de 60 ppm.

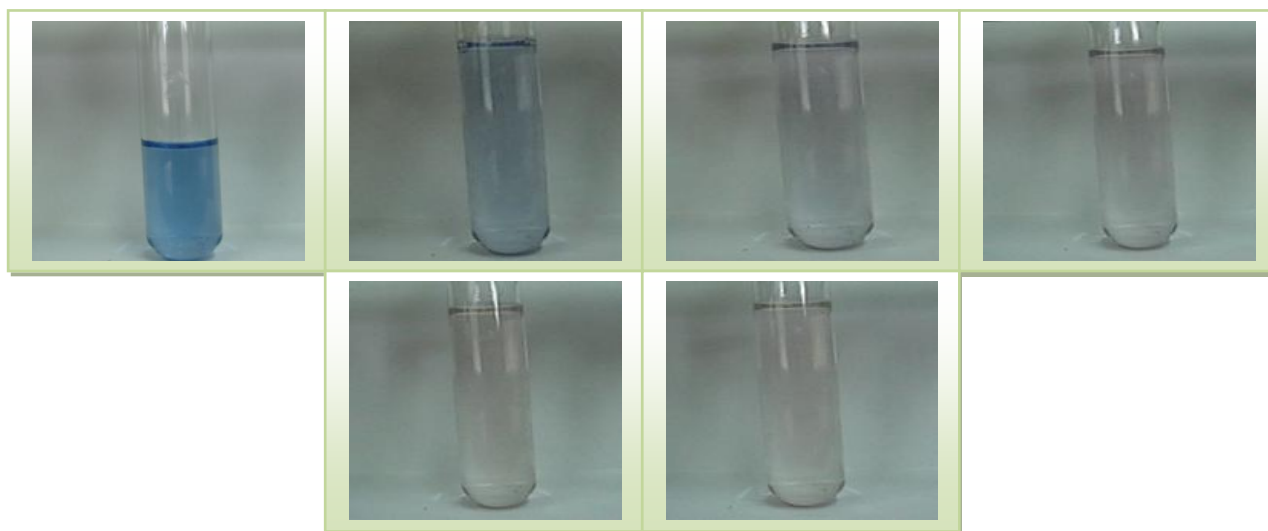
| t=0 | t=2 min | t=4 min |
|---|--|---|
|  |  |  |
| t=6 min | t=8 min | t=10 min |
|  |  |  |
| t=15 min | t=20 min | t=30 min |
|  |  |  |
| t=40 min | t=50 min | t=60 min |
|  |  |  |

9.3 ANEXO “C”

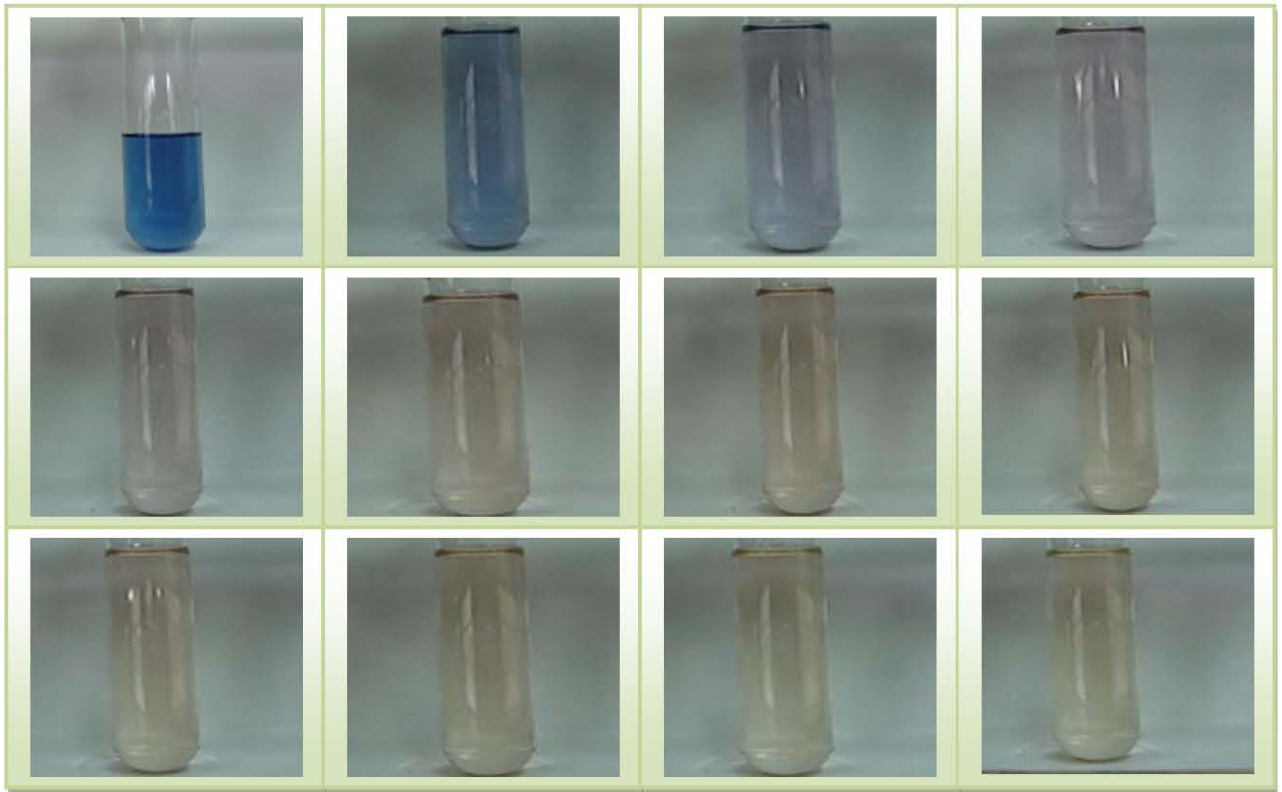
Representación de los resultados obtenidos con el tratamiento con cloro

