



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES



ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LOS COLORANTES
NEGRO ÁCIDO 52 Y ROJO DISPERSO 82 MEDIANTE EL PROCESO FOTO-
FENTON.

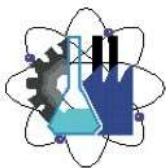
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES

PRESENTA

I.Q. HECTOR ARANDA MAZARI

ASESOR: DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

CUERNAVACA, MORELOS

JUNIO, 2018

Agradecimientos

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

Comité tutorial

Dra. Josefina Vergara Sánchez

Dr. Mario Alfonso Murillo Tovar

Dra. Rosa María Melgoza Alemán

Dr. Álvaro Torres Islas

Dr. Horacio Martínez Valencia



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA
Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES y CACEI
Certificada en la norma ISO 9000:2008

Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables.

Cuernavaca, Morelos, 7 de Mayo del 2018

NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA Y DICTAMEN DE REVISIÓN (T-2)

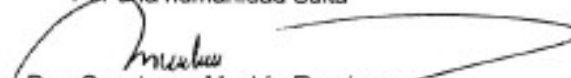
Dra. Josefina Vergara Sánchez
Dr. Mario Alfonso Murillo Tovar
Dra. Rosa María Melgoza Alemán
Dr. Álvaro Torres Islas
Dr. Horacio Martínez Valencia

PRESENTE.

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el **I.Q. Aranda Mazari Héctor**, titulada: **"Estudio de la Cinética de degradación de los colorantes negro ácido 52 y rojo disperso 82 mediante el proceso Foto-Fenton"** realizada bajo la dirección de la **Dra. Josefina Vergara Sánchez** en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE

"Por una humanidad culta"



Dra. Constanza Machin Ramirez
Coordinadora de la MIATS.

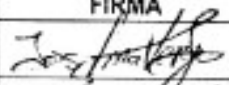
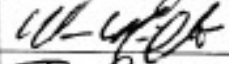


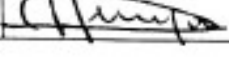
Dra. Constanza Machin Ramirez.

Coordinadora de la MIATS.

PRESENTE.

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dra. Josefina Vergara Sánchez	Aprobatorio	
Dr. Mario Alfonso Murillo Tovar	Aprobatorio	
Dra. Rosa María Melgoza Alemán	Aprobatorio	
Dr. Álvaro Torres Islas	Aprobatorio	
Dr. Horacio Martínez Valencia	Aprobatorio	

c.c.o Archiv

Agradecimientos

Agradezco a la FCQEI por aceptarme en su plantel para la realización de mi maestría, y con ello darme la posibilidad de seguir preparándome como profesionista.

Agradezco a la Dra. Josefina Vergara Sánchez por su apoyo incondicional al permitirme realizar este proyecto de tesis bajo su dirección, y brindarme la confianza en los momentos difíciles que pasé durante el transcurso de la maestría por situaciones ajenas a esta.

Agradezco infinitamente al Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña, por permitirme el uso de su espacio de trabajo para la realización de mis experimentos, por los consejos para mi trabajo, por sus conocimientos compartidos, pero en especial por la gran calidez humana que me mostró durante toda la maestría.

Agradezco también a todos los integrantes de mi comité tutorial por brindarme de su tiempo y conocimientos para la mejora de mi proyecto.

Muchas gracias a todos aquellos profesores que me dieron su confianza, apoyo y dedicación de su tiempo, por ayudarme a desarrollar mis fortalezas y superar mis debilidades. Por haber compartido conmigo sus conocimientos y sobre todo su amistad.

A mis amigos Roberto, Jorge e Ivan por haberme acompañado y guiado a lo largo de este proyecto, por brindarme incondicionalmente su apoyo en las buenas y en las malas, regalarme su sinceridad ante todo y darme la oportunidad de continuar junto a ustedes como si yo fuera parte de su familia. Los quiero muchachos gracias por enseñarme a no ver el mundo tal y como es, si no a verlo tal y como podría ser.

Agradezco a mi hermano Jese, quien a pesar de las dificultades que hemos pasado, ha logrado influenciar mi vida de forma que me motiva a prepararme lo mejor posible para tener una mejor calidad de vida juntos si así lo deseas caminaremos tan fuerte que nuestras huellas no podrán ser borradas.

No existen palabras suficientes para decir que tan agradecido estoy con ustedes abuelos. Ofelia Sámano y Federico Mazari espero jamás traicionar los valores que me han transmitido con tanto amor y esmero. Espero de todo corazón poder cumplir todas sus expectativas. Muchas gracias por todo lo que me han enseñado de verdad GRACIAS.

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	VIII
INDICE DE FIGURAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XV
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO 1.....	6
1.1 ANTECEDENTES.....	6
1.1.2 Factores que influyen en la velocidad de reacción	7
1.1.3 Factores que influyen en el Proceso Foto-Fenton.....	8
1.1.3.1 Efectos de la concentración de peróxido de hidrogeno en el proceso Foto-Fenton	8
1.1.3.2 Efectos del pH en el proceso Foto-Fenton	9
1.1.3.3 Efectos de la concentración inicial del colorante	10
1.1.3.4 Efectos de la radiación de luz en el proceso Foto-Fenton.....	10
1.1.3.5 Efectos de la acción del catalizador en el proceso Foto-Fenton	11
1.1.3.6 Efecto de la temperatura en la velocidad de reacción en el proceso Foto-Fenton	12
1.1.3.7 Efecto del tiempo en la velocidad de reacción en el proceso Foto-Fenton	13
1.2. MARCO TEÓRICO	13
1.2.1 La industria textil en México	13
1.2.2 Clasificación de los colorantes en la Industria Textil	15
1.2.2.1 Tinturas Básicas o Catiónicas.....	17
1.2.2.2 Colorantes Ácidos o Aniónicos	18
1.2.2.3 Colorantes con Mordiente.....	18
1.2.2.4 Tintes de Metal Complejo	18
1.2.2.5 Colorantes Directos	19
1.2.2.6 Colorantes Tina.....	19
1.2.2.7 Colorantes o Tintes del Sulfuro	19
1.2.2.8 Colorantes de Naftol.....	20
1.2.2.9 Colorantes Reactivos	21
1.2.2.10 Colorantes de Dispersión.....	22
1.2.3 Impactos Ambientales de los Colorantes	23

1.2.3.1 Efectos ecológicos	26
1.2.3.2 Efectos toxicológicos	26
1.2.4 Características de las aguas residuales de la industria textil	27
1.2.5 Regulación de descargas de aguas residuales de la industria textil	29
1.2.6 Colorantes del tipo azo.....	30
1.2.6.1 Clasificación de los colorantes azo	31
1.2.6.2 Características de los colorantes azo.....	32
1.2.7 Tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil	33
1.2.8 Procesos de Oxidación avanzada.....	38
1.2.8.1 Reactivo de Fenton.....	39
1.2.8.2 Reactivo Foto-Fenton	40
1.2.8.3 Ozonización	41
1.2.8.4 Oxidación fotoquímica	41
1.2.8.5 Oxidación electroquímica.....	41
1.2.8.6 Otros procesos químicos	42
CAPÍTULO 2.....	43
2.1 JUSTIFICACIÓN.....	43
2.2. OBJETIVOS	44
2.2.1 GENERAL.....	44
2.2.3 ESPECÍFICOS.....	44
CAPÍTULO 3.....	45
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	45
3.2. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL	47
3.3 MATERIAL Y MÉTODOS.....	48
3.3.1 Pruebas de control para la degradación de los colorantes NA52 y RD82	49
3.3.2 Valoración del H ₂ O ₂	49
3.3.3 Cálculo estequimétrico de la degradación del colorante rojo disperso 82.....	54
3.3.4 Cálculo estequimétrico de la degradación del colorante negro ácido 52.....	55
3.3.5 Curva de calibración del rojo disperso 82	56
3.3.6 Curvas de calibración del negro ácido 52.....	58

3.3.7 Descripción de las ecuaciones para el cálculo de DTO, DQO _t y COT _t	62
3.3.8 Calculo de la estequiometria para el DQO _t para los colorantes NA52 y RD82.....	64
3.3.9 Preparación de soluciones.....	65
3.3.9.1 Preparación de la solución del colorante Rojo disperso 82	65
3.3.9.2 Preparación de la solución del colorante Negro ácido 52.....	65
3.3.9.3 Agua destilada a pH~3	65
3.3.9.4 Solución de sulfato de fierro como catalizador (solución madre).....	66
3.3.9.5 Solución de peróxido de hidrógeno a concentración 2.2 M	66
3.3.9.6 Curvas de calibración para los colorantes rojo disperso 82 y negro ácido 52	66
3.3.10 Pruebas con diversas lámparas de luz: Uv, lámpara de luz blanca y luz led	68
3.3.11 Determinación de la concentración del colorante, DTO, DQO _t y COT _t del colorante NA52	69
CAPÍTULO 4.....	70
4.1 RESULTADOS.....	70
4.1.1 Pruebas control para el colorante textil negro ácido 52	70
4.1.2 Pruebas control para el colorante textil rojo directo 82	75
4.1.3 Graficas de concentración, remoción de colorante y ecuaciones cinéticas NA52.....	80
4.1.4 Graficas de concentración, remoción de colorante y ecuaciones cinéticas RD82	86
4.1.5 Determinación de la concentración del colorante, DTO, DQO _t y COT _t del colorante RD82.....	92
4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	93
4.2.1 Discusión de resultados NA52	93
4.2.2 Discusión de resultados RD82	97
CAPÍTULO 5.....	101
5.1 CONCLUSIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA	102
Anexo A Evaluación de diversos fotocatalizadores para el proceso Foto-Fenton.	107
Anexo B Pruebas de control para los colorantes NA52 y RD82	109
Anexo C Absorbancias obtenidas de la degradación del colorante textil NA52	114
Anexo D Absorbancias obtenidas de la degradación del colorante textil RD82	133
Anexo E Tablas de Concentración, DQO _t y COT _t para NA52.....	139
Anexo F Tablas de Concentración, DQO _t y COT _t para RD82	151

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Aplicación de diferentes tipos de tinturas aplicadas a varios tipos de telas	17
Tabla 2 Aminas carcinogénicas (Número CAS) (Basado en las normas internacionales)	21
Tabla 3 Tintes que general daños a la salud	23
Tabla 4 Porcentaje de fijación de color según el proceso de teñido y el tipo de colorante	24
Tabla 5 Carga contaminante que aportan los colorantes	28
Tabla 6 Procesos físicos empleados en el tratamiento de efluentes de la industria textil	35
Tabla 7 Procesos biológicos convencionales empleados en el tratamiento de efluentes textiles	36
Tabla 8 Diseño de experimento de 3 factores (3 Niveles H ₂ O ₂ ; 3 Niveles pH; 2 Niveles FeSO ₄).....	46
Tabla 9 Diseño de experimento de 2 factores (3 Niveles H ₂ O ₂ ; 2 Niveles FeSO ₄).....	46
Tabla 10 Reactivos químicos utilizados en el proceso Fenton y Foto-Fenton	48
Tabla 11 Equipos utilizados en laboratorio para la degradación del NA52 y RD82.....	48
Tabla 12 Absorbancias obtenidas del colorante RD82 a 0.1 mM	57
Tabla 13 Absorbancias obtenidas del colorante NA52 a 1 mM	59
Tabla 14 Absorbancias obtenidas del colorante NA52 a 0.1 mM	59
Tabla 15 Volúmenes utilizados para la curva de calibración para el RD 82 a partir (0.1 mM) y 25 mL.....	66
Tabla 16 Volúmenes utilizados para la curva de calibración para el NA 52 a partir (1 mM) y 25 mL.....	67
Tabla 17 Promedios de las absorbancias a diferentes condicione de operación NA52	93
Tabla 18 Condiciones de operación a pH 3 para NA52	94
Tabla 19 Promedios de las absorbancias a diferentes condiciones de operación RD82.....	97
Tabla 20 Condiciones de operación a pH 3 para RD82	97
Tabla A1 Pruebas con diversas lámparas de luz: UV, lámpara de luz blanca y luz led.....	107
Tabla B1 Estabilidad del colorante NA52 en solución.....	109
Tabla B2 Colorante NA52 más lámpara de luz Uv	109
Tabla B3 Colorante NA52 más agitación.....	110
Tabla B4 Colorante NA52, lámpara de luz Uv mas agitación	110
Tabla B5 Colorante NA52, lámpara de luz Uv, agitación más FeSO ₄	111
Tabla B6 Estabilidad del colorante RD82 en solución.....	111
Tabla B7 Colorante RD82 más lámpara de luz Uv	112
Tabla B8 Colorante RD82 más agitación.....	112
Tabla B9 Colorante RD82, lámpara de luz Uv mas agitación.....	113
Tabla B10 Colorante RD82, lámpara de luz Uv, agitación más FeSO ₄	113
Tabla C1 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	114

Tabla C2 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1	115
Tabla C3 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2	116
Tabla C4 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2	117
Tabla C5 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1	118
Tabla C6 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 2:1	119
Tabla C7 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	120
Tabla C8 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1	121
Tabla C9 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2	122
Tabla C10 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2	123
Tabla C11 Absorbancias de NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1	124
Tabla C12 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 2:1	125
Tabla C13 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	126
Tabla C14 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1	127
Tabla C15 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2	128
Tabla C16 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2	129
Tabla C17 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1	130
Tabla C18 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2	131
Tabla C19 Absorbancias NA52 = 1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	132
Tabla D1 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	133
Tabla D2 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1	134
Tabla D3 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2	135
Tabla D4 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2	136
Tabla D5 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1	137
Tabla D6 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 2:1	138
Tabla E1 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C1	139
Tabla E2 DQOt NA52 ref.: Tabla C1	140
Tabla E3 COTt NA52 ref.: Tabla C1	140
Tabla E4 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C2	141
Tabla E5 DQOt NA52 ref.: Tabla C2	142
Tabla E6 COTt NA52 ref.: Tabla C2	142
Tabla E7 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C3	143
Tabla E8 DQOt NA52 ref.: Tabla C3	144
Tabla E9 COTt NA52 ref.: Tabla C3	144

Tabla E10 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C4.....	145
Tabla E11 DQOt NA52 ref.: Tabla C4.....	146
Tabla E12 COTt NA52 ref.: Tabla C4	146
Tabla E13 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C5.....	147
Tabla E14 DQOt NA52 ref.: Tabla C5.....	148
Tabla E15 COTt NA52 ref.: Tabla C5	148
Tabla E16 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C6.....	149
Tabla E17 DQOt NA52 ref.: Tabla C6.....	150
Tabla E18 COTt NA52 ref.: Tabla C6	150
Tabla F1 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D1	151
Tabla F2 DQOt RD82 ref.: Tabla D1	152
Tabla F3 COTt RD82 ref.: Tabla D1.....	152
Tabla F4 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D2.....	153
Tabla F5 DQOt RD82 ref.: Tabla D2	154
Tabla F6 COTt RD82 ref.: Tabla D2.....	154
Tabla F7 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D3	155
Tabla F8 DQOt RD82 ref.: Tabla D3	156
Tabla F9 COTt RD82 ref.: Tabla D3.....	156
Tabla F10 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D4	157
Tabla F11 DQOt RD82 ref.: Tabla D4.....	158
Tabla F12 COTt RD82 ref.: Tabla D4.....	158
Tabla F13 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D5	159
Tabla F14 DQOt RD82 ref.: Tabla D5	160
Tabla F15 COTt RD82 ref.: Tabla D5.....	160
Tabla F16 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D6	161
Tabla F17 DQOt RD82 ref.: Tabla D6.....	162
Tabla F18 COTt RD82 ref.: Tabla D6.....	162

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de Pourbaix del hierro	9
Figura 2 Mecanismo de reacción Foto-Fenton en la generación de radicales hidroxilos.	10
Figura 3 Estructuras químicas con representación de grupos cromóforos y auxocromóforos	16
Figura 4 Metodología utilizada para la valoración de H ₂ O ₂	50
Figura 5 Compendio de imágenes de la preparación de la solución de KMnO ₄	53
Figura 6 Curva de calibración del colorante RD82 a una longitud de onda de 595 nm.a 0.1 mM.....	57
Figura 7 Curva de calibración del colorante NA52 a una longitud de onda de 577 nm a 1 mM.	60
Figura 8 Curva de calibración del colorante NA52 a una longitud de onda de 577 nm a 0.1 mM	61
Figura 9 Soluciones utilizadas en la curva de calibración del RD 82.....	67
Figura 10 Soluciones utilizadas en la curva de calibración del NA 52	67
Figura 11 Diversas lámparas utilizadas para la evaluación del foto-reactor.....	68
Figura 12 Gráficos de la estabilidad del colorante NA52 en solución.	70
Figura 13 Gráficos del colorante NA52 más lámpara de luz Uv.....	71
Figura 14 Gráficos del colorante NA52 más agitación	72
Figura 15 Gráficos del colorante NA52, lámpara de luz Uv mas agitación	73
Figura 16 Gráficos del colorante NA52, lámpara de luz Uv, agitación más FeSO ₄	74
Figura 17 Gráficos de la estabilidad del colorante RD82 en solución.....	75
Figura 18 Gráficos del colorante RD82 más lámpara de luz Uv.....	76
Figura 19 Gráficos del colorante RD82 más agitación.....	77
Figura 20 Gráficos del colorante RD82, lámpara de luz Uv mas agitación	78
Figura 21 Gráficos del colorante RD82, lámpara de luz Uv, agitación más FeSO ₄	79
Figura 22 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla E1	80
Figura 23 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E1	80
Figura 24 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E1	80
Figura 25 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla E4	81
Figura 26 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E4.....	81
Figura 27 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E4.....	81
Figura 28 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla E7	82
Figura 29 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E7.....	82
Figura 30 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E7.....	82
Figura 31 Ecuación cinética del NA52 ref.: Tabla E10.....	83
Figura 32 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E10.....	83

Figura 33 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla E10	83
Figura 34 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E13	84
Figura 35 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E13	84
Figura 36 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E13	84
Figura 37 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E16	85
Figura 38 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E16	85
Figura 39 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E16	85
Figura 40 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F1	86
Figura 41 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F1	86
Figura 42 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F1	86
Figura 43 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F4	87
Figura 44 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F4	87
Figura 45 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F4	87
Figura 46 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F7	88
Figura 47 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F7	88
Figura 48 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F7	88
Figura 49 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F10	89
Figura 50 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F10	89
Figura 51 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F10	89
Figura 52 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F13	90
Figura 53 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F13	90
Figura 54 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F13	90
Figura 55 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F16	91
Figura 56 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F16	91
Figura 57 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F16	91
Figura 58 Promedios de las absorbancias a diferentes condiciones de operación NA52	94
Figura 59 Compilación de graficas de remoción de color NA52	95
Figura 60 Concentración de colorante de tratamiento con NA52, usando 1 mM de FeSO ₄ (Gómez, et al., 2017)	96
Figura 61 Promedios de las absorbancias a diferentes condiciones de operación RD82	98
Figura 62 Compilación de graficas de remoción de color NA52	99
Figura 63 Reactor conteniendo el colorante NA52 antes y después del proceso	100
Figura 64 Reactor conteniendo el colorante RD82 antes y después del proceso	100
Figura A1 Pruebas con diversas lámparas de luz : UV, lámpara de luz blanca y luz led	108

Figura C1 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	114
Figura C2 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1	115
Figura C3 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2	116
Figura C4 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2	117
Figura C5 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1	118
Figura C6 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 2:1	119
Figura C7 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	120
Figura C8 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1	121
Figura C9 Absorbancias de NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2	122
Figura C10 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2	123
Figura C11 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1	124
Figura C12 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 2:1	125
Figura C13 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	126
Figura C14 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1	127
Figura C15 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2	128
Figura C16 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2	129
Figura C17 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1	130
Figura C18 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 2:1	131
Figura C19 Absorbancias NA52 = 1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	132
Figura D1 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1	133
Figura D2 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1	134
Figura D3 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2	135
Figura D4 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2	136
Figura D5 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1	137
Figura D6 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1	138
Figura E1 DQOt NA52 ref.: Tabla E2	139
Figura E2 COTt NA52 ref.: Tabla E3	139
Figura E3 DQOt NA52 ref.: Tabla E5	141
Figura E4 COTt NA52 ref.: Tabla E6	141
Figura E5 DQOt NA52 ref.: Tabla E8	143
Figura E6 COTt NA52 ref.: Tabla E9	143
Figura E7 DQOt NA52 ref.: Tabla E11	145
Figura E8 COTt NA52 ref.: Tabla E12	145

Figura E9 DQOt NA52 ref.: Tabla E14.....	147
Figura E10 COTt NA52 ref.: Tabla E15	147
Figura E11 DQOt NA52 ref.: Tabla E17.....	149
Figura E12 COTt NA52 ref.: Tabla E18	149
Figura F1 DQOt RD82 ref.: Tabla F2	151
Figura F2 COTt RD82 ref.: Tabla F3	151
Figura F3 DQOt RD82 ref.: Tabla F5	153
Figura F4 COTt RD82 ref.: Tabla F6.....	153
Figura F5 DQOt RD82 ref.: Tabla F8	155
Figura F6 COTt RD82 ref.: Tabla F9	155
Figura F7 DQOt RD82 ref.: Tabla F11	157
Figura F8 COTt RD82 ref.: Tabla F12.....	157
Figura F9 DQOt RD82 ref.: Tabla F14	159
Figura F10 COTt RD82 ref.: Tabla F15.....	159
Figura F11 DQOt RD82 ref.: Tabla F17	161
Figura F12 COTt RD82 ref.: Tabla F18.....	161

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Factor pre-exponencial o factor de frecuencia		EDTA	Ácido Etilendiaminotetraacético
Abs	Absorbancia		EPA	Siglas en inglés para "Agencia de Protección Ambiental"
ADMI	Siglas en inglés para "Instituto fabricante de colorantes de América"		eq.g.	Equivalentes gramos
AOX	Haluros Orgánicos Absorbibles		Fd	Factor de dilución
APHA	Siglas en inglés para "Asociación Americana de Salud Pública"		Fe ²⁺	Ion Ferroso
As ₂ O ₃	Trióxido de arsénico		Fe ³⁺	Ion Férrico
CAS	Identificación numérica única para compuestos químicos		FeSO ₄	Sulfato de hierro (II)
Cl ⁻	Ion cloruro		FeSO ₄ •7H ₂ O	Sulfato de hierro (II) heptahidratado
CN ⁻	Ion cianuro		g/mol	Gramos por mol
CO ₂	Dióxido de carbono		GB	Siglas en Chino para "Estándares Nacionales Obligatorios"
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua		H ₂ C ₂ O ₄	Ácido oxálico
Conc.	Concentración		H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrógeno
COT	Carbono Orgánico Total		H ₂ SO ₃	Ácido sulfuroso
COT _t	Carbono Orgánico Total Teórico		H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno		HNO ₃	Ácido nítrico
DIN	Siglas en alemán para "Instituto Alemán de Normalización"		INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
DQO	Demanda Química de Oxígeno		ISO	Siglas en inglés para "Organización internacional para la estandarización"
DQO _t	Demanda Química de Oxígeno Teórica		IUPAC	Siglas en inglés para "Unión internacional de Química Pura Aplicada"
DTO	Demanda Teórica de Oxígeno		k	Constante cinética
e ⁻	Electrón		K ₂ SO ₄	Sulfato de potasio
Ea	Energía de activación		KMnO ₄	Permanganato de potasio

KOH	Hidróxido de potasio		O ₃	Ozono
Kow	Coefficiente de partición octanol / agua		OH •	Radical Hidroxilo
Kps	Producto de solubilidad		P.M.	Peso Molecular
m/m	Porcentaje masa en masa		PAOs	Procesos Avanzados de Oxidación
M/s	Concentración molar por segundo		pH	Potencial de Hidrógeno
m ³ /s	Metro cúbico por segundo		POAs	Procesos de Oxidación avanzada
MEP	Siglas en inglés para “Ministerio de Protección del Medio Ambiente”		ppm	Partes por millón
meq	Miliequivalentes		Pt-Co	Platino-Cobalto
mg	Miligramo		R	Constante universal de los gases
mg/L	Miligramos por litro		RCOT _t	Remoción del Carbono Orgánico Total Teórico
mM	Milimolar		RD82	Rojo disperso 82
mmHg	Milímetro de mercurio		RDQO _t	Remoción de la Demanda Química de Oxígeno Teórica
MnO ₂	Óxido de manganeso (IV)		RE	Relación Estequiometrica
Na ₂ C ₂ O ₄	Oxalato de sodio		RIL	Residuos industriales líquidos
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sodio		SAC	Siglas en inglés para "Coeficientes de Absorción Espectral"
NA52	Negro acido 52		SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
NaClO	Hipoclorito de sodio		SO ₃	Trióxido de azufre
NaHSO ₄	Bisulfato de sodio		T	Temperatura
NCASI	Siglas en inglés para “Consejo Nacional para la Mejora del Aire y la Corriente”		t/año	Tonelada por año
nm	Nanómetro		TDA	2,4-toluendiamina
NO ₂	Dióxido de nitrógeno		TiO ₂	Óxido de titanio (IV)
NOM	Norma Oficial Mexicana		TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
O ₂ /L	Oxígeno por litro		UV	Luz ultravioleta

RESUMEN

Los colorantes textiles, negro ácido 52 (NA52) y rojo disperso 82 (RD82), son compuestos azoderivados, es decir que contienen en su estructura el enlace $-N=N-$. Estos compuestos, debido a su facilidad de síntesis y a su variabilidad, se caracterizan por ser los más importantes, perteneciendo a este grupo casi la mitad de los colorantes sintéticos existentes.

Los colorantes textiles producen un gran impacto ambiental, ya que generan grandes volúmenes de agua contaminada, la cual posee efectos nocivos para el medio ambiente y la vida en general.

Debido a su procedencia sintética, los efluentes generados, poseen características que dificultan su tratamiento por métodos de tratamiento de agua convencionales, por lo que su eliminación en el agua, requiere de procesos químicos con alto poder degradante, tales como lo son los procesos avanzados de oxidación.

Para tratar estos colorantes, se utilizó el proceso Foto-Fenton y para esto, se usó un reactor de tubos concéntricos, el cual poseía una lámpara comercial de luz Uv en su interior. Para la degradación de éstos colorantes, se plantearon dos diseños de experimentos; Se optó por realizar un diseño de ~~experimentos~~ ~~de~~ 3 factores con diferentes niveles: (3 Niveles H_2O_2 ; 3 Niveles pH; 2 Niveles $FeSO_4$) para la degradación del colorante NA52 y para el colorante RD82 un diseño de 2 factores con diferentes niveles: (3 Niveles H_2O_2 ; 2 Niveles $FeSO_4$). Hasta obtener condiciones de operación óptimas.

En los resultados se observó que para ambos colorantes, las mejores condiciones de operación fueron: (colorante NA52 pH = 3, 0.5 mM de $FeSO_4$ RE=2:1; RE=1:1; RE=1:2 y el colorante RD82 pH = 3, 0.5 mM de $FeSO_4$ RE=2:1) se obtuvieron porcentajes de remoción mayores a 97% en ambos casos.

ABSTRACT

The textile colorants, acid black 52 and dispersed red 82, are azoderived compounds, that is to say; that contain in their structure the link $-N = N-$. These compounds, due to their ease of synthesis and their variability, are characterized by being the most important, belonging to this group almost half of the existing synthetic dyes.

Textile colorants produce a great environmental impact, since these colorants generate large volumes of contaminated water, which has harmful effects on the environment and life in general.

Due to its synthetic origin, the effluents generated possess characteristics that make it difficult to treat them by conventional methods, so their elimination in the water, requires of chemical processes with high degrading power, such as they are the advanced oxidation processes.

To can to treat these colorants, It was utilized the Foto-Fenton process and for it was used a concentric tubes reactor; which had a commercial Uv light lamp inside. To bring about the degradation of these colorants, two designs of experiments were proposed. We choose to perform a design of experiments of 3 factors with different levels: (3 H_2O_2 levels, 3 pH levels, 2 $FeSO_4$ levels) for the degradation of the NA52 colorant and, for the RD82 colorant, a design of 2-factor with different levels: (3 Levels H_2O_2 ; 2 Levels $FeSO_4$). These experimental designs allowed to generate the most optimal operating conditions.

The results show that for both colorants, with the best operating conditions, (dye NA52 pH = 3, 0.5 mM de $FeSO_4$ RE=2:1; RE=1:1; RE=1:2 and dye RD82 pH = 3, 0.5 mM de $FeSO_4$ RE=2:1) removal percentages greater than 97% were obtain.

INTRODUCCIÓN

En México el problema de la contaminación del agua es cada día más alarmante ya que la disponibilidad de este recurso se ve altamente afectado por diversos factores como lo son: el continuo y acelerado crecimiento de la población humana, el desarrollo industrial, agrícola y comercial que demandan cada vez mayor cantidad y calidad del agua, esto ha provocado una sobreexplotación de este recurso y la generación de grandes volúmenes de agua residual, así como su indebido vertido a los cuerpos de agua provoca una mayor cantidad de factores que afectan el ecosistema lo que acrecienta este problema; adicional a esto el manejo inadecuado del agua, así como la falta de conciencia de usuarios en el empleo de este recurso, son factores de impacto que contribuyen a la escasez cada vez más perceptible del agua en nuestro país.

De los factores antes mencionados uno de los que aporta mayor cantidad de agua contaminada con residuos es la industria, el problema que conlleva este tipo de efluentes es que estos generalmente, son contaminados con residuos peligrosos. Un ejemplo de este tipo de industrias es la textil que consume grandes cantidades de agua en el proceso de coloración. Solo para el año 2008 fueron importados 473.76 millones de m³ de agua, observándose un incremento del 220.2% en relación al 2007, con una tendencia al incremento aproximadamente lineal (Comisión Nacional del Agua, 2010). Para aumentar la intensidad de color adherido a las prendas, la industria textil utiliza tintes cada vez más resistentes, los cuales, dependiendo de los procesos usados para su fijación de la coloración entre el 12% y el 30% se va a los efluentes durante estos procesos, lo cual genera elevados volúmenes fuertemente coloreados que deben ser degradados previo a su vertido.

En México hoy en día existe una cobertura limitada de infraestructura de los sistemas de tratamiento, ya que estos presentan deficiencias en la remoción de contaminantes por la mezcla de sustancias tóxicas aportadas por las industrias que limitan los procesos de remoción, y aunado a lo anterior los estándares de calidad del agua impuestos a través de la NOM-001-SEMARNAT-1996 provoca que las descargas de diferentes giros industriales en la mayoría de los casos cumplan con los parámetros y los contaminantes específicos de cada giro no sean tomados en cuenta provocando que la incorporación de sustancias tóxicas deteriore el ambiente acuático y cause la pérdida de flora y fauna, así como los límites de uso del cuerpo receptor (Saldaña, et al., 2001).

A efectos de cumplir con las regulaciones gubernamentales y los requerimientos de todas las marcas de las empresas textiles, los proveedores de productos de cuero y textiles deberían ser capaces de identificar

el impacto potencial negativo que el proceso químico pudiera tener en el medio ambiente, en la salud los trabajadores y en la salud del consumidor.

Resulta una tarea difícil y confusa cuantificar estos impactos especialmente para los proveedores que se ocupan del “acabado” de los productos textiles y del cuero, quienes podrían no recibir una completa información de los químicos por parte de sus proveedores. Es por ello que el adecuado tratamiento de estos efluentes es de vital importancia para el agua y es un factor determinante para el desarrollo tanto económico, político y social del ser humano.

En la actualidad existe un marcado interés para desarrollar procesos para la biodegradación completa de efluentes textiles contaminados por colorantes, más específicamente por colorantes de tipo azo, debido a que hay productos de la reducción anaerobia que son considerados potencialmente carcinógenos o mutagénicos para los humanos y tóxicos para los organismos acuáticos.

La industria textil es la mayor consumidora de colorantes azo. Desde el punto de vista ambiental, los colorantes azo son compuestos orgánicos sintéticos difíciles de biodegradar debido a su alta estabilidad a las condiciones ambientales. Entre la gran variedad que existe de esta clase se destacan los de tipo directo que son muy usados para el teñido de fibras e hilos de algodón pero sobre todo para teñir mezclilla de la cual México produce 10,000 toneladas al año (Supaca, et al., 2004).

Una alternativa para tratar este tipo de efluentes son los Procesos Avanzados de Oxidación, PAOs, fueron definidos por Glaze en 1987 (Glaze, et al., 1987) como aquellos procesos o tratamientos de aguas a presión y temperatura cercanas a las condiciones ambientales, que son capaces de generar radicales hidroxilo en suficiente cantidad como para afectar a la purificación del agua. Se trata, por tanto, de procesos físico-químicos capaces de producir la degradación de las moléculas orgánicas mediante el ataque a enlaces estructurales de compuestos contaminantes. Para que estos cambios se produzcan, es necesaria la generación de especies transitorias de alto poder oxidante, como es el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), los cuales son altamente inestables debido a su elevada reactividad, lo que conlleva su generación “in situ” por medio de distintos procesos.

Las características más relevantes de los PAOs están relacionadas con su enorme potencial para alcanzar elevados grados de mineralización de los contaminantes orgánicos y oxidación de compuestos inorgánicos al tratarse de procesos de oxidación no selectivos, hecho especialmente interesante si se quiere evitar la formación de subproductos más tóxicos que los contaminantes de partida, pues no solamente atacan al contaminante inicial sino también a los subproductos, quienes son degradados hasta una mineralización completa.

Su clasificación se basa principalmente en el procedimiento empleado para la generación de éstos radicales, ya sea por métodos fotoquímicos, inducidos por la luz, o a través de reacciones químicas de óxido/reducción, asistidas externamente mediante otra fuente de energía.

De entre todos los PAOs aquellos que son capaces de aprovechar la radiación solar son de especial interés, ya que se eliminaría la desventaja que tienen estos procesos del consumo de energía mediante lámparas, ya que éstas son sustituidas por el sol (Malato, et al., 2009). Estos procesos son la fotocatalisis (heterogénea) con un catalizador sólido y la fotocatalisis (homogénea) con foto-Fenton.

La intención del trabajo es utilizar el reactivo Foto-Fenton para estudiar la cinética de degradación de los colorantes (negro ácido 52 y rojo disperso 82) y determinar las condiciones de operación óptimas para valorar la viabilidad técnica de su implementación.

CAPÍTULO 1

1.1 ANTECEDENTES

En los últimos años ha existido una grave contaminación del agua disponible debido al excesivo uso de diversos productos químicos como lo son los colorantes. La industria textil tiene en ello una aportación relevante, ya que generan grandes volúmenes de aguas residuales contaminadas con estos productos. A causa de su alto peso molecular, sus estructuras complejas y especialmente a su alta solubilidad en el agua, los colorantes usados por este tipo de industrias muestran gran persistencia en el ambiente (Cañizares, et al., 2009).

Para la industria textil fueron importados en el año 2008, 473.76 millones de m³ de agua, observándose un incremento del 220.2% en relación al 2007, con una tendencia al incremento aproximadamente lineal (Comisión Nacional del Agua, 2010). Esto da una idea clara del volumen de agua utilizado, esta cifra solo es de agua importada al país, mas no del uso de aguas nacionales, el cual debe de sumarse teniendo en cuenta claramente que por cada litro de agua contaminada sin tratar arrojada a un cuerpo receptor de agua (barranco, rio, lago, mar) esta contaminará más agua a su paso.

Por lo anterior, cabe señalar la importancia de tratar los efluentes de la industria textil para la reutilización del agua dentro de la misma industria o fuera de ésta. El reto es eliminar los contaminantes de estos efluentes, de tal manera que no se vea afectado el ambiente, es decir, evitar el uso de agentes que, al tratar de remover un contaminante, genere otro de igual o mayor toxicidad.

En este sentido los tratamientos mediante los Procesos de Oxidación Avanzada de las aguas contaminadas con productos orgánicos tóxicos y/o difícilmente biodegradables se perfila como un método adecuado y con grandes posibilidades de desarrollo a corto plazo. Los PAOs consisten en una oxidación química en condiciones de presión y temperatura ambiente, con la cual se puede llegar hasta la mineralización completa de los contaminantes (Kim & Vogelpohl, 2004).

Estos procesos han sido investigados en numerosas ocasiones dando como resultado diversos trabajos de gran impacto en lo que respecta al tratamiento de aguas industriales. Ya que los procesos de oxidación avanzada se caracterizan por la generación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), especie química que posee una elevada capacidad oxidante, es no selectivo y presenta tiempos de reacción muy cortos (Almecija, et al., 2010).

La versatilidad de estos procesos se debe al hecho de que existen diferentes formas de producir los radicales hidroxilo y con ello escogerse cual utilizar, dependiendo de los requerimientos específicos de

cada agua residual. Entre los métodos más desarrollados e investigados a la fecha están el método de peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) y el método conocido como Foto-Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}/\text{Fe}^{2+}$) (López, 2001).

Con relación a la efectividad del proceso $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, diversos investigadores (Amer, et al., 2008; Caronna, et al., 1999; Kalt & Galindo, 1999) han llegado a la conclusión de que las variables que producen un efecto significativo en el proceso de decoloración y degradación de materia orgánica en el vertido residual de una planta textil son: la concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el pH, la concentración inicial de colorante y la intensidad de la radiación ultravioleta. (Kalt & Galindo, 1999).

Existen además de los factores mencionados anteriormente otros factores que influyen significativamente en el proceso de decoloración y de degradación de materia orgánica de los efluentes textiles, así como en la velocidad de reacción que conlleva el proceso Foto-Fenton los cuales serán descritos a continuación.

1.1.2 Factores que influyen en la velocidad de reacción

La Cinética Química estudia dos aspectos de una reacción química: la velocidad de la reacción que mide la variación de la concentración de reactivos y productos con el tiempo, y el mecanismo de la reacción para pasar de reactivos a productos. La velocidad de una reacción se define como la disminución de la concentración de un reactivo o el aumento de la concentración de un producto con el tiempo. Se expresa en términos de la concentración de uno de los reactivos o productos que intervienen en la reacción, siempre como una magnitud positiva y con unidades de concentración dividido por tiempo (M/s).

Dentro de los factores que alteran la cinética de reacción están:

1. Naturaleza de los reactantes.
2. Concentración.
3. Temperatura.
4. Estado físico en que se encuentran los reactantes.
5. El grado de disgregación, cuando los reactantes son sólidos.
6. La acción de los catalizadores e inhibidores.

En cualquier estudio cinético se determina la concentración de alguna de las especies que intervienen en la reacción en un determinado momento a una temperatura fija. Se determina la cantidad de reactivo que

queda o de producto que se forma cuando ha transcurrido cierto tiempo. Conociendo las cantidades iniciales de reactivos se calcula la variación de la concentración con el tiempo.

Existen dos tipos de métodos experimentales para determinar las concentraciones, conocidos como método químico y método físico:

- ✓ En el método químico se retira una parte del sistema en reacción a intervalos fijos de tiempo, para efectuar un análisis y determinar la cantidad de reactivo o de producto, con lo cual se calcula la velocidad de reacción.
- ✓ En el método físico se mide algunas propiedades físicas de algunas especies de la reacción que es proporcional a su concentración, como por ejemplo la emisión o absorción de luz, la presión de los gases, la conductividad de las disoluciones entre otros.

Los métodos físicos son preferibles a los químicos porque éstos necesitan modificar o parar el sistema de reacción.

1.1.3 Factores que influyen en el Proceso Foto-Fenton

De los factores antes mencionados en la sección 1.1 y 1.1.2 los que se describirán a continuación son los de mayor importancia dentro del proceso Foto-Fenton. Estos factores son:

- I. Concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2)
- II. pH
- III. Concentración inicial del colorante
- IV. Intensidad de la radiación ultravioleta
- V. Acción del catalizador
- VI. Temperatura
- VII. Tiempo de reacción

1.1.3.1 Efectos de la concentración de peróxido de hidrogeno en el proceso Foto-Fenton

La eficiencia de la decoloración aumenta al incrementarse la dosis de peróxido de hidrógeno hasta un punto en el que alcanza un valor máximo y luego empieza a disminuir. Por ejemplo, en un estudio realizado por Amer, et al., (2008) utilizando el método H_2O_2/UV para el tratamiento de agua residual textil, se determinó que el valor máximo de porcentaje de decoloración obtenido fue de 90.69% con una concentración de 3.9% m/m de H_2O_2 , mientras que por encima de esta dosis (4.8% m/m) este porcentaje

se redujo a un 82.3%. Este comportamiento se debe a que cuando existe una concentración alta de H_2O_2 , ésta actúa como un secuestrador de radicales $\bullet\text{OH}$ mientras que a bajas concentraciones de H_2O_2 no se generan los suficientes radicales hidroxilo, que van a ser consumidos por el colorante y consecuentemente baja la tasa de reacción de oxidación. (Al-Kdasi, et al., 2004).

1.1.3.2 Efectos del pH en el proceso Foto-Fenton

El pH es una de las variables más significativas en el proceso Fenton. Estudios sobre el reactivo Fenton han demostrado que sólo es efectivo para un rango de pH que oscila entre 2.5-4; si bien algunos autores (Durán Moreno, et al., 2011; Pignatello J. J., 2006) fijan este valor a 2.8, siendo este pH el óptimo para la formación de radicales $\bullet\text{OH}$ a partir de la descomposición del H_2O_2 en presencia de Fe^{2+} . Condiciones de pH muy ácidas o muy alcalinas dan lugar a un descenso en la velocidad de degradación de los contaminantes. Un aumento del pH conduce a la precipitación del hierro como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, impidiendo que se lleve a cabo la reacción y, por tanto, la regeneración de Fe^{2+} . Por otro lado, a pH excesivamente ácido se forma $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, el cual reacciona lentamente con el H_2O_2 , ralentizando la generación de radicales $\bullet\text{OH}$ (Pignatello J. J., 2006). A su vez, bajo estas condiciones de acidez, la regeneración del catalizador a partir de H_2O_2 se ve inhibida, ya que a un bajo pH el H_2O_2 se estabiliza en forma de iones oxonio (H_3O_2^+) Malíková, et al., (2009); Pignatello J. J., (2006); Ghosh, et al., (2010) estudiaron el efecto del pH en el tratamiento de un efluente con 11.500 mg/L de DQO bajo condiciones óptimas de temperatura (30 °C), H_2O_2 (3M), Fe^{2+} (0.06 M) y para un tiempo de reacción de 100 min. Los resultados muestran una conversión de DQO de ~ 85, 97.5 y 65% a pH 2, 3 y 5, respectivamente. En la figura 1 se muestra un diagrama de Pourbaix del hierro el cual describe el equilibrio estable en las fases a un pH dado, los límites de iones predominantes son representados por líneas.

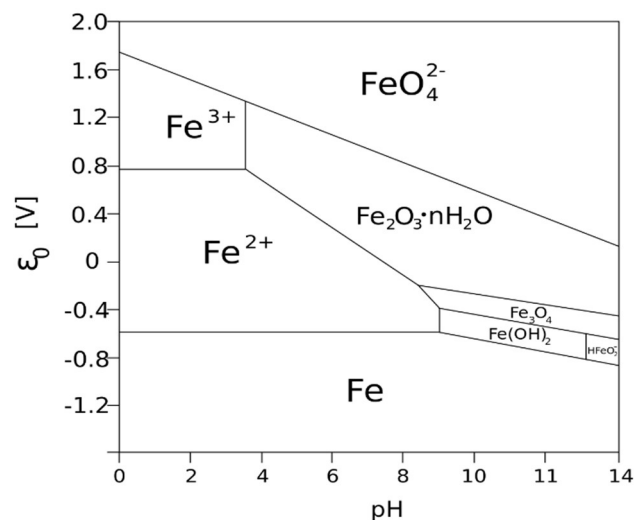


Figura 1 Diagrama de Pourbaix del hierro

En este diagrama podemos ver que el ion Fe^{3+} (ion de interés para este trabajo, ya que este será utilizado como el catalizador) se encuentra disponible en un intervalo de pH 0 hasta un pH 4 fuera de este rango tenemos especies que no interactúan de manera adecuada con nuestro agente oxidante (H_2O_2) tal y como se mencionó anteriormente al inicio de esta sección.

1.1.3.3 Efectos de la concentración inicial del colorante

La eficiencia de este proceso está relacionada con la naturaleza del contaminante a degradar y con la presencia de otros compuestos orgánicos e inorgánicos. (Pignatello J. J., 2006; Kavitha & Palanivelu, 2004).

1.1.3.4 Efectos de la radiación de luz en el proceso Foto-Fenton

La presencia de una fuente de luz acelera la degradación de contaminantes. El proceso recibe el nombre de Foto-Fenton (Pignatello J. J., 2006; Parag R.G, 2004; Neyens & Baeyens, 2003); (reacciones 1.1 y 1.2), y en este caso el reciclaje de Fe(III) es posible a través de un proceso foto-reductor (Amigó, et al., 2008; Sarria & Pullgarin, 2004) (Figura 2):

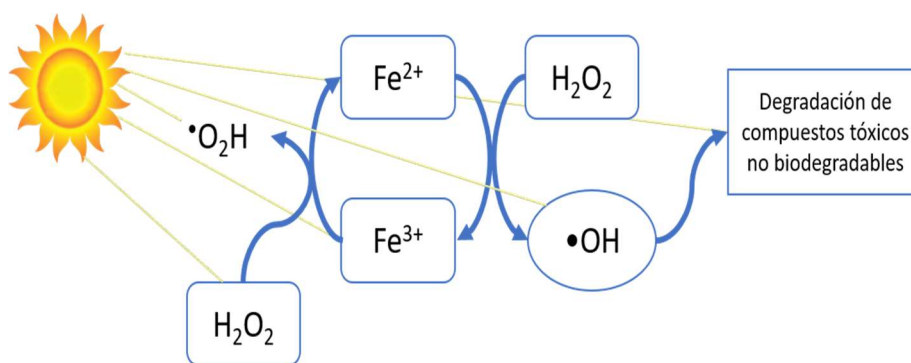
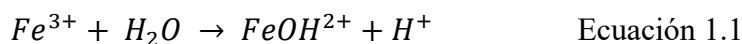


Figura 2 Mecanismo de reacción Foto-Fenton en la generación de radicales hidroxilos.