A continuación se muestra la secuencia de reducción de color mediante el tratamiento con cloro para las concentraciones de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm de colorante. En cada cuadro se toma como referencia el color inicial de cada solución e inmediatamente después de hacer la comparación en cuanto se agrega al medio la solución de cloro.

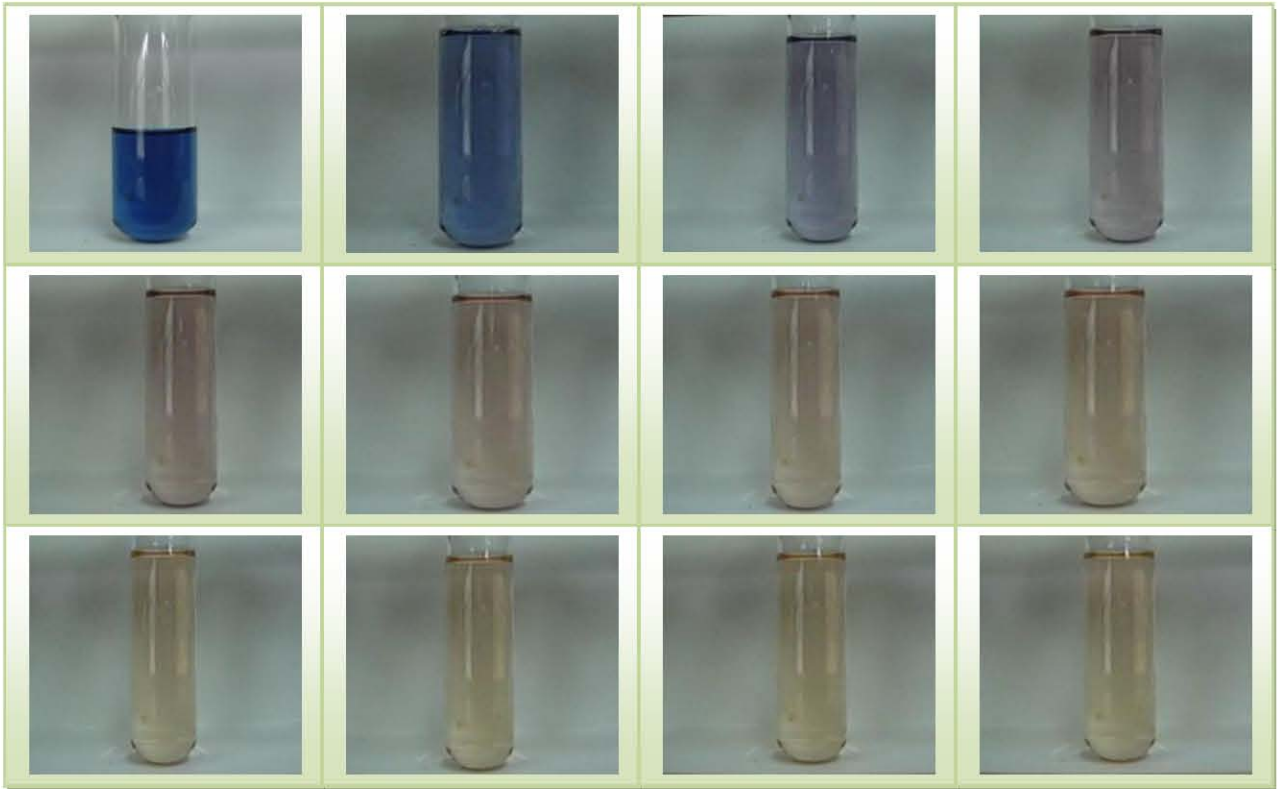
Esquema M: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 10 ppm.