El método H_2O_2/UV que es el método el cual se utilizara para este trabajo implica la formación de radicales hidroxilos mediante la fotólisis del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) por la acción de la radiación

ultravioleta. Las longitudes de onda UV en el rango de 200 - 280 nm conducen a la disociación del peróxido de hidrógeno, siendo las lámparas de mercurio con emisión de 254 nm las más utilizadas (Aleboyeh, et al., 2003).

Paralelamente, la irradiación de Fe(III) con H₂O₂ da lugar a la formación de intermedios de hierro con alto estado de oxidación, responsables del ataque directo a la materia orgánica. La absorción de luz visible del complejo formado entre Fe(III) y el peróxido parece ser la causa de la formación de tales oxidantes. Aparece, por tanto, una vía alternativa de oxidación de contaminantes al margen del radical hidroxilo (Parag R.G, 2004; Vogelpohl & Kim, 2004; Neyens & Baeyens, 2003).

1.1.3.5 Efectos de la acción del catalizador en el proceso Foto-Fenton

Un catalizador es una sustancia que modifica la velocidad de una reacción química, permitiendo que ésta transcurra a mayor velocidad.

Los catalizadores no modifican el estado de equilibrio de un sistema químico, esto es, su constante de equilibrio. Participan activamente en la reacción, pero no se consumen, ya que se regeneran en el transcurso de la misma y, por tanto, no aparecen en la ecuación química ajustada.

La catálisis puede ser de dos tipos:

- Heterogénea, si el catalizador se encuentra en distinta fase que los reactivos. Normalmente, el catalizador heterogéneo es un sólido a través del cual se hace pasar una mezcla de gases, que son los reactivos.

Los catalizadores heterogéneos suelen ser metales finamente divididos y también óxidos metálicos dispersos en un soporte inerte, ya que de esta manera se incrementa la superficie activa, que es donde se produce la reacción.

- Homogénea, cuando el catalizador está en la misma fase que los reactivos.

Hace más de un siglo, H. J. Fenton describió el poder de oxidación del peróxido de hidrógeno en ciertas moléculas orgánicas, bajo la adición de Fe (II) como catalizador (Domènech, et al., 2002). Más tarde, se descubrió que esto se debe a la generación de radicales hidroxilos.

Debido a la simplicidad de la reacción anterior, la reacción de Fenton es el proceso que más se utiliza cuando es necesaria la remoción de compuestos recalcitrantes. Sin embargo, el mayor inconveniente de la reacción de Fenton es la producción de residuos de lodos de hierro. Esto llevó a desarrollar el proceso

de Foto-Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}/\text{Fe}^{2+}$), el cual utiliza radiación ultravioleta para la reducción del ion Fe (III) a Fe (II), resultando en una drástica reducción de los lodos residuales (Vogelpohl, 2007).

1.1.3.6 Efecto de la temperatura en la velocidad de reacción en el proceso Foto-Fenton

Como se mencionó anteriormente la temperatura es un factor que influye en la velocidad de reacción de la mayoría de los procesos químicos esto se debe a que en general puede decirse que la velocidad de una reacción aumenta al elevar la temperatura (como valor medio podemos decir que un aumento de 10 grados en la temperatura duplica la velocidad de la reacción). Esto es debido a que el aumento de temperatura incrementa la energía media y la velocidad de las moléculas reaccionantes, aumentando el número de choques entre ellas y el número de moléculas que alcanza o supera la energía de activación, necesario para que el choque entre ellas sea eficaz. En 1889, Svante Arrhenius estableció empíricamente que las constantes de velocidad de muchas reacciones varían con la temperatura según la expresión presentada en la ecuación 1.3

$$k = A e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde:

k(T): Constante cinética (dependiente de la temperatura)

A: Factor pre-exponencial o factor de frecuencia. Indica la frecuencia de las colisiones.

Ea: Energía de activación, expresada en $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$.

R: Constante universal de los gases. Su valor es $8,3143 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

T: Temperatura absoluta [K]

La representación gráfica de $\ln k$ frente a $1/T$ aparece una línea recta, lo que permite determinar el valor de la energía de activación. Alternativamente, esa ecuación puede escribirse para dos conjuntos de valores de k y de temperatura, lo que permite eliminar la constante $\ln A$. La ecuación resultante (ecuación 1.4), denominada ecuación de Arrhenius, es

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde:

k_1 y k_2 : constante cinética (dependiente de la temperatura)

T_1 y T_2 : son las temperaturas en grados Kelvin

Ea: energía de activación, expresada en J/mol^{-1} .

A pesar de que el proceso Fenton puede ocurrir a temperatura ambiente, la reacción de oxidación Fenton es endotérmica y la velocidad de oxidación de este proceso aumenta con el incremento de temperatura. (Zhang, et al., 2005). A presión atmosférica, el rango recomendable de operación es entre 25 y 45 °C, No obstante, el incremento de temperatura puede disminuir la estabilidad del H_2O_2 , ya que altos valores de temperatura aumentan la velocidad de degradación del H_2O_2 a O_2 y H_2O (Malíková, et al., 2009) y la precipitación del hierro en forma de hidróxido debido a que su constante de producto de solubilidad (K_{ps}) disminuye (Pérez, et al., 2002). Operando a presiones de hasta 3 atmósferas se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 100 °C sin riesgo de descomposición del peróxido (Neyens & Baeyens, 2003).

Este aspecto es importante debido a que las industrias textiles presentan temperaturas elevadas en su proceso de producción, por lo que no sería necesario aplicar un aporte energético extra.

1.1.3.7 Efecto del tiempo en la velocidad de reacción en el proceso Foto-Fenton

Desde un punto de vista económico, se ha demostrado que operar con altos tiempos de residencia no es viable (Ghosh et al., 2010); de hecho, con bajos períodos de reacción se consiguen buenos niveles de degradación de contaminantes en comparación con otros procesos de oxidación química (Burbano et al., 2008; Esplugas et al., 2002).

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1 La industria textil en México

En México los primeros criterios sobre calidad del agua datan de 1989; Sin embargo, no eran de cumplimiento jurídico obligatorio; por ello la calidad ambiental del agua se convirtió en un problema, ya que el continuo crecimiento de la población humana, así como el desarrollo industrial, agrícola y comercial demandan cada vez mayor cantidad de agua, lo que ha provocado una sobreexplotación del recurso y la generación de agua residual (Harada, 2008).

El Programa Nacional Hídrico 2007-2012 (CONAGUA) reconoce lo anterior, y uno de sus objetivos es mejorar aspectos sobre contaminación del agua; por ello se considera la necesidad de modificar criterios desde diversos puntos de vista, entre otros, respecto a información sobre toxicidad de pesticidas, usos del

agua y entornos de la industria. Dentro de estas se encuentra la industria textil, que es una de las más importantes a nivel mundial y en México no es la excepción ya que en el siglo XX, evolucionó notablemente. De realizarse como actividad artesanal pasó a constituirse en una industria tecnificada, desde la etapa de diseño hasta la comercialización. Durante este proceso de transformación, la tecnología jugó un papel importante, además el diseño y las tendencias de la moda han sido los principales elementos que dictan la pauta en la fabricación de prendas de vestir. La industria mexicana del vestido tiene una gran tradición; su importancia se aprecia principalmente por su contribución al empleo y a la economía de muchas regiones del país (Moeller Chávez, et al., 2013). Con la firma del TLCAN esta industria incrementó las exportaciones de prendas de vestir al mercado estadounidense y nuestro país se ubicó en el primer lugar como proveedor de EUA durante 1997-2000.

La producción de una prenda incluye el diseño, el corte, la confección, el armado y el acabado. Cada uno de estos procesos genera importantes fuentes de empleos, por ello se puede decir que la industria del vestido representa el 10.3% de la industria manufacturera y, a nivel nacional, genera el 2.7%. Hasta agosto de 2011, el empleo aumentó a 400,696 personas (Secretaría de Economía, 2012).

Estos procesos productivos tienen un lugar importante en exportaciones de nuestro país, ya sea de materiales (telas, hilos, entre otros), piezas que envían desde otro país para ensamblar en México o, también, como producto final. En el año 2010 la cadena textil-vestido mexicana ha generado 6,265.5 millones de dólares, equivalentes al 2.6% en exportaciones manufactureras, principalmente hacia Estados Unidos de Norteamérica y Canadá (Moeller Chávez, et al., 2013).

De acuerdo con los datos de los censos económicos de 2010 reportados por INEGI, la industria textil-vestido contribuye con el 0.7% de la producción del PIB nacional y con el 4% del PIB manufacturero, esta industria es muy importante para el mercado nacional (Secretaría de Economía, 2012).

El sector textil es uno de los principales generadores de contaminantes que se vierten al agua y utiliza una gran variedad de sustancias químicas que contaminan el agua de proceso, generando agua residual donde los contaminantes son extremadamente diversos y varían de acuerdo con el tipo de fibra, hilo o tela, proceso o productos químicos usados.

La industria textil mexicana se caracteriza por el alto volumen de agua que usa en sus procesos, la cual es contaminada durante la producción de hilos o telas. En el 2003 los cerca de 2,500 establecimientos textiles existentes generaron 0.7 m³/s de aguas residuales y produjeron 14 mil toneladas de DBO (Demanda Biológica de Oxígeno). Para el 2010 se reportaron en México 14,950 establecimientos del

sector textil y del vestido eso significa un incremento del 600% aproximadamente en tan solo 7 años (INEGI, 2011).

Para el mejor aprovechamiento de los recursos hidráulicos y uso racional del agua se requiere, sustituir materias primas, utilizar equipos de proceso más eficiente y reusar el agua tratada en servicios y procesos donde se requiera agua con calidad inferior a la potable.

La industria de colorantes está estrechamente relacionada con la industria textil de manera que un incremento en la producción de fibras requerirá mayor producción de colorantes, aunque no en la misma proporción. Hay alrededor de 100,000 colorantes, y se producen al año 700,000 toneladas al año en todo el mundo (Supaca, et al., 2004).

La presencia de colorantes en el agua residual de la industria textil se debe principalmente al proceso de acabado de telas e hilos, particularmente durante el teñido, el colorante no es fijado completamente y queda un residuo de colorante que no se fijó que varía del 12% al 30% dependiendo del tipo de colorante y del proceso usado para su fijación. Este colorante residual es el que, incorporado a las aguas superficiales, da un aspecto no estético que demerita la transparencia del agua (Zhang, et al., 1999; Wong & Yu, 1999).

Cada tipo de colorante presenta características físicas, químicas y biológicas diferentes, que les atribuyen características recalcitrantes y efectos tóxicos para el ambiente. Su presencia en los efluentes textiles en bajas concentraciones es muy visible e indeseable (O'Neill, et al., 1999).

Dichos efluentes se caracterizan generalmente por su elevada Demanda Química de Oxígeno (DQO), elevada temperatura, alto contenido en color, pH inestable, sólidos en suspensión y compuestos orgánicos clorados (García, 2007; Parag R.G, 2004; Pignatello J. J., 2006).

La principal fuente de contaminación en los efluentes textiles está constituida por la presencia de colorantes “azo”, que son difíciles de degradar en sistemas de tratamiento convencional. A continuación, se hablará un poco más de este tipo de colorantes.

1.2.2 Clasificación de los colorantes en la Industria Textil

Los colorantes utilizados en la industria textil pueden primero dividirse en materias colorantes (materiales solubles) y pigmentos (materiales insolubles). En segundo término, los colorantes pueden organizarse según sus aplicaciones tecnológicas –colorantes reactivos, colorantes dispersos, colorantes

tina, colorantes con mordiente, colorantes ácidos/básicos, colorantes directos, colorantes metal-complejos y pigmentos.

En resumen, los tintes se pueden clasificar según su composición química (Radical-azo, antraquinona, sulfuro, índigo, ftalcianina) o, según a su comportamiento en los procesos de teñido.

La mayoría de los colorantes utilizados en la industria textil son solubles. Los más claros son los tintes azo (70-80 %). La mayor parte de los pigmentos en el mercado son los pigmentos azo, seguidos por los ftalcianinas.

La mayoría de los colorantes textiles utilizados son de origen sintético, es decir, poseen una solubilidad alta en el agua, además de ser altamente resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables. Se calcula que alrededor del 60% de los colorantes para la industria textil son colorantes reactivos, es decir, que se caracterizan por crear una unión éter con la fibra, garantizando un color duradero en el tejido (QUIMINET, 2011).

Las moléculas de los colorantes están constituidas por dos grupos fundamentales: El grupo *cromóforo*, responsable de producir el color y *auxocromóforo* (Figura 3) el cual hace que las moléculas sean más solubles y den mayor afinidad hacia las fibras (Gupta & Suhas, 2009).

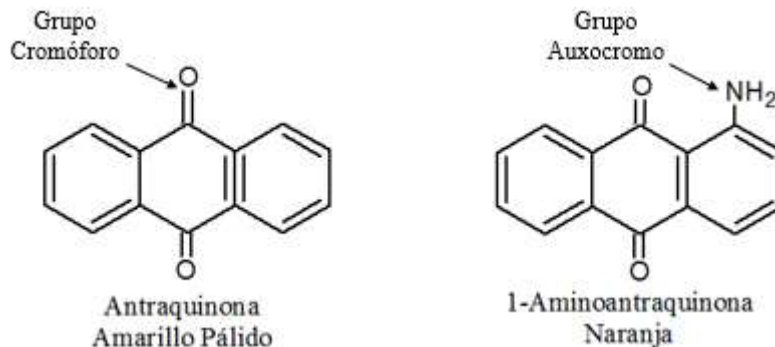


Figura 3 Estructuras químicas con representación de grupos cromóforos y auxocromóforos

La gran diversidad de colorantes que existe se debe a que estos tienen un uso específico según el tipo de tela que se desea teñir. En la tabla 1, se muestra la aplicación de diferentes colorantes según el tipo de tela que se desea teñir. En las secciones siguientes se dará una breve descripción de los colorantes descritos en la tabla.

Tabla 1 Aplicación de diferentes tipos de tinturas aplicadas a varios tipos de telas

(Sedlak, 2013)

	CO Algodón	LA Lana	LI Lino	SI Sisal	CV Viscosa	CA Acetato Celulósico	PA Poliamida	PES Poliéster	PAC Polyacrylo Nitrilo
Acido (Anionico)		X		X			X		X
Mordiente (Cromo)		X					X		
Básico (Catiónico)									X
Metal Complejo		X		X			X		
Directo	X	X (Mezcla)	X	X	X	X			
Tina	X	X	X		X	X	X		
Sulfuro	X		X		X	X			
Azoico Insoluble	X		X		X	X			
Reactivo	X	X	X	X	X	X	X		
Disperso						X	X	X	

1.2.2.1 Tinturas Básicas o Catiónicas

Las tinturas básicas (o catiónicas) se utilizan para obtener colores brillantes. Típicamente sobre las fibras de poliacrilonitrilo. La obtención de un rápido teñido sobre las fibras poliacrilonitrilo es excelente. Sin embargo, cuando se aplica en la celulosa, las tinturas básicas la solidez del color es pobre a la luz y el fregado.

Los colorantes básicos se pueden disolver en agua, pero en ácido acético resultan mejor. Se disuelven primero en ácido acético y luego mezcladas con agua caliente en orden de evitar que se le adicione moléculas de la tintura o colorante.

1.2.2.2 Colorantes Ácidos o Aniónicos

Los colorantes ácidos son utilizados para teñir proteína, poliamida y fibras poliacrilonitrilo. La solidez del color a la luz y al lavarse va de pobre a muy bueno dependiendo de la estructura química del colorante. Los colorantes ácidos son fácilmente disueltos en agua.

1.2.2.3 Colorantes con Mordiente

Los colorantes Mordientes pueden ser clasificados como tintes ácidos, pero debido a la tecnología que se utiliza, son una categoría independiente de tintes. Las moléculas del colorante no contienen cromo, sin embargo, el cromo está presente en la sal usada para fijar el colorante sobre las fibras.

Las sales más comúnmente usadas en este proceso son: potasio dicromato, cromato de potasio y dicromato de sodio. Las tinturas o colorantes Mordientes se utilizan para teñir proteína y fibras poliamidas. Se mezcla sal de cromo con el baño del tinte para fijar el colorante a la fibra. La solidez del color a la luz y en el lavado es excelente.

El impacto ambiental asociado con el cromo depende de su estado de oxidación. En su forma hexavalente, el cromo es 100 a 1000 veces más tóxico que los compuestos trivalentes más comunes. El cromo III exhibe toxicidad aguda baja, mientras que el cromo VI es agudo tóxico y se ha comprobado que es cancerígeno en animales. Debido a su alta efectividad y a sus excelentes propiedades de agotamiento del baño del tinte, el cromo que contiene los tintes le otorga un impacto relativo al medio ambiente a través de los afluentes del agua.

El cromo VI es sólo utilizado (y es difícil de reemplazarlo) como un tinte mordante para el teñido de la lana. Durante el proceso del teñido, el cromo VI se reduce a cromo III si el proceso está bajo control. Si el tinte contiene cantidad del colorante controlada y la cantidad exacta de pH cuando se usa el colorante mordante pueden aún reunir los requerimientos establecidos en la legislación alemana según el criterio para el agua de desperdicio que equivale a 0.5 ppm del total del afluente.

1.2.2.4 Tintes de Metal Complejo

Los tintes de metal complejo están compuestos por un átomo metálico a la cual se enlazan unas o más moléculas del colorante. Estos colorantes son típicamente sobre proteínas y fibras poliamidas.

Los tintes de metal complejo 1:1 (señala una molécula del colorante enlazado al átomo metálico) se aplican en soluciones fuertemente ácidas. Los tintes complejos 1:2 (señala dos moléculas del colorante

enlazadas al átomo metálico) se aplican en el hilo neutro o débil de la solución ácida (pH 5 –6.5). Los tintes o colorantes complejos del metal, algunas veces, utilizan cromo III para el átomo metálico. Las consecuencias para el medio ambiente asociadas al cromo dependen de su estado de oxidación, tal y como se mencionó anterior mente en el apartado anterior.

1.2.2.5 Colorantes Directos

Los colorantes directos son principalmente utilizados para teñir fibras de celulosa y, como los colorantes aniónicos, los tintes directos tienen características ácidas. La solidez del color al lavarse es pobre, mientras a la luz el rango va de pobre a excelente. Los tintes directos son a veces utilizados para teñir fibras que contienen proteína (especialmente en mezclas).

Los colorantes directos se aplican a las fibras con base de celulosa directamente sin auxiliares mordientes.

1.2.2.6 Colorantes Tina

Los colorantes Tina se utilizan principalmente para las fibras de celulosa. A veces, son utilizadas sobre las fibras de proteína y de poliamida.

Son colorantes que tienen entre sí diferente constitución química, pero todos son insolubles en agua. Por su reducción en un medio alcalino se transforman en leucoderivados hidrosolubles. El proceso de reducción se fundamenta en la acción reductora del hidrógeno sobre el grupo carbonilo, transfiriéndolo al grupo alcohólico.

Una vez realizado el teñido, es fácilmente oxidable por el oxígeno del aire. Estos colorantes dan teñidos más brillantes que los antraquinónicos, pero menos sólidos ante la luz y el lavado.

1.2.2.7 Colorantes o Tintes del Sulfuro

Los tintes del sulfuro se componen de las estructuras amino y fenólico limitadas a los compuestos del sulfuro y tienen alto peso molecular.

Muchos otros tintes contienen sulfuro en sus moléculas, pero solo las tinturas que son solubles en agua y solubles al sulfuro de sodio en un ambiente alcalino pertenecen a esta clase. Su composición exacta no es siempre conocida porque están hechas de sustancias complejas.

Las tinturas de sulfuro son normalmente utilizadas sobre fibras de celulosa, especialmente en algodón. Éstas no presentan sombras brillantes en la celulosa, pero son de bajo costo y proveen buena solidez en el color al lavarse. La solidez en el color va de pobre a excelente.

1.2.2.8 Colorantes de Naftol

Los tintes o colorantes de naftol son insolubles a las tinturas sintetizadas azo a partir de dos componentes sobre la fibra en sí misma (principalmente algodón); por lo tanto, también se las denomina colorantes en desarrollo.

Las fibras son tratadas con componentes diazo (también llamadas sales y bases libres de diazonio) y los componentes del acoplador (principalmente derivado del beta-naftol) los cuales reaccionan para que actúe el azo cromóforo (parte de la molécula responsable del color).

El colorante naftol es insoluble en agua, y, por lo tanto, la solidez del color frente al lavado es buena. Por otra parte, la solidez del colorante en el fregado es pobre porque estos colorantes depositan una estructura del pigmento en la fibra. La solidez del color a la luz reacciona en valores altos y se alcanzan sombras brillantes. Los colorantes naftoles son utilizados mayormente para obtener los colores anaranjado, rojo y magenta. Un especial grupo de dispersión/desarrollo de los tintes “los tintes diazo de dispersión” se utilizan para teñir el poliéster.

En la actualidad, cerca del 70 % al 80 % de los tintes pertenecen a los grupos de los tintes azo. Bajo condiciones reducidas, estos tintes pueden producir las aminas, algunas de las cuales son cancerígenas. Una lista de aminas cancerígenas en los cuales las tinturas azo pueden dividirse o partirse se observa en la Tabla 2.

Mientras algunos países han prohibido la venta de las tinturas del textil que pueden formar las aminas cancerígenas, más de 100 tinturas azo con dicho potencial, todavía están disponibles en el mercado mundial.

Tabla 2 Aminas carcinogénicas (Número CAS) (Basado en las normas internacionales)

(Sedlak, 2013)

	Aminas	Numero CAS		Aminas	Numero CAS
1	4-aminobifenilo	(92-67-1)	13	3,3'-dimetil-4,4 diaminodifenilmetano	(838-88-0)
2	Bencidina	(92-87-5)	14	2-methoxy-5-methylaniline	(120-71-8)
3	4-cloro-o-toluidina	(95-69-2)	15	4,4'-metileno-bis-(2-cloroanilina)	(101-14-4)t
4	2-naftilamina	(91-59-8)	16	4,4'-oxidianilina	(101-80-4)
5	p-cloroanilina	(106-47-8)	17	4,4'-tiodianilina	(139-65-1)
6	2,4-diaminoanisol	(615-05-4)	18	o-toluidina	(95-53-4)
7	4,4'diaminodifenilmetano	(101-77-9)	19	2,4-toluendiamina(TDA)	(95-80-7)
8	3,3'-diclorobencidina	(91-94-1)	20	2,4,5-trimetilanilina	(137-17-7)
9	3,3'-dimetoxibencidina	(119-90-4)	21	o-aminoazotoluene	(97-56-3)
10	3,3'-dimetilbencidina	(119-93-7)	22	2-amino-4-nitrotolueno	(99-55-8)
11	4-aminoazobenceno	(60-09-3)	23	o-anisidina	(90-04-0)
12	2,4-xilidina	(95-68-1)	24	2,6-xilidina	(87-62-7)

1.2.2.9 Colorantes Reactivos

Los colorantes reactivos utilizan un cromóforo unido a un sustituyente que sea capaz de reaccionar directamente con el sustrato de la fibra. Los cromóforos son principalmente el azoico, la antraquinosa o moléculas complejas del metal. Las cortinas del azul marino y turquesa devienen del cobre o de complejos del níquel de fitalocianinas. Las tinturas reactivas de las fibras han sido sustituidas en gran parte los tintes directos, azoicos y de la tina en fibras de teñido de la celulosa.

Algunas clases son también convenientes para las fibras de poliamida y de la proteína. Las tinturas reactivas forman vínculos químicos asociados o covalentes con la fibra, dando características excelentes en materia de solvencia de color.

La molécula del colorante se compone de dos segmentos la parte reactiva y la cromófora. La reactiva, puede ser cualquiera de las variadas clases de moléculas vinilsulfona, clorotriazina, fluoro pirimidina,

cloro pirimidina, fluoro pirimidina cloro. La más comúnmente usada es la molécula reactiva vinilsulfona. Las tinturas reactivas bi-funcionales tienen características y flexibilidad más altas de la reactividad con respecto a parámetros de variados procesos. Estos se componen de dos diversos grupos reactivos (uno es típicamente una vinilsulfona). Los valores de la fijación aumentan hasta el 85/90 % con el uso de tinturas reactivas bi-funcionales.

Las tinturas reactivas son fácilmente solubles al agua, pero tienen buenas propiedades de solidez en el color (excepto cuando se usa cloro) debido al vínculo químico fuerte. Los colores brillantes pueden ser obtenidos.

Las tinturas reactivas pueden contener altos porcentajes (en peso) de halógenos, los cuales usualmente dejan la molécula después de haberse formado un enlace covalente con la fibra y el extremo como sales en el baño de la tintura o, en el baño que sirve para aclarar.

1.2.2.10 Colorantes de Dispersión

Las tinturas de dispersión están compuestas por componentes orgánicos las cuales no son solubles al agua, pero pueden ser dispersados en el agua con la ayuda de auxiliares específicos.

Los colorantes dispersos son a menudo para las fibras de poliéster, acetato y poliamidas. La solidez del color a la luz es generalmente buena, mientras la solidez al lavado depende de la estructura de la fibra a la cual se aplica la tintura.

Los colorantes dispersos pueden ser aplicados a la fibra a través de diferentes tecnologías:

- I. Uso directo de la dispersión del agua ayudado por las sustancias del portador a temperaturas por debajo de los 100 °C.
- II. Uso directo por encima de los 100 °C.
- III. Aplicación a través de la solubilización de la tintura en la fibra a altas temperaturas (procesos Thermool).

Los colorantes dispersos pueden tener efecto de tipo alérgico. En la Tabla 3 listas de tinturas las cuales pueden causar sensibilidad. Además de la irritación de la piel, pueden suscitarse problemas respiratorios y nasales y picazón en los ojos.

Tabla 3 Tintes que general daños a la salud

(Sedlak, 2013)

Agente químico	Color-Nombre-Índice
Antraquinona	Rojo Disperso 11, 15
	Azul Disperso 1, 3, 7, 26, 35
Tintes Azoicos	Rojo Disperso 1, 17
	Azul Disperso 102, 124
	Naranja Disperso 1, 3, 76
Colorantes Nitro	Amarillo Disperso 1, 9
Metino	Amarillo Disperso 39, 49
Quinoleína	Amarillo Disperso 54, 64
Trifenilmetano	Ácidos Violeta 17
Otros	Cromato

1.2.3 Impactos Ambientales de los Colorantes

Una de las mayores causas de contaminación en las tinturas está asociada con la falta de fijación de la misma la cual es consecuentemente desechada en el agua residual. En la Tabla 4 se enumera el grado de fijación de los tipos de tinturas a través de tres procesos (teñido a la continua, estampado y teñido por lote).

Tabla 4 Porcentaje de fijación de color según el proceso de teñido y el tipo de colorante

C = Teñido Proceso Continuo, P = Estampado, B = Teñido por lote		
Tipo de tinte	Proceso	Grado de fijación (%)
Disperso	C	88 - 99
Disperso	P	91 - 99
Directo	B	64 - 96
Reactivo de lana	B	90 - 97
Reactivo de algodón	B	55 - 80
Reactivo general	B	60
Reactivo general	P	70 - 95
Tina	C	70 - 80
Tina	P	60 - 90
Azufre	C	65 - 95
Azufre	P	85 - 95
Ácido – uno SO ₃ - grupo	B	85 - 93
Ácido ≥ 1 SO ₃ - grupos	B	85 - 98
Básico (Catiónico)	B	96 - 100
Azoico (naftol)	C	76 - 89
Azoico (naftol)	P	80 - 91
Complejo metálico	B	82 - 98
Pigmento	C	*100
Pigmento	P	*100

El teñido en proceso continuo resulta en rangos más bajos de descarga de aguas residuales que el teñido por lote debido a usar relaciones de baño más bajas. Los rangos de descarga de aguas residuales para estampar son similares a éstos para el teñido continuo.

Los colorantes o tintes que no se agotan o se fijan totalmente en la fibra, o reciclados, se descargan consecuentemente en el afluente de aguas residuales. Estos tienen un alto impacto visual, y dependiendo de cómo son los colorantes pueden tener alguna de estas características:

Una alta carga de los compuestos orgánicos (usualmente expresados en altos valores de DQO y DBO, altos valores de AOX (Haluros Orgánicos Absorbibles) y metales pesados tales como el cobre, zinc, cromo y níquel que son tóxicos al ambiente. A raíz de que los colorantes se diseñan para ser estables en textiles, no son normalmente bio-degradables bajo condiciones aeróbicas. Cabe destacar que, las fórmulas de las tinturas contienen aproximadamente 30% de tintura pura, por lo tanto, la mayoría de las fórmulas consisten en agentes de dispersión que no son bio-degradables (productos de condensación del ácido sulfónico de naftalina) y agentes estandarizados.

Los colorantes modernos y los agentes abrillantadores son moléculas orgánicas cromóforas grandes que son difíciles de romper y se oxidan a un ritmo muy lento, y algunos “particularmente colorantes reactivos hidrolizados y algunos colorantes ácidos” no son fácilmente absorbidos por la activación del lodo (desechos textiles) en el proceso del tratamiento de aguas residuales.

Para concretar lo antes mencionado se describen las características que hacen que los efluentes textiles posean un impacto ambiental tan significativo.

- I. Producción: En el mundo existen más de 100,000 tintes disponibles comercialmente con una producción de más de 7×10^5 t/año (Robinson, et al., 2001).
- II. Variabilidad de colorantes: Un 90% de los tintes se comercializan en cantidades inferiores a 100 t/año y sólo un 1% lo hacen en cantidades mayores de 1.000 t/año (López, et al., 2006).
- III. Resistencia: La exigencia actual de la industria textil radica en la búsqueda de tintes con alta estabilidad química y fotolítica. Se diseñan tintes resistentes a la exposición a la luz, agua, jabones o lejías.
- IV. Alto consumo de agua: La tinción es un proceso húmedo, en el que se consumen 160 kg de agua/kg de producto acabado. El volumen de efluente representa un 90-95% del agua utilizada (Blánquez, 2005).
- V. Importantes pérdidas: Sobre un 2% de la producción mundial de tintes se malgasta en el efluente en procesos de fabricación, mientras que un 10-15% se desperdicia en los procesos de tinción, como consecuencia de la incompleta fijación de los colorantes a las fibras. Este porcentaje representa la descarga de 200 toneladas por día de estos compuestos al medio ambiente (Guaratini & Zanoni, 2000). Este porcentaje depende en gran medida del tipo de tinte y fibra que participan en la tinción, alcanzando valores desde 5% para tintes básicos hasta 50% para tintes reactivos (McMullan, et al., 2001).

- VI. Altamente visible: Concentraciones del orden de mg/L de tinte en las aguas son visibles para el ojo humano. Para algunas clases de tintes ese valor disminuye a 0,005 mg/L en un cauce limpio.
- VII. Variabilidad en la caracterización de las aguas: En función del tipo de tinte aplicado, la fibra sobre la que se aplica y las distintas etapas en el proceso de tinción, las aguas generadas presentan características muy diferentes en cuanto a DQO, DBO, color, sólidos, C, N, P o sales (Bisschops, 2003). Todas estas características hacen que el vertido directo de efluentes de la industria textil se haya convertido en una práctica inviable por representar un problema ecológico y toxicológico a nivel mundial.

Con respecto al último punto antes mencionado cabe agregar lo siguiente:

1.2.3.1 Efectos ecológicos

La baja solubilidad de los pigmentos permite que estos sean mucho más fáciles de eliminar de las aguas por tratamientos físico-químicos. Sin embargo, los tintes presentan alta solubilidad, la cual se ve favorecida por la presencia de determinados grupos, tales como los sulfónicos. El primer efecto que causa el vertido de aguas residuales con tintes disueltos se presenta a concentraciones muy bajas de tinte. El hecho de transformar el entorno de cauces naturales es un aspecto negativo que debe ser resuelto. La principal consecuencia medioambiental derivada del color presente en aguas de ríos y lagos se debe a la reducción de la transparencia y la disminución del oxígeno disuelto, debido a que altas cargas de color dificultan la función fotosintética de las plantas. Adicionalmente algunos problemas asociados a los efluentes textiles son debidos a la presencia de metales pesados o azufre, que producen problemas ambientales debido a su naturaleza tóxica.

1.2.3.2 Efectos toxicológicos

Los riesgos toxicológicos de los tintes sobre la salud humana están relacionados con el modo y tiempo de exposición. Estos compuestos presentan una baja toxicidad aguda, que es la resultante de los tiempos de exposición cortos. Esto es debido a que los tintes tienen una baja solubilidad en fluidos corporales y una alta solubilidad en agua, de manera que estos compuestos al ser ingeridos son metabolizados en la microflora intestinal y excretados más rápidamente que los compuestos menos solubles (López, et al., 2006). Estos compuestos únicamente producen efectos de poca gravedad, tales como dermatitis de contacto o sensibilización respiratoria. La toxicidad crónica debida a exposición continuada a los tintes es, por lo general, baja. Sin embargo, se ha comprobado que algunos tintes de naturaleza azoica presentan

un carácter cancerígeno potencial, y al menos 3.000 colorantes azo comerciales han sido catalogados como cancerígenos (Guaratini & Zanoni, 2000). Su toxicidad radica en que pueden producir aminas aromáticas debido a procesos de oxidación, hidrólisis o reducción del enlace azo. Algunas aminas aromáticas utilizadas en la fabricación de los tintes son carcinógenos reconocidos (Weisburger, 2002).

1.2.4 Características de las aguas residuales de la industria textil con colorantes

Como ya se mencionó en el punto anterior el principal problema ambiental que caracteriza a las aguas provenientes de la industria textil es la falta de fijación que tienen los colorantes y esto genera un aporte de color a las aguas en los cuerpos receptores donde son desechados los efluentes contaminados lo que provoca una reducción de la transparencia y una disminución del oxígeno disuelto, debido a que las altas cargas de color dificultan o inhiben por completo la función fotosintética de las plantas. Adicionalmente algunos problemas asociados a los efluentes textiles son debidos a la presencia de metales pesados, que producen problemas ambientales debido a su naturaleza tóxica. Se ha comprobado que algunos colorantes de naturaleza azoica presentan un carácter cancerígeno potencial, y al menos 3000 colorantes azo comerciales han sido catalogados como cancerígenos (Guaratini & Zanoni, 2000). Su toxicidad radica en que pueden dar lugar a las aminas aromáticas de las cuales derivan, debido a procesos de oxidación, hidrólisis o reducción del enlace azo. Algunas aminas aromáticas utilizadas en la fabricación de los tintes son carcinógenos reconocidos (Weisburger, 2002; Greenpeace, 2012) Algunas de estas aminas fueron descritas en la tabla 2.

La exigencia actual de la industria textil radica en la búsqueda de colorantes con estabilidad química y fotolítica, por lo que se diseñan colorantes resistentes a la ruptura debida a la exposición a la luz, agua, jabones, lo cual hace más complicado su degradación. El alto consumo de agua generando volúmenes de agua residual que representa un 90-95% del agua utilizada en el proceso (Blánquez, 2005) y las elevadas pérdidas como consecuencia de la incompleta fijación de los colorantes a las fibras representando un porcentaje de 200 t/d de estos compuestos al medio ambiente (Guaratini & Zanoni, 2000; McMullan, et al., 2001);

Las operaciones que contribuyen con la mayor descarga de desechos líquidos son el lavado, la tintura, el estampado y el acabado. Las aguas residuales textiles son irregulares y variables en su composición ya que dependen de la unidad de proceso y la operación que se efectuó. Las industrias textiles son contaminantes en términos de volumen y complejidad de sus efluentes ya que cada una de las actividades que realizan genera agua residual de características muy variables. Además, las aguas residuales textiles se caracterizan por tener pH que varía de acuerdo al proceso, altos valores de DQO, DBO, altos niveles

de color, turbiedad, una alta concentración de sólidos suspendidos y descargas a altas temperaturas. Valores típicos de DQO y DBO para industrias dedicadas al acabado textil son 1700 mg O₂/L y 550 mg O₂/L respectivamente. Las aguas residuales de teñido y de procesos de acabado de la industria textil con una demanda química de oxígeno que exceda 1600 mg/L y que tenga un color muy oscuro se considerada agua residual altamente contaminada y fuente significativa de contaminación. (Aristizábal Castrillón & Bermúdez Agudelo, 2007).

La carga contaminante del desengomado está dada por sólidos suspendidos y disueltos, grasas y aceites. Ésta etapa contribuye aproximadamente en un 50% del total de sólidos suspendidos producidos por la planta. En el mercerizado también se emplea sosa cáustica causando los mismos efectos sobre la carga contaminante que el desengomado.

En la etapa de descruce (sirve para eliminar las impurezas naturales y adquiridas de las fibras y tejidos) se emplea hidróxido de sodio o sosa cáustica, que causa una elevada alcalinidad y color grisáceo en el agua residual (color que es justificado por las impurezas aun presentes en la tela), por lo general no es posible recuperar este agente químico por los altos costos que esto conlleva. El blanqueo es realizado con peróxido de hidrógeno que contribuye poco con la carga contaminante. El aporte a la carga contaminante de los procesos de teñido es significativo y depende del tipo de colorante utilizado en el teñido, por lo general se presentan bajas cantidades de sólidos suspendidos y valores elevados de DQO y DBO. En la Tabla 5 se presentan valores típicos de la carga contaminante causada por diferentes colorantes.

Tabla 5 Carga contaminante que aportan los colorantes (Rodríguez & Roldan, 1997)

Colorante	Litros de agua por Kg de tela	DQO (ppm)
Reactivos	74 - 210	150 - 400
Directos	14 - 53	440 - 1200
Sulfurosos	24 - 212	4200 - 14100
Tinas	8 - 160	250 - 3000

El estampado presenta elevada DQO y DBO, alto contenido de sólidos y los valores de pH se encuentran entre neutro y alcalino. En general las aguas residuales del proceso de teñido contienen fibras textiles, tintes reactivos hidrolizados que no se fijan en las fibras y que representan entre un 20% y 30% del tinte

aplicado, estos residuos de tintes son los responsables de la coloración del agua y no pueden ser reciclados. Además, contienen tintes auxiliares, sustancias orgánicas que tampoco son reciclables y que son los responsables del alto nivel de DBO y DQO de los efluentes, también contienen electrolitos principalmente carbonato de sodio y cloruro de sodio. Este tipo de efluentes alcanza pH entre 10 y 11 y temperaturas entre 50 y 70 °C. Los procesos de teñido son de los que aportan mayor carga contaminante de los procesos textiles debido a que causan coloración de las aguas y contienen sustancias tóxicas y cancerígenas (Azzi, 2006).

Tal coloración tiene un impacto negativo sobre la fuente de agua receptora, porque interfiere con la transmisión de luz a través del agua impidiendo la fotosíntesis de las plantas acuáticas (Lemley & McCLUNG, 1994); (Mejía & Osorio, 2003). Estas aguas cambian de color con frecuencia ya que los tintes varían según los requerimientos del consumidor.

1.2.5 Regulación de descargas de aguas residuales de la industria textil

En México los sistemas de tratamiento presentan deficiencias en la remoción de contaminantes por la mezcla de sustancias tóxicas aportadas por las industrias que limitan los procesos de remoción, y aunado a lo anterior los estándares de calidad del agua impuestos a través de la NOM-001-SEMARNAT-1996 provoca que las descargas de diferentes giros industriales en la mayoría de los casos cumplan con los parámetros y los contaminantes específicos de cada giro no sean tomados en cuenta provocando que la incorporación de sustancias tóxicas deteriore el ambiente acuático y cause la pérdida de flora y fauna, así como los límites de uso del cuerpo receptor (Saldaña, et al., 2001)

Países como EUA y Canadá cuentan con legislación ambiental segura, algunos países de Europa como Francia, Austria e Italia tienen valores límites para las descargas de efluentes coloreados. Sin embargo, debido a que estos países utilizan unidades diferentes para su estimación, hace complicada una comparación. En Francia, las unidades que utilizan para realizar su determinación son mg/L Pt-Co (Hassel, et al., 2007). Existen algunos otros métodos de medición de color. Ejemplos de métodos espectrofotométricos pueden ser: Color Platino-Cobalto, Valores de Triestimulos y Métodos ADMI. Referencias específicas de métodos para color en agua incluyen: Métodos Estandarizados APHA 2120; EPA 110.1; DIN ISO 7887 y SAC 436nm; China MEP GB 11902; Boletín Técnico NCASI 253 ó 803; entre otros. (Químico Técnica Industrial, S.R.L., 2014).

1.2.6 Colorantes del tipo azo

El color es parte de la percepción visual que depende de un estímulo luminoso y del observador. Para que una sustancia sea considerada colorante, además de poseer color debe poder transferirlo al medio al cual se aplica. Debido a la facilidad de su síntesis y a su versatilidad son los más importantes, perteneciendo a este grupo casi la mitad de los colorantes sintéticos. Están caracterizados por la presencia de uno o más grupos “azo” en su molécula. La estructura química de este tipo de colorantes, se caracteriza por la presencia del grupo azo –N=N- como un ente cromóforo, asociados a grupos auxóchromos de tipo amino o hidroxilo. En principio, cualquier amina aromática primaria es capaz de generar azo-compuestos por un proceso llamado de acoplamiento. Esta reacción similar a otras sustituciones electrofílicas aromáticas requiere de una especie positiva (un átomo de nitrógeno de la sal de diazonio) y un sustrato o acoplamiento, receptor de la especie positiva que debe estar activado por un grupo donador de electrones (que incrementa su densidad electrónica) y además poseer hidrógenos fácilmente sustituibles. El proceso consta de dos pasos fundamentales (Moeller Chávez, et al., 2013):

- I. Formación de la sal de diazonio por diazotación de la amina primaria:
- II. Acoplamiento de la sal de diazonio con el sustrato acoplante

Cualquier sustituyente sobre el radical $\cdot R$ que incremente la carga negativa (densidad electrónica) también favorecerá esta reacción. Entre los grupos atractores de electrones se encuentran: -COOR, -CO, -COOH, -CN, -NO₂, -SO₃H y entre los donadores: -NH₂, -OH, -CH₃, etc.

El acoplamiento RH es generalmente un compuesto aromático, por ejemplo, naftoles, naftilaminas, dimetilnilina, pero también se puede acoplar sales de diazonio con sistemas heterocíclicos conjugados como índoles, pirroles, pirazolonas o quinolonas.

Otra manera general de sintetizar colorantes azo es mediante el acoplamiento oxidativo de hidrazonas heterocíclicas utilizando con preferencia agua oxigenada en presencia de sales ferrosas, ferricianuro de potasio, persulfato de amonio, tetra-acetato de plomo, etc. Para homogenizar el medio se utilizan con solventes como alcoholes de bajo peso molecular, glicoles, dimetilformamida y otros.

Debido a la complejidad de los nombres químicos, los colorantes azo son raramente referidos únicamente a la nomenclatura de la IUPAC o CAS. La literatura técnica ha adoptado ambas clasificaciones, por la constitución química y por el color. Todo colorante azo comercialmente es identificado por el sistema de índice de color (Colour Index). A cada colorante se le da un nombre genérico, por ejemplo: marrón

directo, que brevemente da información sobre la aplicación y color. Además del nombre genérico, cinco dígitos se le destinan ambiguamente para identificar la estructura química del colorante. En el sistema de “Índice de Color”, los colorantes azo se proveen con los números desde 11,000 a 39,999 que corresponden a la clase química siguiente: Mono azo (11,000 – 19,999), Diazo (20,000 – 29,999), Triazo (30,000 – 34,999), Poliazos (35,000 – 36,999), Azoico (37,000-39,99). (Colour Index™ Constitution Number (CICN), 2013).

1.2.6.1 Clasificación de los colorantes azo

Los colorantes azo pueden subdividirse en dos grupos: los iónicos y no iónicos. Aunque el máximo de absorción está en el rango de luz UV-visible, las presiones de vapor disponibles son muy bajas, en el rango de 10-20 mmHg a 10-8 mmHg. La hidrólisis es, a excepción de colorantes reactivos, muy baja. Sin embargo, los dos grupos exponen diferencias importantes. En general, los colorantes azo iónicos son casi completamente o parcialmente disociados en solución acuosa. Los colorantes azo no iónicos, por otra parte, son únicos por su baja solubilidad (<100 mg/L). El coeficiente de partición, K_{ow} , estimado para los colorantes iónicos son generalmente muy bajo, p. ej. 10^{-5} para el Naranja ácido 10, y 100 para el Negro Directo 38. Sin embargo, los no iónicos tienen coeficientes de partición muy altos (K_{ow}), p. ejemplo, 3630 para el Azul Disperso 79, y 11220 para el Amarillo Solvente 2.

Las aminas aromáticas (metabolitos), que están entre las impurezas de los colorantes azo y los subproductos generados en la degradación de los colorantes, generalmente tienen propiedades físico químicas que varían dentro de los siguientes cuatro grupos: anilina, toluidina, benzidina y naftaleno. La solubilidad de los metabolitos varía en forma similar desde casi insoluble a muy soluble. Los máximos de absorción están generalmente en el rango de 240 a 300 nm; esto es abajo del rango de la región UV-visible (Moeller Chávez, et al., 2013).