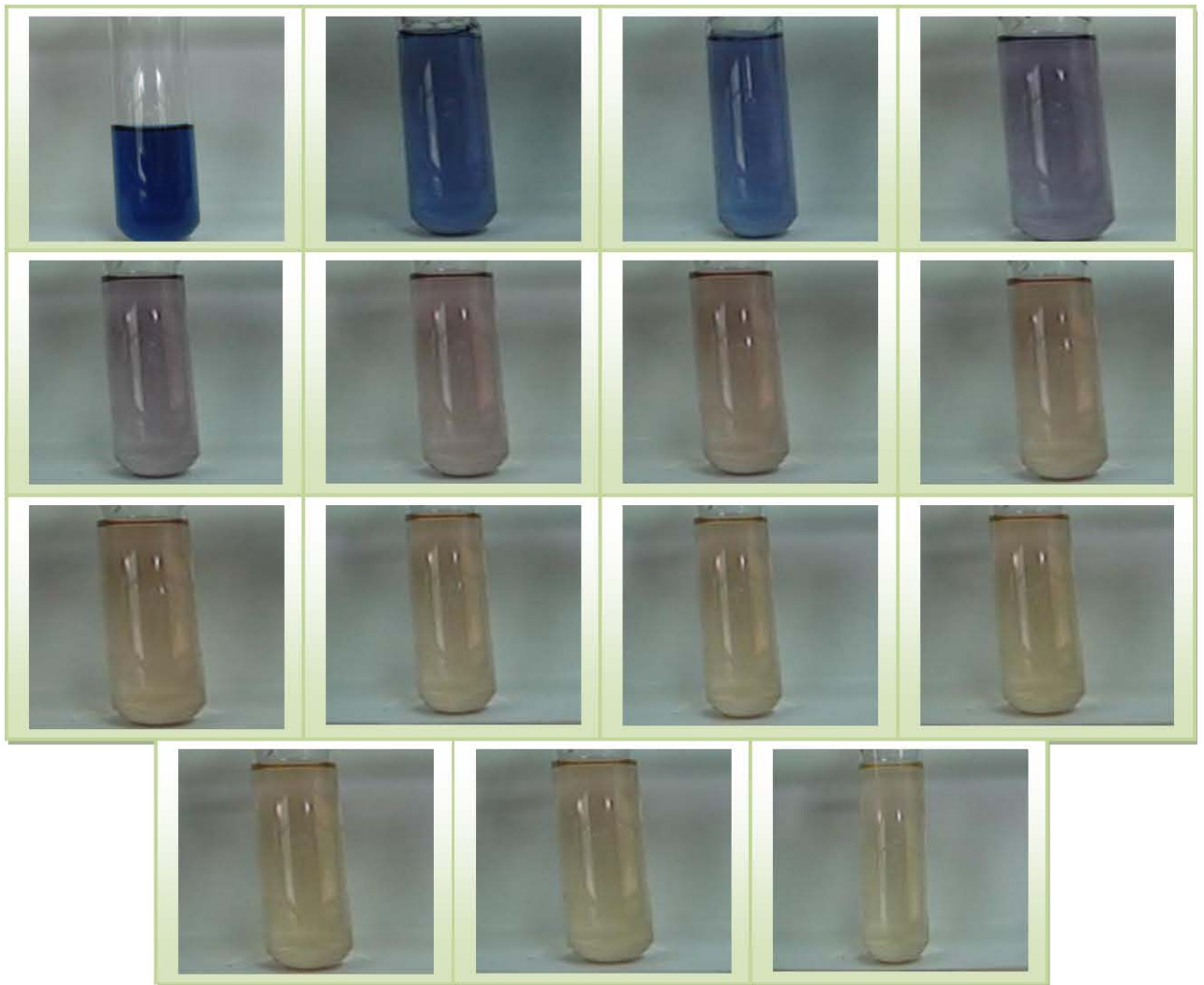
Esquema N: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 20 ppm.