Considerando el número de grupos azo presentes en la molécula se tiene mono- diazo, triazo compuestos y policondensados, y en cada clase hay representantes de los diferentes grupos tintóreos. Debido a la abundancia de los colorantes de esta familia identificarlos de acuerdo con su constitución química resultaría demasiado complejo, especialmente para los poliazos y por ello el “Color Index” ha adoptado una notación adicional que informa acerca de su síntesis: en cuanto a la sal de diazonio, representada por la amina precursora, al sustrato y a las condiciones de reacción (ácida o básica); utilizando un sistema de flechas para indicar la secuencia de condensaciones.

Para planificar la síntesis de los colorantes azo debe considerarse cuál sistema aromático debe ser el sustrato y cuál el que aporta el grupo diazonio. Como regla general se acepta que la porción aromática que contiene grupos atractores de electrones corresponde a la de la sal de diazonio y que los donadores de electrones se ubican sobre el sustrato acoplante. Los colorantes diazo “secundarios” se preparan en etapas de acoplamiento consecutivas. Están subdivididos según el “Color Index” en cuatro grupos, dependiendo de la naturaleza del acoplamiento azoico y el componente diazo.

El término azoico se reserva en la clasificación tintórea, a los colorantes azo producidos sobre la fibra. Es por ello que, para identificar este grupo químico, en ocasiones se usa indistintamente la denominación “colorante azo” o “azoico”. Los colorantes poliazoicos, en su mayoría sustantivos para fibras celulósicas, están divididos en grupos con el mismo criterio que para los bis-azoicos. Debido a la acumulación de grupos azo predominan los colores verdes, azules y negros en contraste con los monoazo y diazo que exhiben amarillos, naranjas y rojos.

1.2.6.2 Características de los colorantes azo

Asimismo, según su estructura molecular y propiedades específicas pueden ser colorantes azo ácidos, básicos, dispersos, directos y reactivos. La aplicación de este tipo de colorantes es muy variada y depende del proceso de teñido o estampado, pero en la mayoría de los casos se requiere aplicar calor y un mordente.

Los colorantes dispersos azo tienen muy baja solubilidad en agua y son apropiados para fibras hidrofóbicas. De los colorantes dispersos, los azo constituyen casi la mitad de la producción, siendo las antraquinonas el otro grupo químico importante de esta clasificación tintórea. Se los utiliza para poliésteres, acetato de celulosa y nylon, porque cubren bien los defectos causados por la tejedura no uniforme, conocido como efecto “barré” (barras o listas en los tejidos). Las estructuras químicas son derivadas de aminoazobenceno con grupos alquilo, CN, NO₂ o Cl, en posiciones *para*, de la función diazo; si hay grupos NO₂, CN, en posición *orto* al diazo los colorantes son muy estables a la luz, gracias a la formación de quelatos internos.

Los colorantes se liberan en el medio ambiente por medio de dispersiones o soluciones coloreadas en los efluentes industriales de las industrias de su síntesis y textil como las principales. En esta industria, en los procesos de teñido se estima que la cantidad de colorantes que no se fija a las fibras depende del tipo de colorante usado y puede variar del 2 al 50% los cuales son descargados en las aguas residuales de las plantas de tratamiento o directamente al ambiente (Stolz, 2001; Moeller Chávez & Garzon, 2006).

Para evaluar los efectos nocivos que pueden causar los colorantes si son descargados en un cuerpo receptor hay que considerar entre otros los siguientes factores: Las concentraciones de los colorantes descargados en los efluentes industriales y el tipo de molécula descargada, la toxicidad a macro y microorganismos en el cuerpo de agua y su posible acumulación en las cadenas alimenticias y en el ambiente (Leist, 1982).

1.2.7 Tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil con colorantes

Se sabe que aproximadamente el 15% del total de la producción de colorantes es perdida en los efluentes de industrias de síntesis y procesamiento. Los colorantes de tipo azo son los más utilizados, corresponden aproximadamente a más del 70% de los colorantes utilizados. La persistencia del color en las aguas residuales representa uno de los mayores problemas ambientales ya que estos son generalmente visibles a concentraciones aún por debajo de 1 mg/L. Aun cuando la normatividad mexicana no regula en la descarga el color que éstos producen, por protección a los cuerpos de agua y ecosistemas, es importante su eliminación debido a la toxicidad de sus moléculas y a los efectos estéticos que el color causa.

La literatura reporta diferentes tecnologías para la remoción del color, entre las que se encuentran los procesos químicos (oxidación fotoquímica, oxidación electroquímica, oxidación con cloro, ozonización, entre otros), los procesos físicos (adsorción con carbón activado, radiación UVA, electroquímica) y los de tipo biológico (sistemas anaerobios y aerobios de biomasa suspendida y fija entre otros).

El tratamiento de aguas residuales de la industria de colorantes y textil es un problema ambiental al que se le ha dado mucha atención ya que muchos colorantes textiles son tóxicos y no son biodegradables, y en consecuencia son descargados a canales y ríos permaneciendo en el ambiente. Muchos de los colorantes que existen en el mercado son xenobióticos, por lo que con frecuencia se necesita más que un proceso biológico de tratamiento para su remoción total y los subproductos generados en la remoción de colorantes, conocidos como metabolitos (aminas aromáticas, algunas potencialmente carcinogénicas), presentan problemas de toxicidad, por lo que se hace indispensable la mineralización del colorante (Vandevivere & Veartraete, 1998).

En general existen métodos físicos-químicos y biológicos para el tratamiento de colorantes azo, sin embargo, debido a la alta estabilidad de estos colorantes, su degradación no es fácil. Los procesos físicos y químicos son la floculación, membranas de filtración, coagulación electrocinética, destrucción electroquímica, intercambio iónico, oxidación química y diferentes técnicas de adsorción. Una revisión de las diversas tecnologías y técnica de tratamiento, y su eficiencia en la degradación de compuestos xenobióticos. Sin embargo, algunos investigadores han concluido, que se necesitan más de un proceso

de tratamiento para la decoloración de un agua con colorantes recalcitrantes, los cuales probablemente involucren una combinación de diversos métodos.

Los principales procesos para la decoloración de este tipo de efluentes se pueden dividir en 3, físicos, biológicos y químicos. En las Tablas 6 (tratamientos físicos), y la tabla 7 (tratamientos biológicos) se realiza una breve descripción de cada uno de los tratamientos empleados en la decoloración de efluentes de la industria textil así mismo las ventajas y desventajas que cada uno ellos presentan.

Con respecto a los tratamientos químicos los cuales se verán en la sección siguiente se realizara un pequeño resumen de cada una de las técnicas de tratamiento más empleados en el tratamiento de decoloración de efluentes textiles ya que dentro de estos tratamientos se encuentra el proceso que se desea empleará en este trabajo para la degradación de los colorantes elegidos y es por ello que se ahondara más en ellos, así mismo se describirán las ventajas y desventajas que conllevan este tipo de tratamientos.

Tabla 6 Procesos físicos empleados en el tratamiento de efluentes de la industria textil

(Moeller Chávez, et al., 2013)

Proceso	Descripción	Ventajas	Desventajas
Adsorción	<p>La eficacia del proceso de adsorción está influenciada por una gran variedad de parámetros, entre ellos la interacción entre el colorante y el soporte, superficie específica, tamaño de la partícula, temperatura, pH o tiempo de contacto. La eficacia del método depende en gran medida del tipo de soporte elegido. Se emplean tanto soportes inorgánicos como orgánicos. Los primeros tienen una gran estabilidad mecánica y química, alta superficie específica y alta resistencia a la degradación microbiana. Los soportes orgánicos se generan a partir de fuentes renovables o son residuos industriales.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Los procesos de adsorción generan efluentes de alta calidad. 2. Aplicable a diferentes colorantes (ácidos, básicos, reactivos). 3. Posibilidad de reutilización del agua dentro del proceso. 4. Capacidad de tratamiento del orden de cientos de m³/d. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Son procesos lentos; no selectivos, de manera que hay una competición entre las moléculas del colorante y otros compuestos presentes en el efluente; no destructivos, generándose un residuo que debe ser eliminado. 2. La desorción es un proceso muy difícil y costoso. 3. Los adsorbentes suelen ser caros y en ocasiones requieren un proceso de activación previo.
Coagulación floculación	<p>Este proceso se basa en la adición de polielectrolitos ó floculantes inorgánicos (sales de hierro o aluminio), que forman flóculos con las moléculas de colorante facilitando su eliminación por sedimentación.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Este proceso es eficiente al tener altos porcentajes de remoción de color. 2. El equilibrio del sistema se alcanza en tiempos cortos de 2-4 horas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. El proceso genera lodos que deben ser eliminados. 2. Los mejores rendimientos se logran al aplicar un exceso de coagulante, que aumenta la concentración de contaminante en el efluente. 3. Este proceso no es eficiente para colorantes altamente solubles y el resultado con colorantes azoicos, ácidos, reactivos generalmente no son muy buenos.

<p>Membranas de filtración</p>	<p>Los métodos de tratamiento basados en el empleo de membranas permiten una separación efectiva de las moléculas de colorante y otros compuestos de tamaño mayor al del poro de la membrana seleccionada. Los métodos, tales como microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y la adsorción, son altamente eficientes.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicable a un número amplio de colorantes. 2. Resulta factible con la combinación de procesos biológicos y de oxidación avanzada. 3. La fracción de rechazo de la membrana puede ser incinerada el balance energético del proceso. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Costo elevado. 2. Altos costos energéticos del tren de tratamiento. 3. Generación de lodos tóxicos. 4. Taponamiento de las membranas. 5. Adsorción del colorante sobre la membrana
--------------------------------	--	--	---

Tabla 7 Procesos biológicos convencionales empleados en el tratamiento de efluentes textiles (Moeller Chávez, et al., 2013)

Proceso	Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Aerobios</p>	<p>Pocos estudios han reportado que los colorantes azo pueden ser utilizados por las bacterias aerobias como fuente de carbono y energía. Por lo general, los tratamientos aerobios basados en consorcios de bacterias en sistemas convencionales no son capaces de degradar colorantes procedentes de efluentes textiles Sin embargo se ha conseguido aislar cepas de bacterias que son capaces de degradar algunos colorantes.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Económicos y con una infraestructura disponible en algunos casos. 2. Capacidad de tratamiento del orden de m³/d. Impacto ambiental bajo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. El mecanismo primario de remoción es la adsorción sobre la pared celular. 2. La reducción de la DQO no está correlacionada con la decoloración del efluente. 3. Altos tiempos de retención hidráulica. 4. Inhibición por compuestos recalcitrantes

<p style="text-align: center;">Anaerobios</p>	<p>Este proceso ha sido empleando en gran medida para el tratamiento de colorantes ya que ha demostrado una gran eficiencia de decoloración. La decoloración de compuestos azo mediante este proceso no es considerada específica debido a que diversas cepas pueden romper el enlace azo de manera eficiente. Desde sus investigaciones en 1970 se han reportado trabajos con altas eficiencias de decoloración. Es importante destacar que el tipo de reactor, el tiempo de retención hidráulica, el origen y la estrategia de aclimatación del inóculo, la presencia de mediadores redox, así como el tipo y la concentración de co-sustrato juegan un papel importante en la eficiencia de decoloración.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Posibilidad de aplicación de mediadores redox para mejorar el porcentaje como la velocidad de decoloración. 2. Factibilidad de bio-aumentación de los cultivos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Generación de subproductos tóxicos. 2. Requerimiento de cepas específicas. 3. Bajas remociones de materia orgánica expresada como DQO. 4. Probable efecto recalcitrante de los auxiliares del proceso de tinción. 5. Largos periodos de aclimatación. 6. Los colorantes y otros compuestos refractarios no se mineralizan. 7. Los micronutrientes presentes en las aguas residuales como N y P no se remueven mediante este sistema 8. Los sulfatos dan lugar a sulfuros.
<p style="text-align: center;">Acoplados</p>	<p>Cuando se conocen las bondades, capacidades y limitaciones de diferentes tipos de tratamientos, físicos, químicos y biológicos, es conveniente utilizar las ventajas encontradas en cada uno de ellos y combinarlas en tratamientos que se denominan acoplados. Los tratamientos acoplados, ya sea combinando procesos fisicoquímicos y biológicos o sólo biológicos (anaerobio-aerobios) son una buena alternativa para el tratamiento de estos efluentes.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mineralización completa que a menudo se logra gracias a la acción sinérgica de diferentes organismos. 2. La reducción del enlace azo se puede lograr en las condiciones de reducción en biorreactores anaeróbicos y las resultantes aminas aromáticas incoloras puede ser mineralizada en condiciones aeróbicas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tiempos elevados de residencias en fase anaerobia. 2. Requerimientos de cepas específicas para degradar colorantes específicos. 3. Uso de co-sustratos. 4. Persistencia de las aminas aromáticas.

1.2.8 Procesos de Oxidación avanzada

Los POAs como ya se ha mencionado son procesos de oxidación que involucran frecuentemente la generación y uso de especies químicas altamente reactivas tal como es el caso de los radicales hidroxilos. Estos procesos son de interés académico e industrial, debido a su aplicación en tratamientos de aguas residuales y recuperación de suelos que contienen compuestos orgánicos no biodegradables (Noriega, et al., 2005). El radical hidroxilo es poco selectivo, lo cual resulta conveniente si se desea tratar aguas con múltiples componentes. Estos radicales libres son capaces de convertir por degradación oxidativa los contaminantes presentes en los residuos industriales líquidos (RIL), en sustancias que son inocuas para el medio ambiente.

Dependiendo de la naturaleza de las especies orgánicas son posibles dos tipos de ataque. En el primero la materia orgánica mineraliza, es decir, se convierte en CO_2 y H_2O , como ocurre con alcanos y alcoholes. En el segundo los radicales hidroxilo se adicionan al contaminante, como es el caso de olefinas y compuestos aromáticos (Cabala, 2005).

La versatilidad de los POAs radica en el hecho de existir varias alternativas para la generación de radicales Hidroxilo, como, por ejemplo, la combinación de oxidantes como ozono y/o peróxido de hidrógeno (con UV), con catalizadores como iones metálicos o semiconductores. Los procesos de oxidación avanzada pueden usarse como una etapa previa al tratamiento biológico, para aumentar la biodegradabilidad de las aguas residuales, esto siempre y cuando se generen compuestos intermedios fácilmente degradables por el tratamiento biológico.

Ventajas de los POAs:

- I. No sólo cambian de fase al contaminante (como ocurre en el arrastre con aire o en el tratamiento con carbón activado), sino que lo transforman químicamente.
- II. No se forman subproductos de reacción, o lo hacen en baja concentración.
- III. Generalmente se consigue la mineralización completa (destrucción) del contaminante.
- IV. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies muy fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- V. Usualmente no generan lodos, a excepción del tratamiento Fenton.
- VI. Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten el tratamiento biológico.
- VII. Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pre tratamientos alternativos, como la desinfección.
- VIII. Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.

- IX. En muchos casos, consumen mucho menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración).
- X. Permiten transformar contaminantes refractarios en productos que luego pueden ser depurados por métodos más económicos como el tratamiento biológico.
- XI. Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.
- XII. Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración.

Desventajas de los POAs:

Utilizan reactivos costosos tales como peróxido de hidrógeno u ozono, por lo que debe restringirse a situaciones en las que otros procesos más económicos, como los biológicos, no sean posibles. El máximo potencial se consigue cuando se logra integrar con otros tratamientos para así obtener el más bajo costo. (Rojas, et al., 2005).

1.2.8.1 Reactivo de Fenton

El reactivo de Fenton es una combinación de H_2O_2 y sales de Fe (II). El ion ferroso se oxida a férrico mientras el H_2O_2 produce iones hidróxido y radicales hidroxilo. Estos últimos oxidan el colorante, y el compuesto formado precipita con el ion férrico y compuestos orgánicos (Lin, 1995). Con este método se consiguen altas velocidades de decoloración si las concentraciones de los reactivos implicados son elevadas. Sin embargo, sus principales desventajas son la generación de lodos debida a la floculación de los reactivos con el colorante, el coste asociado al tratamiento de estos lodos y el coste de los reactivos. Eventualmente deberá eliminarse también el hierro empleado (López, et al., 2006).

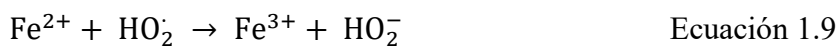
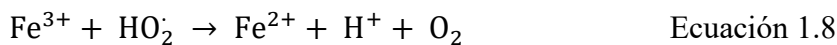
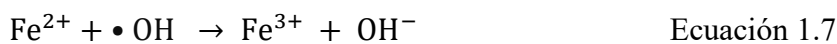
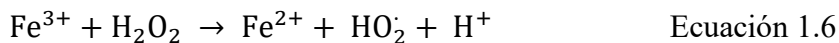
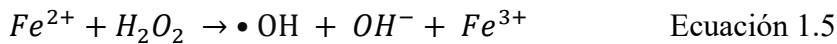
Este proceso puede ser usado en el tratamiento de efluentes industriales con las siguientes acciones:

- I. Eliminación de compuestos orgánicos.
- II. Reducción de la toxicidad.
- III. Mejora de la biodegradabilidad.
- IV. Retiro de DBO/DQO.
- V. Reducción del color.

Mecanismo General

El proceso Fenton consiste en agregar al efluente una cantidad determinada de peróxido de hidrógeno y de ión ferroso, el cual se puede obtener de distintas sales. Se puede dividir en dos etapas de producción de radicales hidroxilo. La primera se denomina Fe^{+2}/H_2O_2 , la cual es rápida, y la segunda se denomina Fe^{+3}/H_2O_2 , donde la oxidación es más lenta que la primera.

Las principales reacciones del proceso son:



Después de la adición de ambos reactivos, el peróxido de hidrógeno se descompone y se forman radicales hidroxilo, como se muestra en la reacción (1.5), la cual es bastante rápida, pero un exceso de iones Fe^{+2} puede producir atrapamiento de los radicales hidroxilos, como lo muestra la reacción improductiva (1.7). A su vez el Fe^{+3} puede ser regenerado mediante las ecuaciones (1.6) y (1.8), pero estas reacciones son muy lentas, siendo este el mayor problema para mantener la cadena redox.

Las condiciones óptimas de operación de este sistema ya fueron descritas en la sección 1.1.3

1.2.8.2 Reactivo Foto-Fenton

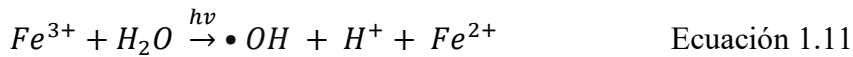
Este proceso de oxidación implica la formación de radicales hidroxilo por fotólisis del peróxido de hidrógeno y reacciones de propagación. El mecanismo más comúnmente aceptado para la fotólisis es la ruptura del enlace O–O, por acción de la radiación ultravioleta para formar dos radicales hidroxilos, tal como se muestra en la reacción (1.10):



Mecanismo general

El proceso de regeneración de los iones ferrosos en el mecanismo Fenton, se ve estimulado en presencia de rayos UV/luz visible, como se ve en la reacción (1.11), la cual muestra la regeneración fotoquímica

de los iones ferrosos por foto-reducción de iones férricos. La nueva generación de iones ferrosos, reacciona con peróxido de hidrógeno generando nuevamente radicales hidroxilos y iones férricos con lo que el ciclo continúa.



Las condiciones óptimas de operación de este sistema ya fueron descritas en la sección 1.1.3

1.2.8.3 Ozonización

Las técnicas de ozonización consisten en la destrucción de compuestos en base a la elevada capacidad oxidativa del ozono. La reacción de oxidación es rápida, se pueden tratar altos caudales, no se generan residuos ni lodos y se obtiene un efluente incoloro y con baja DQO, de manera que es apto para su vertido al medio ambiente. Sin embargo, debe comprobarse la toxicidad de cada efluente concreto, pues en algunos casos los compuestos generados tienen mayor carácter tóxico que los colorantes de partida. Otra gran desventaja de la ozonización es su corto tiempo de vida media, en torno a 20 min, lo cual repercute significativamente en el coste del proceso (Robinson, et al., 2001).

1.2.8.4 Oxidación fotoquímica

Este método se basa en la combinación de la radiación UV con otros compuestos, tales como H₂O₂ o catalizadores como TiO₂. Los rayos UV activan dichos compuestos y los hacen capaces de oxidar los tintes. Este método presenta una elevada eficacia y no genera lodos ni olores. Sin embargo, las necesidades de una fuente de radiación, el coste, la lentitud del proceso y las dificultades de implementación a gran escala hacen que este método sea poco efectivo a nivel industrial (Kunz, et al., 2002).

1.2.8.5 Oxidación electroquímica

Los procesos electroquímicos se basan en la hidrólisis del colorante mediante un potencial o corriente controlada o a través de agentes secundarios generados electrolíticamente.

Los procesos son limpios, operan a baja temperatura y en muchos casos no requieren la adición de productos químicos a las aguas residuales. El alto consumo de energía y la generación de compuestos secundarios por reacciones paralelas disminuyen la potencialidad del método (Guaratini & Zanoni, 2000).

1.2.8.6 Otros procesos químicos

Se han propuesto otros muchos métodos de eliminación de colorantes de las aguas, ya sean basados en procesos oxidativos con NaClO o mediante la formación de complejos insolubles con ligandos (López, et al., 2006).

Los procesos avanzados de oxidación se caracterizan por su elevada reactividad del agente oxidante y por su baja selectividad; por lo cual en un proceso de producción puede ser una desventaja, es, sin embargo, una característica deseable en el caso de la eliminación de contaminantes de aguas residuales. Por otro lado, se trata de procesos que utilizan reactivos costosos, tales como el H₂O₂ o O₃, por lo que su utilización debe restringirse a situaciones en las que otros procesos más baratos, como los biológicos, no sean posibles.

CAPÍTULO 2

2.1 JUSTIFICACIÓN

Los procesos de elaboración de productos textiles consisten en un gran número de operaciones unitarias que utilizan diversas materias primas como algodón, lana, fibras sintéticas y tintes o colorantes. En la etapa del proceso conocida como de “tintorería y acabados” se generan efluentes líquidos que contienen contaminantes de muy diversa naturaleza, entre ellos sales inorgánicas, almidón, peróxidos, EDTA, tensoactivos, enzimas, surfactantes, colorantes, metales y otros compuestos orgánicos de variada estructura (Gutarra, 2001). Una fracción importante de estos contaminantes son los residuos de colorantes textiles. Estos compuestos químicos son poco biodegradables, por lo que presentan gran persistencia en el medio ambiente y una alta resistencia a los métodos de tratamiento biológicos convencionales. Además, la fuerte coloración que imparte a cuerpos de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en corrientes de agua, por lo que su presencia debe ser controlada (Marcano, 1990).

Actualmente la reglamentación en materia de vertidos de agua para su incorporación a las redes de saneamiento o de su descarga directa al entorno es más estricta, esto obliga a que este sector industrial adecúe la calidad de sus efluentes mediante la implantación de métodos de tratamiento adecuados. La puesta en marcha de procesos de depuración innovadores, eficaces y fiables, acompañados de una creciente política de reciclado de aguas, es una solución que atrae un creciente interés.

El tratamiento mediante los Procesos de Oxidación Avanzada se perfila como un método adecuado para aguas contaminadas con colorantes. Consisten en una oxidación química que, con los factores óptimos, descritos en la sección 1.1.2, se puede llegar hasta la mineralización completa de los contaminantes (Kim & Vogelpohl, 2004).

El propósito del presente trabajo es encontrar las condiciones óptimas para la degradación eficiente de los colorantes NA52 y RD82 mediante el proceso Foto-Fenton, con la intención de que los resultados encontrados apoyen a la implementación de dicho tratamiento en los efluentes textiles antes de su descarga al ambiente.

2.2. OBJETIVOS

2.2.1 GENERAL

- Estudiar la cinética de degradación de los colorantes negro ácido 52 y rojo disperso 82 utilizando el proceso Foto-Fenton.

2.2.3 ESPECÍFICOS

- Determinar la cantidad de agente oxidante óptimo para la degradación de los colorantes NA52 y RD82.
- Evaluar el efecto de la concentración de catalizador para el proceso Foto-Fenton.
- Evaluar distintas fuentes de luz para la selección del fotocatalizador del proceso Foto-Fenton.
- Obtener las ecuaciones cinéticas que describan el comportamiento de la degradación de los colorantes NA52 y RD82.

CAPÍTULO 3

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se optó por realizar un diseño de experimentos de 3 factores con diferentes niveles (3 Niveles H_2O_2 ; 3 Niveles pH; 2 Niveles FeSO_4) para la degradación del colorante NA52.

- ✓ H_2O_2 : Las concentraciones de H_2O_2 que se utilizaron en este diseño de experimento fue a tres niveles diferentes los cuales fueron elegidos con respecto a la relación estequiometrica. El primer nivel con respecto a la relación estequiometrica (1:1), el segundo nivel con respecto a la mitad de H_2O_2 que es necesaria para oxidar la mitad de NA52 (1:2) y el tercer nivel con respecto a el doble de la concentración de H_2O_2 que se utiliza teóricamente para oxidar el NA52 (2:1).
- ✓ FeSO_4 : La concentración de FeSO_4 que se utilizó para este trabajo fue a dos niveles los cuales corresponde a la relación que existe entre la relación estequiometrica del FeSO_4 que reacciona 1:1 con el H_2O_2 y el segundo nivel que se selecciono fue la mitad de la concentración de FeSO_4 que reacciona con el H_2O_2 (1:2).
- ✓ pH: Los niveles de pH utilizados en este apartado son 3. El primer nivel corresponde a un pH = 3 este pH fue elegido ya que se ha demostrado en numerosos trabajos que el proceso Foto-Fenton tiene un mejor desempeño en pH \approx 3, el segundo nivel corresponde a un pH = 5 este valor se eligió para poder determinar qué tan riguroso tiene que ser el control del pH en este proceso, y de ser posible determinar si este pH es lo suficientemente bajo para poder llevar a cabo el proceso de degradación y por último el tercer nivel se optó por un pH = 7 este valor de pH se eligió para poder determinar el comportamiento del proceso Foto-Fenton en pH neutro.

El diseño de experimentos para el colorante NA52 se muestra en la tabla 8.

De igual manera que se realizó un diseño de experimentos para el colorante NA52 se construyó un diseño de experimentos para la degradación del colorante RD82 tabla 9, un diseño de 2 factores con diferentes niveles (3 Niveles H_2O_2 ; 2 Niveles FeSO_4)

- ✓ H_2O_2 : Las concentraciones de H_2O_2 que se utilizaron en este diseño de experimento fue a tres niveles diferentes los cuales fueron elegidos con respecto a la relación estequiometrica. El primer nivel con respecto a la relación estequiometrica (1:1), el segundo nivel con respecto a la mitad de H_2O_2 que es necesaria para oxidar la mitad de RD82 (1:2) y el tercer nivel con respecto a el doble de la concentración de H_2O_2 que se utiliza teóricamente para oxidar el RD82 (2:1).

- ✓ FeSO_4 : La concentración de FeSO_4 que se utilizó para este trabajo fue a dos niveles los cuales corresponde a la relación que existe entre la relación estequiometrica del FeSO_4 que reacciona 1:1 con el H_2O_2 y el segundo nivel que se selecciono fue la mitad de la concentración de FeSO_4 que reacciona con el H_2O_2 (1:2).

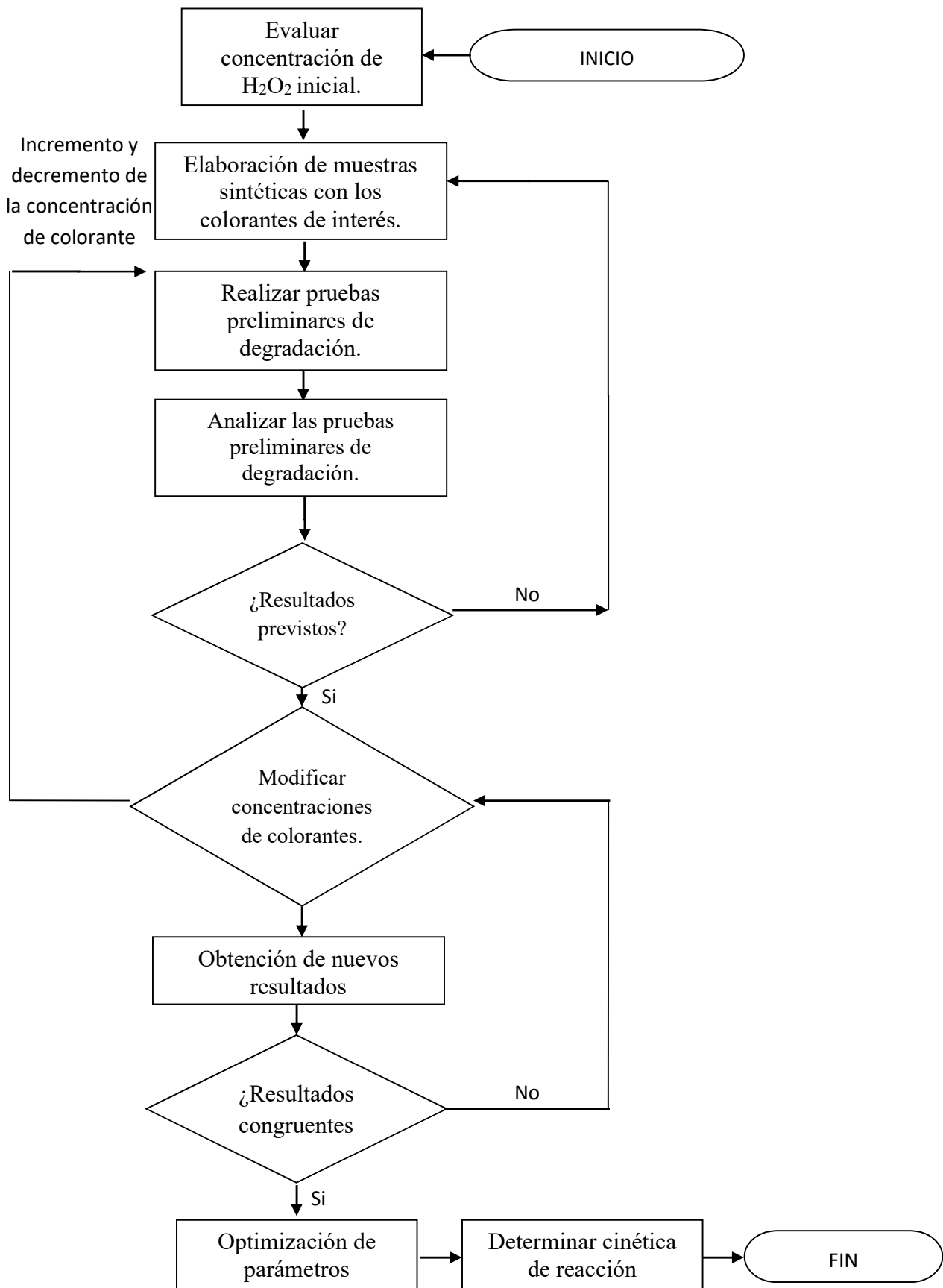
Tabla 8 Diseño de experimento de 3 factores (3 Niveles H_2O_2 ; 3 Niveles pH; 2 Niveles FeSO_4)

[H_2O_2]:[NA52] Relación estequiométrica	[FeSO_4]:[H_2O_2]					
	1 mM			0.5 mM		
	pH			pH		
	3	5	7	3	5	7
1:1	R1	R1	R1	R1	R1	R1
	R2	R2	R2	R2	R2	R2
	R3	R3	R3	R3	R3	R3
1:2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
	R2	R2	R2	R2	R2	R2
	R3	R3	R3	R3	R3	R3
2:1	R1	R1	R1	R1	R1	R1
	R2	R2	R2	R2	R2	R2
	R3	R3	R3	R3	R3	R3

Tabla 9 Diseño de experimento de 2 factores (3 Niveles H_2O_2 ; 2 Niveles FeSO_4)

[H_2O_2]:[RD82] Relación estequiométrica	[FeSO_4]:[H_2O_2]	
	1 mM	0.5 mM
1:1	R1	R1
	R2	R2
	R3	R3
1:2	R1	R1
	R2	R2
	R3	R3
2:1	R1	R1
	R2	R2
	R3	R3

3.2. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL



3.3 MATERIAL Y MÉTODOS

En este apartado se presentan los procedimientos experimentales, así como la descripción de los reactivos químicos y los equipos utilizados para la degradación del colorante negro ácido 52 (NA52) y rojo disperso 82 (RD82).

En la tabla 10 se presentan los reactivos químicos que fueron utilizados para la degradación de NA52 y el RD82, preparados con agua destilada y desionizada. Y en la tabla 11 se hace referencia al equipo de laboratorio utilizado.

Tabla 10 Reactivos químicos utilizados en el proceso Fenton y Foto-Fenton

Reactivo	Formula	Peso Molecular (g/mol)	Marca
Peróxido de Hidrógeno	H ₂ O ₂	34.04	MEYER
Permanganato de Potasio	KMnO ₄	158.04	GOLDEN BELL
Sulfato Ferroso Heptahidratado	FeSO ₄ •7H ₂ O	277.91	GOLDEN BELL
Ácido Sulfúrico	H ₂ SO ₄	98.08	MEYER
Oxalato de sodio	Na ₂ C ₂ O ₄	133,9985	MEYER
Agua destilada			HYCEL
Negro Ácido 52	C ₂₀ H ₁₂ N ₃ NaO ₇ S	461.38	INDUSTRIAL
Rojo Disperso 82	C ₂₁ H ₂₁ N ₅ O ₆	439.421	INDUSTRIAL

Tabla 11 Equipos utilizados en laboratorio para la degradación del NA52 y RD82.

Equipo	Marca	Tipo/Característica
Espectrofotómetro UV-Vis	HACH	DR6000
Balanza analítica	ADAM	PW254
Parrilla eléctrica	LABTECH	Hotplate Stirrer
Potenciómetro	JENWAY	3510

3.3.1 Pruebas de control para la degradación de los colorantes NA52 y RD82

Se realizaron controles experimentales para cada colorante con el propósito de observar el comportamiento de la degradación en función de los siguientes factores:

1. Estabilidad del colorante en solución: Debido a que no se cuenta con la información sobre la autodegradación de estos dos colorantes, es importante observar que los cambios en la concentración del colorante, no están dados por la naturaleza misma de los colorantes.
2. Irradiación de luz UV: Es importante observar que los cambios en la concentración del colorante, no están dados por la degradación fotoquímica.
3. Agitación: Es importante observar que los cambios en la concentración del colorante, no están dados por el suministro de aire en el reactor.
4. Irradiación de luz UV más agitación: Estos dos factores combinados pueden generar especies químicas oxidantes como lo son el ozono y radicales libres, por lo que es importante observar que los cambios en la concentración del colorante, no están dados por la acción de otros oxidante que no sean el H_2O_2 .
5. Irradiación de luz UV agitación y catalizador: Como se había mencionado en el punto anterior la radiación de luz UV acoplado a la agitación pueden generar especies químicas oxidantes, que a su vez pueden interactuar con el $FeSO_4$ provocando la degradación de los colorantes.

3.3.2 Valoración del H_2O_2

Se utilizó permanganometría como método de análisis para poder determinar la concentración de H_2O_2 . Se utilizó una solución de permanganato de potasio ($KMnO_4$) 0.1 N y una solución ácida 1:5 de H_2SO_4 . La Figura 4 muestra los pasos a seguir para la valoración del agua H_2O_2 .

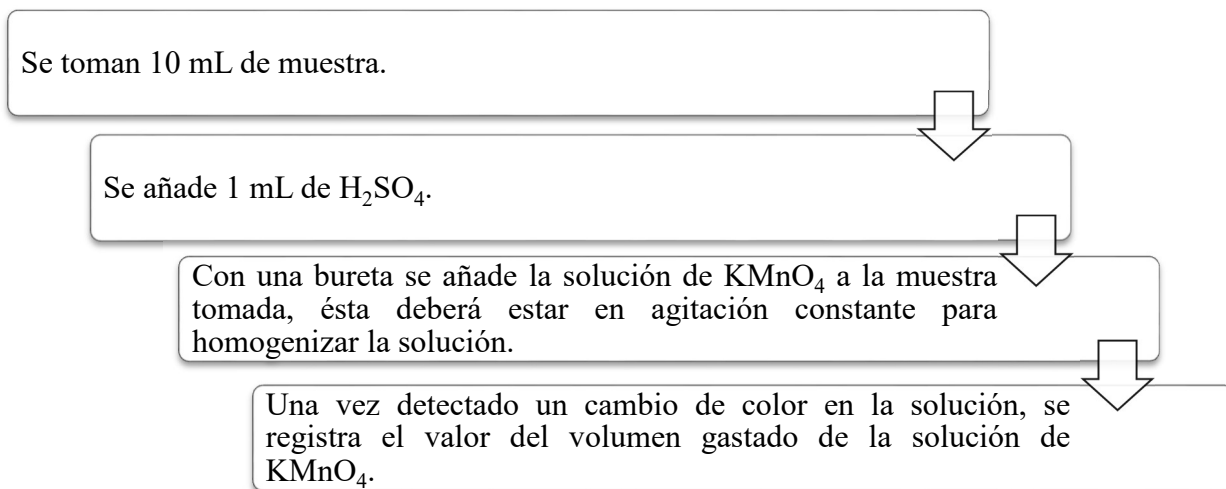


Figura 4 Metodología utilizada para la valoración de H₂O₂

Es importante señalar que el H₂O₂ tiene que ser analizado antes de cada prueba ya que este reactivo posee la particularidad de descomponerse si no se almacena de una manera adecuado lo cual puede afectar de manera significativa los experimento para la degradación de los colorantes.

Dependiendo del volumen gastado de KMnO₄, se determina la concentración molar del H₂O₂ obtenida en la solución analizada usando la siguiente fórmula.

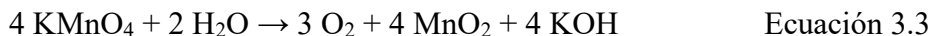
$$[H_2O_2] = \frac{(mL \text{ de } 0.1 \text{ N } KMnO_4 \text{ gastados})(1.7)}{(mL \text{ de muestra por titular})(P.M. \text{ de } H_2O_2)} \times \text{Factor de dilución} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

El factor de dilución es el número total de volúmenes al que se lleva un volumen dado de muestra original, es decir, el factor de dilución también corresponde a la división de la concentración de la muestra original sobre la concentración de la muestra diluida. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$fd = \frac{\text{Volumen total}}{\text{Volumen de la muestra}} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

En este apartado es importante señalar que el permanganato de potasio es un patrón secundario es por ello que el modo de preparación de esta solución es de vital importancia es por ello que la metodología utilizada para esta solución será descrita a continuación:

El KMnO_4 no puede utilizarse como patrón primario debido a que aún el KMnO_4 para análisis contiene siempre pequeñas cantidades de MnO_2 . Además, cuando se prepara la solución de permanganato de potasio, el agua destilada puede contener sustancias orgánicas que pueden llegar a reducir el KMnO_4 a MnO_2 y el mismo KMnO_4 es capaz de oxidar al agua según la siguiente ecuación:



Esta reacción es catalizada por el mismo MnO_2 que se va formando, debido al calor, la luz, la presencia de ácidos o bases y sales de Mn, pero si se toman las debidas precauciones en la preparación de la solución y en la conservación de la misma, la reacción puede hacerse razonablemente lenta. Una vez que se disuelve el KMnO_4 se debe calentar la solución para acelerar la oxidación de la materia orgánica, con la consiguiente precipitación de MnO_2 y posteriormente enfriar para que se coagule el MnO_2 , inicialmente coloidal. A continuación, debe separarse el MnO_2 para evitar que catalice la descomposición del KMnO_4 . Dicha separación se realiza por filtración con lana de vidrio o con crisol de vidrio, nunca con papel de filtro.

La solución filtrada debe guardarse en frascos oscuros color ámbar y de ser posible con tapón esmerilado para evitar la acción de la luz y la contaminación con polvo atmosférico. La solución así preparada y conservada, es estable durante algunos meses, ésta se debe valorar con un patrón primario reductor tal como el $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ anhidro o el As_2O_3 , etc. El más utilizado es el $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ el que se puede adquirir con un muy elevado grado de pureza y que al disolverse en medio ácido (H_2SO_4) se transforma en $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ según la siguiente reacción:



Con un cambio en el número de oxidación de: $\text{Mn}^{7+} + 5\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}$

Por lo que el peso equivalente de permanganato de potasio resulta:

$$\frac{158 \text{ g mol de KMnO}_4}{5.0 \frac{\text{gmol}}{\text{eq.g. de cargas electrónicas}}} = 31.6 \text{ eq. g.} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Para obtener resultados concordantes y estequiométricos debe seguirse una metodología operativa muy estricta, que consiste en:

- I. La temperatura de la solución debe ser aproximadamente de 80 °C (una ebullición incipiente) pues a temperaturas menores la reacción es muy lenta y a temperaturas mayores, ya en franca ebullición se produce la descomposición del $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ en CO y H_2O .
- II. Por tratarse de un proceso autocatalítico (el catalizador son los iones de Mn^{++} que se forman), al comienzo de la valoración, la concentración de los iones de Mn^{++} es muy baja y la reacción es muy lenta, pero luego de agregar algunos mililitros del KMnO_4 la concentración aumenta y la reacción se hace instantánea.
- III. En la valoración con KMnO_4 0.1 N el indicador es el mismo KMnO_4 pues bastan unas gotas más para dar una coloración rosada. Este color del punto final desaparece lentamente por la reducción gradual del KMnO_4 por la presencia de iones Mn^{++} y Cl^- , por lo tanto, debemos esperar que tal coloración persista por espacio de treinta segundos.

Técnica:

Preparación de una solución 0.1 N. de KMnO_4

- Pesar en una balanza la cantidad de KMnO_4 (3.16 eq. g./litro, de solución 0.1 N) necesario para la preparación de la solución, teniendo en cuenta el poder oxidante del permanganato de potasio en medio ácido.
- Se calienta a ebullición suave durante 30 minutos, se deja enfriar, se filtra a través de lana de vidrio, se pasa a un matraz aforado y se completa el volumen propuesto con agua hervida y fría.
- Se enjuaga un frasco ámbar con un poco de la solución, y luego se la envasa.

Valoración de la solución de KMnO_4

- Pesar cierta cantidad de $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ anhidro con la mayor exactitud posible y colocarla en un matraz Erlenmeyer en cualquier cantidad de agua, agregar 1.0 mL. de H_2SO_4 . Calentar a punto de ebullición y valorar con el KMnO_4 contenido en la bureta, regulando las cantidades de KMnO_4 agregado de modo que éste reaccione totalmente antes de agregar una nueva porción. Se toma como punto final cuando aparece un color rosado persistente (30segundos). Repetir dos o más valoraciones, y si los valores del cálculo de la normalidad ($N_{\text{KMnO}_4} = \text{Masa de Patrón primario} / \text{meq. de patrón primario por el volumen consumido del KMnO}_4$) son coincidentes promediarlos.

A continuación, se muestra una serie de imágenes las cuales compilan los pasos a seguir de la técnica antes mencionada (Figura 5).

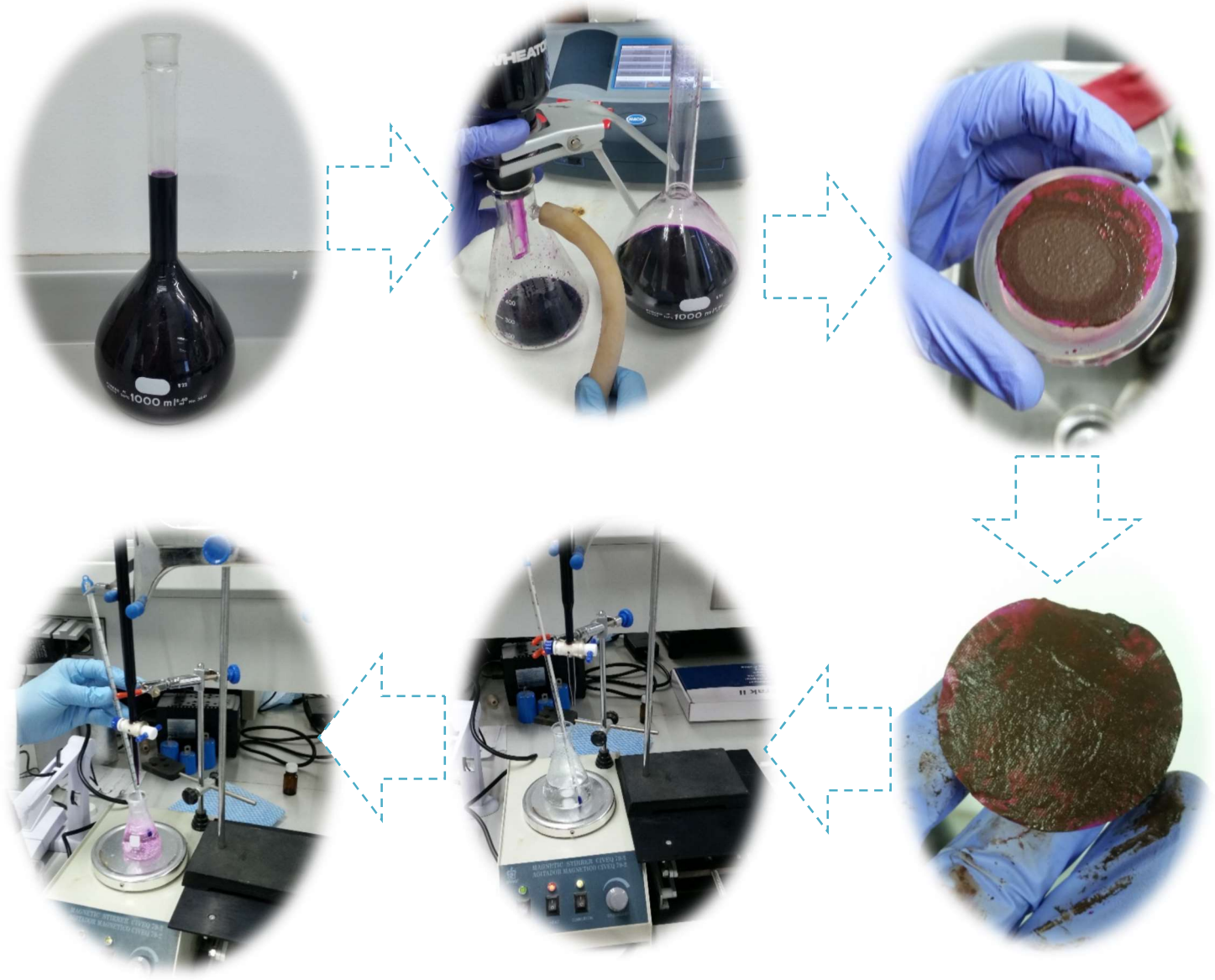


Figura 5 Compendio de imágenes de la preparación de la solución de KMnO_4

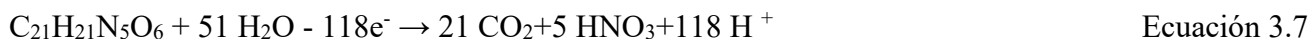
A continuación, se muestra los cálculos estequiométricos para los colorantes NA52 y RD82 reaccionando con el agente oxidante H_2O_2 , estos valores teóricos fueron la referencia que sirvió para vislumbrar la cantidad de H_2O_2 que se utilizó como punto de partida para los experimentos de degradación de los colorantes textiles antes mencionados.