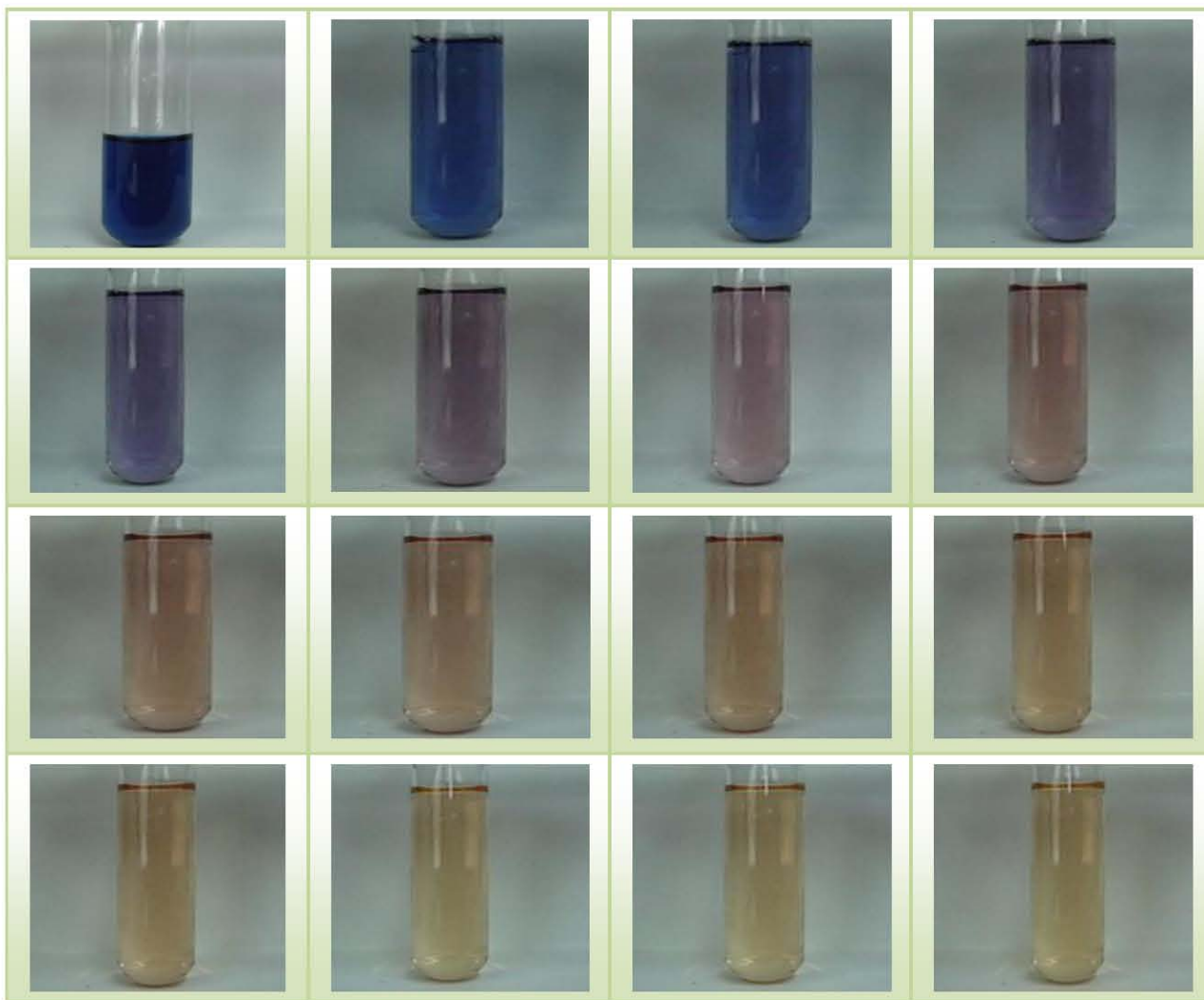
Esquema Ñ: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 30 ppm.



Esquema O: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 40 ppm.



Esquema P: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 50 ppm.



Esquema Q: Representación de la secuencia de degradación de color empleando el tratamiento con cloro para una concentración de colorante de 60 ppm.