3.3.3 Cálculo estequimétrico de la degradación del colorante rojo disperso 82

Para calcular la concentración del oxidante utilizado en el tratamiento Foto-Fenton se tomaron en cuenta una serie de reacciones que se generan al poner en contacto el colorante en polvo directamente con agua, generando una serie de productos derivados de la reacción, ver ecuación 3.6



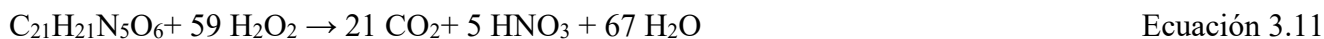
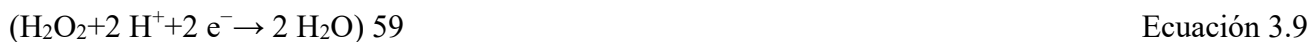
Al poner en contacto el colorante RD82 de fórmula condensada $C_{21}H_{21}N_5O_6$ con agua H_2O , se obtiene una serie de productos, se propone que para lograr la decoloración de un mol de colorante, se requiere eliminar $118 e^-$, como se muestra en la reacción 3.7



Tomando en cuenta la oxidación del colorante, el carbono orgánico forma dióxido de carbono CO_2 , y el nitrógeno ácido nítrico HNO_3 . El peróxido de hidrógeno es usado como oxidante para la degradación del colorante textil RD82, ver ecuación 3.8



Para lograr la degradación del colorante RD82 se requieren desprender $118 e^-$. La reacción que indica este proceso es la relación estequiométrica, la cual se muestra en la ecuación 3.6, para ello se requiere multiplicar la reacción 3.8 por 59 y eliminar estos electrones (ecuación 3.9 y 3.10) al sumar la reacción 3.10 con la reacción 3.6 da como resultado, que para la degradación de 1 Mol de colorante textil RD 82 se necesitan 59 Moles de H_2O_2 , ver reacción 3.11



3.3.4 Cálculo estequiométrico de la degradación del colorante negro ácido 52

De igual manera que se realizó para el colorante RD82 se debió calcular la concentración del oxidante utilizado en el tratamiento Foto-Fenton se tomaron en cuenta una serie de reacciones que se generan al poner en contacto el colorante en polvo directamente con agua, generando una serie de productos derivados de la reacción, ver ecuación 3.12



Al poner en contacto el colorante NA52 de fórmula condensada $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{N}_3\text{O}_7\text{S}$ con agua H_2O , se obtiene una serie de productos, se propone que para lograr la decoloración de un mol de colorante, se requiere eliminar 100e^- , como se muestra en la reacción 3.13



Tomando en cuenta la oxidación del colorante, el carbono orgánico forma dióxido de carbono CO_2 , y el nitrógeno ácido nítrico HNO_3 . El peróxido de hidrógeno es usado como oxidante para la degradación del colorante textil NA52, ver reacción (3.14)



Para lograr la degradación del colorante NA52 se requieren desprender 100e^- . La reacción que indica este proceso es la relación estequiométrica, la cual se muestra en la ecuación 3.12, para ello se requiere multiplicar la reacción 3.14 por 50 y eliminar estos electrones (ecuación 3.15 y 3.16) al sumar la reacción 3.16 con la reacción 3.12 da como resultado, que para la degradación de 1 Mol de colorante textil NA 52 se necesitan 50 Moles de H_2O_2 , ver reacción 3.17





Ecuación 3.17

Utilizando las ecuaciones 3.13 y 3.17 se puede conocer la relación estequiométrica que existe entre los colorantes RD82 y NA52 con el H_2O_2 . Esta relación es un buen punto de partida para poder llevar a cabo las pruebas de degradación con la cantidad de oxidante adecuado ya que se ha demostrado que un exceso de H_2O_2 causa una disminución de la eficiencia en el proceso de degradación y un déficit de este provocara que no se lleve a cabo una degradación completa.

3.3.5 Curva de calibración del rojo disperso 82

Las lecturas de absorbancia de cada una de las concentraciones denotan puntos en el grafico en función de la concentración, la tabla 14 muestra cada una de las concentraciones, así como su respectiva absorbancia, estos puntos deben ser ajustados por el método de mínimos cuadrados a una línea recta para establecer una curva de calibración que relacione la absorbancia con la concentración, véase la figura 9.

Tabla 12 Absorbancias obtenidas del colorante RD82 a 0.1 mM

Concentración (mM)	Absorbancia 595 nm (abs)
0.1	0.516
0.08	0.413
0.06	0.306
0.04	0.203
0.02	0.104
0.01	0.06
0.005	0.027

La absorbancia en función de la concentración describe puntos en el grafico que dan una tendencia creciente a una línea recta, esta es la curva de calibración, tal y como lo muestra la siguiente figura 9.

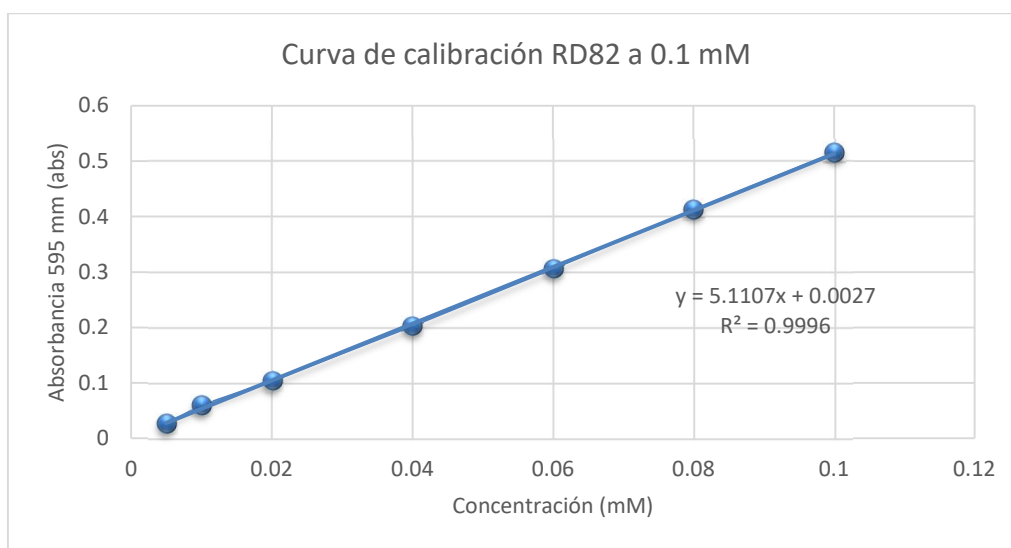


Figura 6 Curva de calibración del colorante RD82 a una longitud de onda de 595 nm.a 0.1 mM

La línea sólida que se muestra la figura 9, representa el ajuste por mínimos cuadrados de los datos de la relación concentración y absorbancia, con un factor de correlación de 0.9996, muy cercano y confiable a la correlación máxima que es de 1, por lo que dicha función es de utilidad para calcular las concentraciones correctas de colorante en la experimentación, véase la ecuación (3.18).

$$y = 5.1107x + 0.0029$$

Ecuación 3.18

Coefficiente de correlación $R^2 = 0.9996$

Esta ecuación se emplea en la transformación de las absorbancias a concentración (mM) del colorante durante el proceso Foto-Fenton, para ello es necesario despejar la variable x de la ecuación 3.18, obteniendo de esta forma una nueva ecuación que determina la concentración del RD82, ver ecuación (3.19).

$$x = \frac{y - 0.0029}{5.1107}$$

Ecuación 3.19

Dónde:

x= Concentración del colorante en mM

y= Absorbancia de la muestra

3.3.6 Curvas de calibración del negro ácido 52

Las lecturas de absorbancia de cada una de las concentraciones denotan puntos en el gráfico en función de la concentración, la tabla 15 y 16 muestra cada una de las concentraciones obtenidas a 1 mM y 0.1 mM respectivamente, así como su respectiva absorbancia, estos puntos deben ser ajustados por el método de mínimos cuadrados a una línea recta para establecer una curva de calibración que relacione la absorbancia con la concentración, véase la figura 10 y figura 11.

Tabla 13 Absorbancias obtenidas del colorante NA52 a 1 mM

Concentración (mM)	Absorbancia 577 nm (abs)
1	6.228
0.8	5.128
0.6	3.854
0.4	2.564
0.2	1.294
0.1	0.674
0.05	0.346

Tabla 14 Absorbancias obtenidas del colorante NA52 a 0.1 mM

Concentración (mM)	Absorbancia 577 nm (abs)
0.1	0.6223
0.08	0.5152
0.06	0.3851
0.04	0.2562
0.02	0.1291
0.01	0.0676
0.005	0.0341

Las absorbancias obtenidas en función de la concentración describen puntos en el grafico que dan una tendencia creciente a una línea recta tanto la que se realizó a 1 mM como a 0.1 mM, estas son las curvas de calibración obtenidas y se muestran en las siguientes figuras 10 y 11.

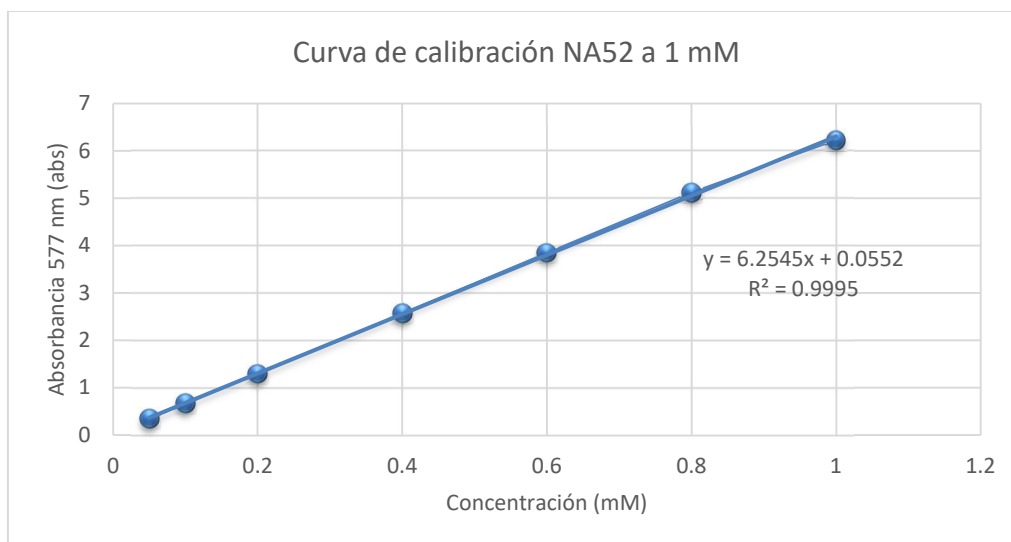


Figura 7 Curva de calibración del colorante NA52 a una longitud de onda de 577 nm a 1 mM.

La línea sólida que se muestra la figura 11, representa el ajuste por mínimos cuadrados de los datos de la relación concentración y absorbancia, con un factor de correlación de 0.9808, muy cercano y confiable a la correlación máxima que es de 1, por lo que dicha función es de utilidad para calcular las concentraciones correctas de colorante en la experimentación, enseguida véase la ecuación (3.20).

$$y = 6.2545x - 0.0552$$

Ecuación 3.20

Coefficiente de correlación $R^2 = 0.9995$

Esta ecuación se emplea en la transformación de las absorbancias a concentración (mM) del colorante durante el proceso Foto-Fenton, para ello es necesario despejar la variable x de la ecuación 3.20, obteniendo de esta forma una nueva ecuación que determina la concentración del NA52 a 1mM, ver ecuación (3.21).

$$x = \frac{y - 0.0552}{6.2245}$$

Ecuación 3.21

Dónde:

x= Concentración del colorante en mM

y= Absorbancia de la muestra

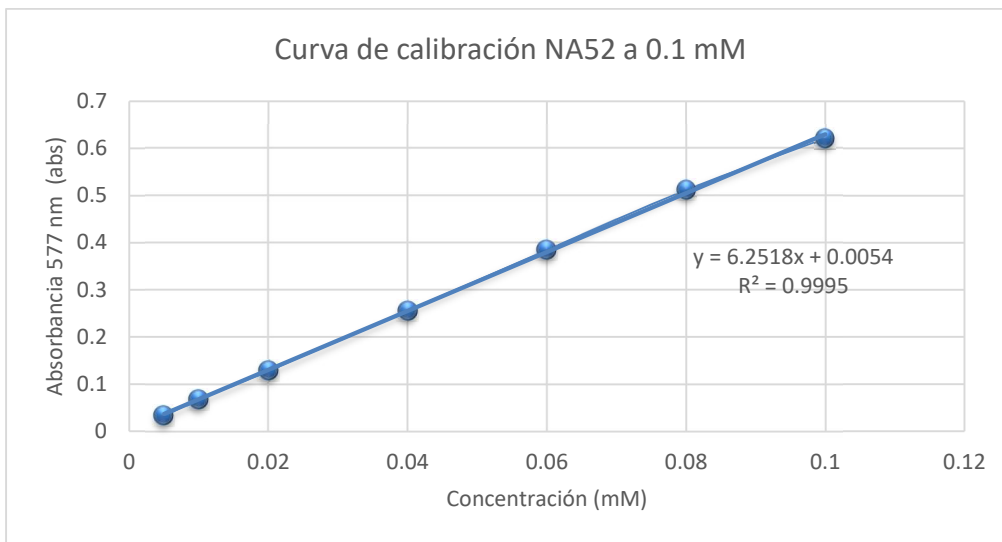


Figura 8 Curva de calibración del colorante NA52 a una longitud de onda de 577 nm a 0.1 mM

La línea sólida que se muestra la figura 11.3, representa el ajuste por mínimos cuadrados de los datos de la relación concentración y absorbancia, con un factor de correlación de 0.9995, muy cercano y confiable a la correlación máxima que es de 1, por lo que dicha función es de utilidad para calcular las concentraciones correctas de colorante en la experimentación, enseguida véase la ecuación (3.22).

$$y = 6.2518x - 0.0554$$

Ecuación 3.22

Coefficiente de correlación $R^2 = 0.9995$

Esta ecuación se emplea en la transformación de las absorbancias a concentración (mM) del colorante durante el proceso Foto-Fenton, para ello es necesario despejar la variable x de la ecuación 3.22, obteniendo de esta forma una nueva ecuación que determina la concentración del NA52 a 0.1 mM, ver ecuación (3.23).

$$x = \frac{y - 0.0552}{6.2245}$$

Ecuación 3.23

Dónde:

x= Concentración del colorante en mM

y= Absorbancia de la muestra

3.3.7 Descripción de las ecuaciones para el cálculo de DTO, DQO_t y COT_t

Cualquier compuesto orgánico teóricamente puede ser oxidado hasta la obtención final de productos estables como H₂O, CO₂, NH₃ y SO₄²⁻. La cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación se denomina demanda teórica de oxígeno (DTO). La DTO puede ser calculada considerando las relaciones estequiométricas tal y como se muestra en las siguientes ecuaciones (Menéndez Gutiérrez & Pérez Olmo, 2007).

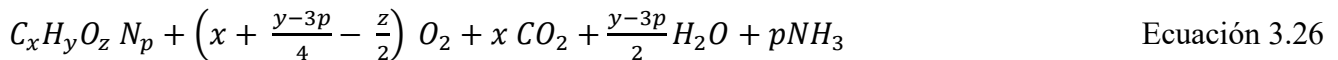


$$DTO = \frac{4x+y+2z}{MM} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

donde:

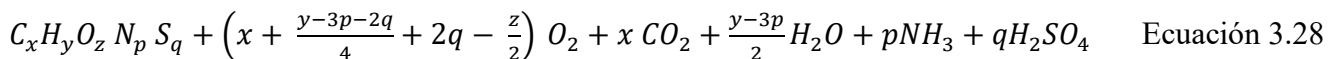
MM: Masa molecular del compuesto.

Para compuestos que contienen N en su estructura, la ecuación para la demanda teórica de oxígeno es:



$$DTO = \frac{(4x+y-3p-2z)8}{MM} \quad \text{Ecuación 3.27}$$

Si además el azufre participa en su composición,



$$DTO = \frac{4x+y+6q-3p-2z}{MM} \quad \text{Ecuación 3.29}$$

La demanda química de oxígeno brinda una medida más real de la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación de los compuestos orgánicos a CO₂ y H₂O, de acuerdo con las ecuaciones 3.24, 3.26 y 3.28, cuando se utiliza un oxidante fuerte.

La demanda química de oxígeno (DQO) indica el contenido de materia orgánica del cuerpo de agua; se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable mediante un agente químico oxidante, generalmente el dicromato de potasio es el agente oxidante por su característica de oxidar casi

todos los compuestos orgánicos (con excepción de los ácidos grasos de bajo peso molecular), en un medio ácido y a alta temperatura. Es muy usado para medir la materia orgánica en las aguas residuales urbanas e industriales.

El mejor método para determinar la DQO es aquel que arroja valores iguales o cercanos a la DTO. Actualmente este método es el estándar del dicromato. Este método utiliza una solución de dicromato de potasio cuya concentración molar de equivalente es 0.25, en 50 % de ácido sulfúrico. Bajo estas condiciones, con sulfato de plata como catalizador, la mayoría de los compuestos son oxidados entre 90 y 100 % (Menéndez Gutiérrez & Pérez Olmo, 2007).

No obstante, algunos compuestos no son oxidados o lo son solo parcialmente cuando se utiliza el método estándar con dos horas de reflujo. Esto se ha comprobado en algunas bases fuertes nitrogenadas como las metilaminas, etilaminas, piridinas y sus derivados.

Actualmente el COT es utilizado como una medida del contenido de sustancias orgánicas en el agua. Sin embargo, este parámetro no brinda información acerca del oxígeno necesario para la oxidación de estas.

En el orden teórico existe una relación entre la DTO y DQO, así como entre la DTO y el COT (Chudoba, et al., 1986). Por tanto, existe también una relación entre la DQO y el COT. En el mismo plano teórico cabe suponer que la relación DTO/COT varía entre los límites de cero, cuando los compuestos orgánicos no son oxidables por el dicromato, hasta 5.33, que es la relación para el metano según la ecuación:



El valor límite de 5.33 para la relación DTO/COT es también válido para mezclas de compuestos, aunque en la medida que aumenta en complejidad la composición del residual, la DTO va perdiendo su interés práctico y la relación DTO/COT llega a ser inoperante (Menéndez Gutiérrez & Pérez Olmo, 2007).

La fórmula que se utilizara para determinar el COT_t es (Gómez, et al., 2017):

$$COT_t = \frac{(\text{Numero de carbonos}) (PM \text{ Carbono})}{\text{Peso molecular del contaminante}} \times \left[\text{Conc. contaminante} \left(\frac{mg}{L} \right) \right] \quad \text{Ecuación 3.31}$$

3.3.8 Calculo de la estequiometria para el DQO_t para los colorantes NA52 y RD82

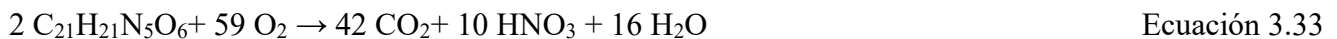
Una vez descritos los conceptos de DTO, DQO_t y COT_t y mostradas las ecuaciones, es necesario generar la nueva relación estequiometrica que guardan los colorantes NA52 y RD82 en función de la cantidad teórica de oxígeno que es necesaria para oxidar dichos colorantes, las cuales se muestran a continuación:

Para el colorante negro acido 52:



Esta ecuación describe que teóricamente para cada mol de colorante textil negro acido 52 es necesario utilizar 25 moles de O₂.

Para el colorante rojo disperso 82:



Esta ecuación describe que teóricamente para cada mol de colorante textil rojo disperso 82 es necesario utilizar ½ (59) moles de O₂

Estas ecuaciones serán utilizadas más adelante para poder calcular la DQO_t que se necesita para poder oxidar los colorantes teóricamente, en función de las absorbancias obtenidas para cada uno de los experimentos realizados en las mejores condiciones de operación.

La fórmula que se utilizará para determinar el DQO_t es (Gómez, et al., 2017):

$$DQO_t = \frac{(\text{Numero de } O_2) (PM O_2)}{\text{Peso molecular del contaminante}} \times \left[\text{Conc. contaminante} \left(\frac{mg}{L} \right) \right] \quad \text{Ecuación 3.34}$$

Para llevar a cabo la determinación del porcentaje de remoción de DQO_t y COT_t se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$R_{DQO_t} (\%) = \frac{(DQO_{ti} - DQO_{tf})}{DQO_{ti}} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.35}$$

$$R_{COT_t} (\%) = \frac{(COT_{ti} - COT_{tf})}{COT_{ti}} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.36}$$

3.3.9 Preparación de soluciones

En este apartado se describe el procedimiento para preparar cada una de las soluciones utilizadas en la experimentación.

La industria textil desecha gran cantidad de agua contaminada con una elevada coloración provenientes de las diversas operaciones que conforman el proceso de teñido, para simular la coloración generada por industria textil, fueron preparadas diferentes soluciones de los colorantes rojo disperso 82 y negro ácido 52 (con agua destilada) a concentraciones de 0.1 mM, y 1 mM respectivamente.

3.3.9.1 Preparación de la solución del colorante Rojo disperso 82

Se pesaron 0.0659115 g de colorante RD82 y se disolvieron en agua de la llave, aforando esta solución en un matraz de 1500 mL, de esta manera se obtuvo una disolución de colorante en agua a una concentración de 0.1 mM, posteriormente se realizaron disoluciones a partir de esta concentración inicial.

3.3.9.2 Preparación de la solución del colorante Negro ácido 52

Se pesaron 0.69207 g de colorante NA52 y se disolvieron en agua de la llave, aforando esta solución en un matraz de 1500 mL, de esta manera se obtuvo una disolución de colorante en agua a una concentración de 1 mM, posteriormente se realizaron disoluciones a partir de esta concentración inicial.

De la misma manera para preparar la solución del colorante a una concentración de 0.1 mM se pesó 0.069207 g y se disolvió en agua de la llave, aforando esta solución en un matraz de 1500 mL.

3.3.9.3 Agua destilada a pH~3

Como blanco de medida para el espectrofotómetro y para otras aplicaciones en las pruebas experimentales, se preparó una solución de agua destilada a pH~3, la cual se obtuvo disolviendo ácido sulfúrico (H_2SO_4) en agua destilada, en un matraz aforado de 250 mL, se coloraron 2.5 mL de ácido sulfúrico concentrado (0.1 M) usando una pipeta de 5 mL, se adicionaron al matraz que contenía la pequeña cantidad de agua destilada y posteriormente se aforó a 250 mL con agua destilada, llevando a cabo todo este proceso en el interior de la campana de extracción.

3.3.9.4 Solución de sulfato de hierro como catalizador (solución madre)

La teoría señala al sulfato de hierro como un importante catalizador, que optimiza, acelera y mejora la producción de iones hidroxilo a partir del peróxido de hidrógeno. En presencia de esta sal, el peróxido de hidrógeno actúa de manera más eficaz en la degradación de la materia orgánica. Se prepararon 50 mM de FeSO_4 + 0.1 M de H_2SO_4 , para esto se pesaron 3.475 g de FeSO_4 y se disolvieron en un pequeño volumen de agua destilada en un matraz aforado de 250 mL, posteriormente se adicionaron 1.34 mL de H_2SO_4 [18.57 M] y se aforo el resto del volumen.

3.3.9.5 Solución de peróxido de hidrógeno a concentración 2.2 M

Partiendo de una concentración de 11 M de peróxido de hidrógeno, se llevó a cabo una dilución de 5 mL del mismo compuesto en 25 mL de agua, para lograr obtener una concentración de 2.2 M de peróxido de hidrógeno, dilución que se hizo debido a que adicionar el volumen deseado de peróxido a 11 M resulta demasiado difícil por la cantidad tan pequeña en volumen que esta representa, es decir, si se usara peróxido de hidrógeno a 11 M el volumen a adicionar al reactor sería de 0.053 mL volumen muy pequeño, pero si se utiliza peróxido de hidrógeno a 2.2 M el volumen a adicionar sería de 0.3 mL, volumen que puede ser adicionado con una pipeta de 1 mL.

3.3.9.6 Curvas de calibración para los colorantes rojo disperso 82 y negro ácido 52

En busca de los intervalos óptimos de las absorbancias características de los colorantes textiles rojos disperso 82 y negro ácido 52 se realizaron las lecturas de las absorbancias de 7 diferentes concentraciones y 6 diferentes concentraciones respectivamente tal y como se muestra en las tablas 12 y 13.

Tabla 15 Volúmenes utilizados para la curva de calibración para el RD 82 a partir (0.1 mM) y 25 mL.

Concentración de colorante (mM)	Volumen de 0.1 mM de colorante (mL)
0.1	25
0.08	20
0.06	15
0.04	10
0.02	5
0.01	2.5
0.005	1.25



Figura 9 Soluciones utilizadas en la curva de calibración del RD 82

Tabla 16 Volúmenes utilizados para la curva de calibración para el NA 52 a partir (1 mM) y 25 mL.

Concentración de colorante (mM)	Volumen de 0.1 mM de colorante (mL)
1	25
0.8	18.750
0.6	12.500
0.4	6.250
0.2	3.125
0.1	1.562
0.05	0.781



Figura 10 Soluciones utilizadas en la curva de calibración del NA 52

3.3.10 Pruebas con diversas lámparas de luz: Uv, lámpara de luz blanca y luz led

Se realizaron diversos experimentos con diferentes tipos de lámparas tal y como se muestra en la figura 8 para poder determinar cuál de ellas es la que generaba mayor cantidad de radicales hidroxilo, los modelos de las lámparas son descritos en la imagen mencionada anteriormente. Los resultados de dichas pruebas están expuestos en el anexo A.



Figura 11 Diversas lámparas utilizadas para la evaluación del foto-reactor.

A) TECNOLITE F15T8D B) GENERAL ELECTRIC G15T8 C) RAISETEC RT-LEDT-9W D) TIRA DE LED JWJ JLTL-5050 E) LUMIACTION FL8GER F) INSETRONIC-200 F10T9/BL

3.3.11 Determinación de la concentración del colorante, DTO, DQO_t y COT_t del colorante NA52

En esta sección se muestran las tablas 52,55,58,61,64 y 67 y las figuras 47,51,55,59,63 y 67 que representan la concentración del colorante en los experimentos que mostraron mayor porcentaje de remoción de color (> 80%), los cuales se obtuvieron a partir de las absorbancias de la sección 4.1.7 (Degradación del colorante textil negro ácido 52) y de las ecuaciones de la sección 4.1.4 (Curvas de calibración del negro ácido 52), más concretamente de la ecuación generada a partir de la regresión lineal de la curva de calibración del colorante NA52 a 0.1Mm (ecuación 4.18). Así mismo de las tablas antes mencionadas se graficó el porcentaje de remoción del colorante NA52 para cada uno de los experimentos utilizando la ecuación 4.32 obteniendo así las figuras 48,52,56,60,64 y 68.

$$R_{NA52} (\%) = \frac{(Conc.NA52_i - Conc.NA52_f)}{Conc.NA52_i} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.37}$$

Obtenida la concentración de este colorante, se calculó la DQO_t con las ecuaciones 4.27 y 4.29, generando las tablas 53,56,59,62,65 y 68 y las figuras 49,53,57,61,65 y 69. La ecuación 4.27 describe la relación estequiométrica que existe entre la cantidad teórica de oxígeno requerido y la oxidación completa con el colorante NA52, la ecuación 4.29 representa el resultado de la Demanda Química Teórica de Oxígeno.

Las tablas 54,57,60,63,66 y 69 y figuras 50,54,58,62,66 y 70 muestran los resultados del COT_t del colorante NA52 a partir de los cálculos de la concentración del colorante, utilizando la ecuación 4.26, y para la determinación de DTO se utilizó la ecuación 4.24.

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los colorantes RD82 y NA52. Se analizaron los gráficos obtenidos y las lecturas realizadas en el espectrofotómetro, interpretando los resultados y determinado la eficiencia de estas pruebas.

4.1.1 Pruebas control para el colorante textil negro ácido 52

En esta sección se presentan, las tablas y las figuras los resultados obtenidos de las pruebas de control para la degradación del colorante NA52 tal y como se planteó en la sección 3.1 diseño de experimentos.

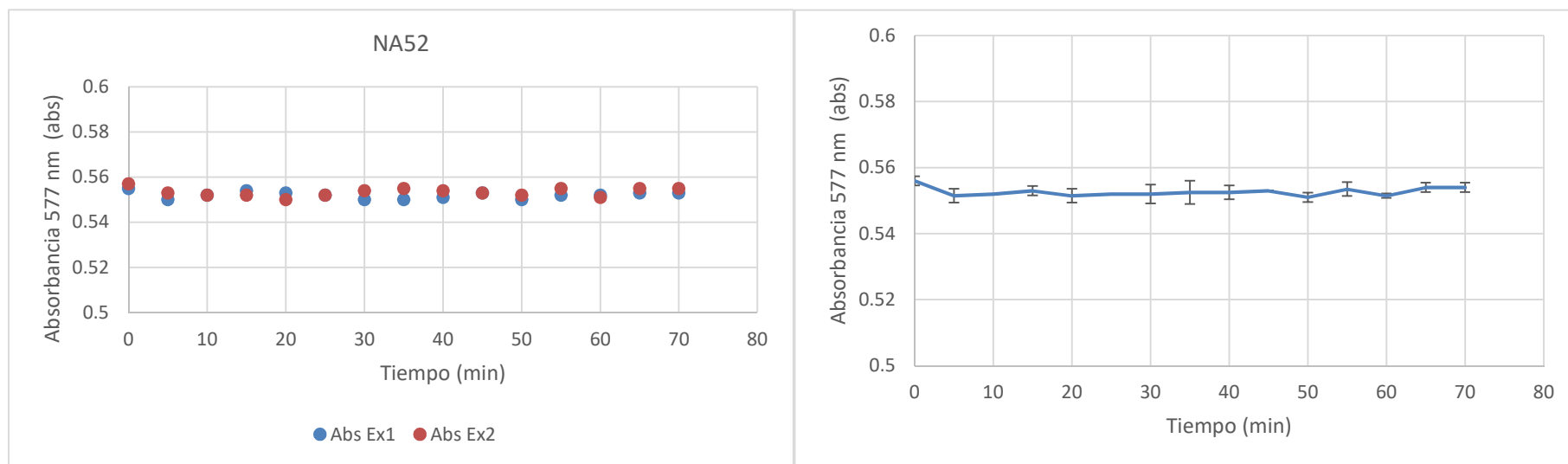


Figura 12 Gráficos de la estabilidad del colorante NA52 en solución.

Se observa en la tabla 17 y en la figura 12 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante NA52 al estar en solución.

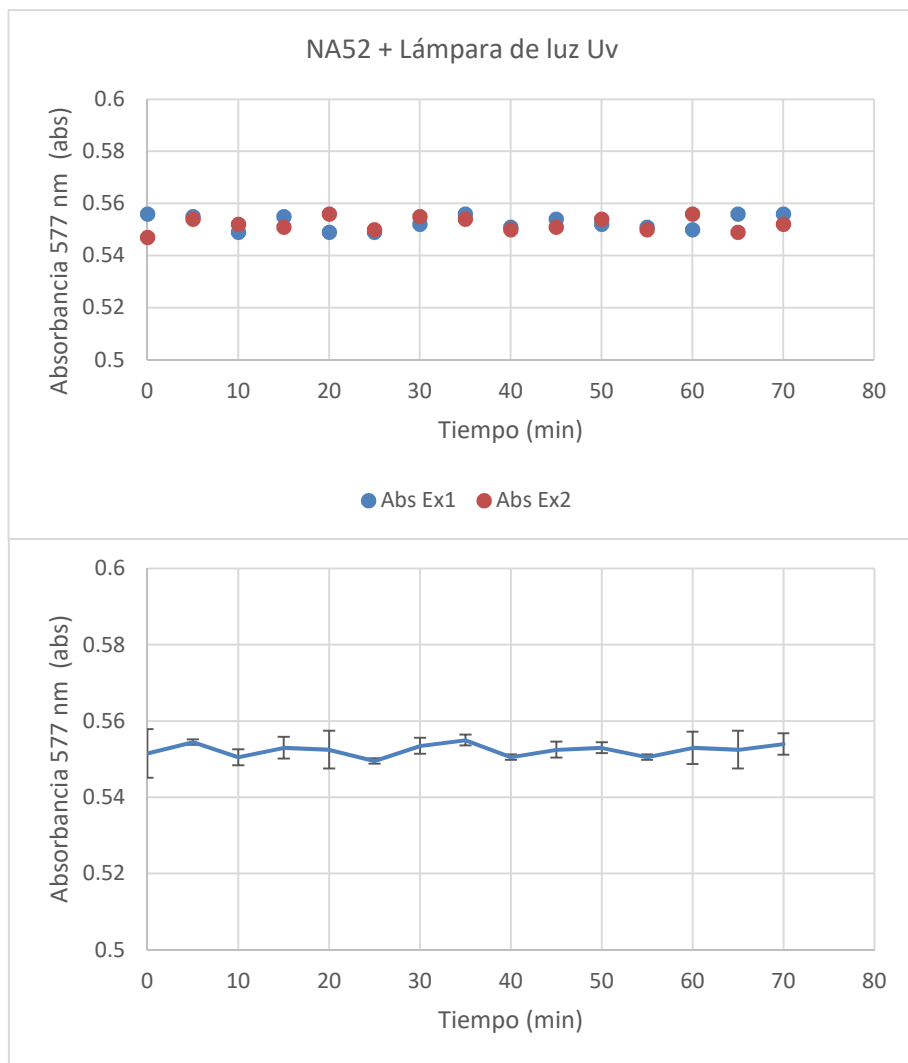


Figura 13 Gráficos del colorante NA52 más lámpara de luz Uv

Se observa en la tabla 18 y en la figura 13 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante NA52 al estar en solución expuesto a la radiación de la lámpara de luz UV.

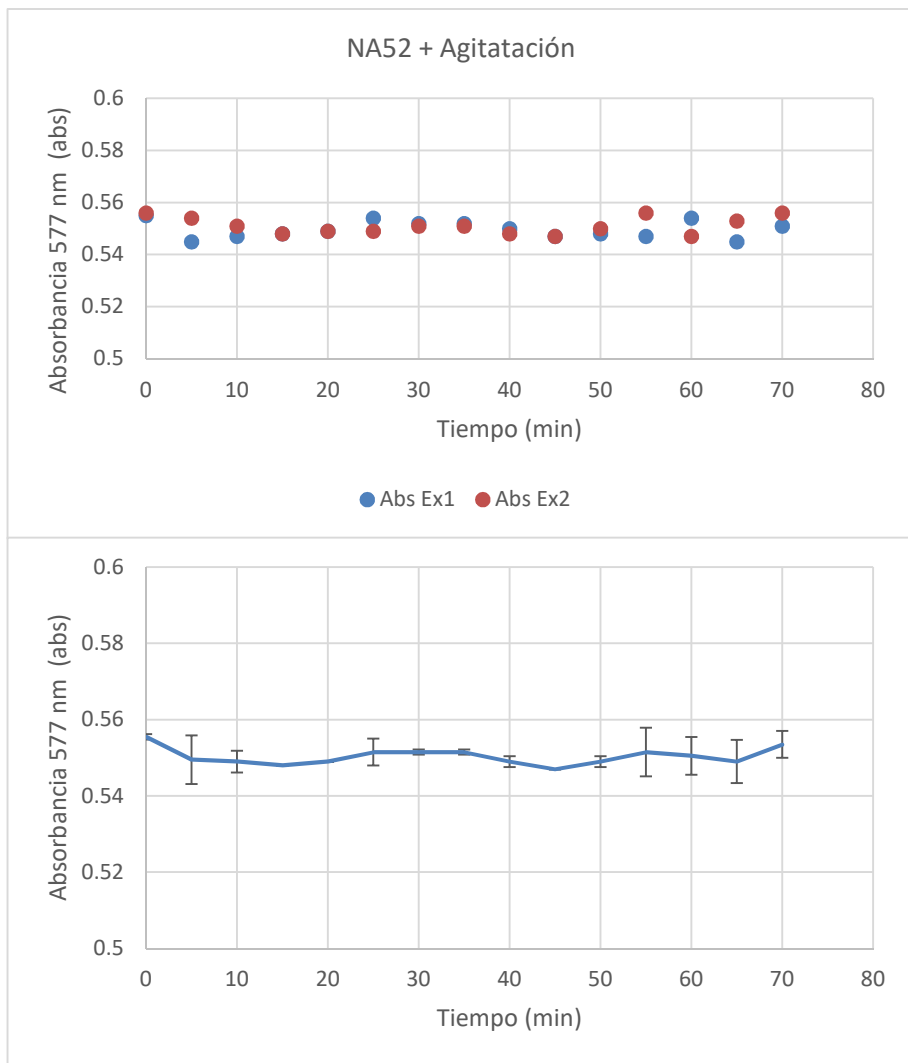


Figura 14 Gráficos del colorante NA52 más agitación

Se observa en la tabla 19 y en la figura 14 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante NA52 al estar en solución y expuesto a agitación con aire.

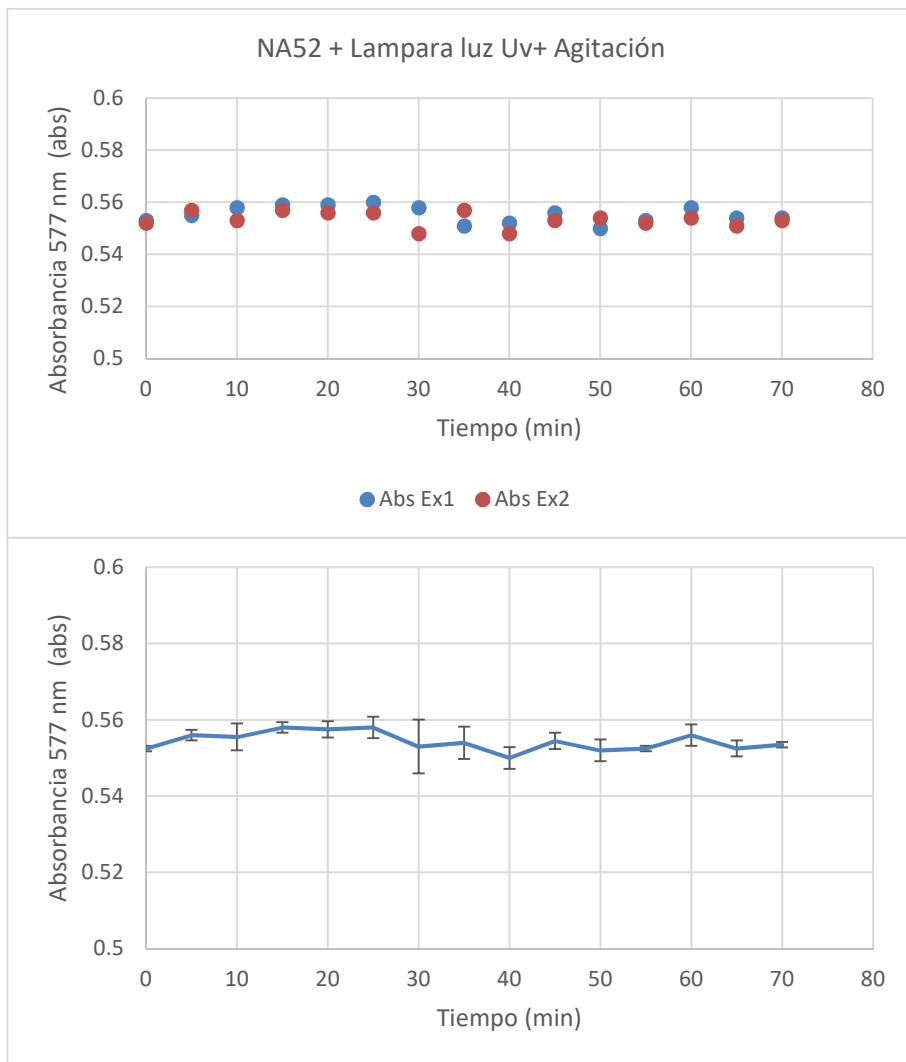
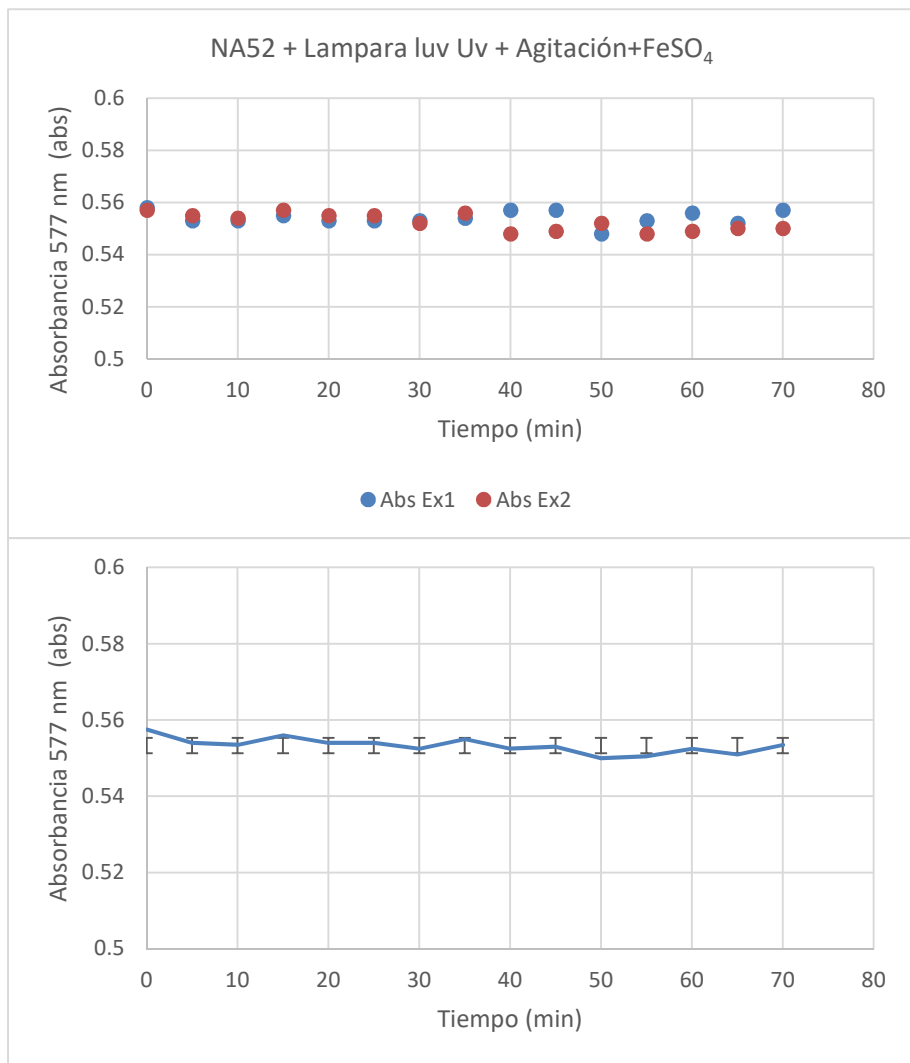


Figura 15 Gráficos del colorante NA52, lámpara de luz Uv mas agitación

Se observa en la tabla 20 y en la figura 15 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante NA52 al estar en solución, expuesto a agitación con aire e irradiado a luz UV.



Se observa en la tabla 21 y en la figura 16 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante NA52 al estar en solución, expuesto a agitación con aire, irradiado a luz UV y agregado el catalizador FeSO₄.

Figura 16 Gráficos del colorante NA52, lámpara de luz Uv, agitación más FeSO₄

4.1.2 Pruebas control para el colorante textil rojo directo 82

En esta sección se presentan, las tablas 11.27 a la 11.31, y en las figuras 11.28 a 11.32 los resultados obtenidos de las pruebas de control para la degradación del colorante RD82 tal y como se planteó en la sección 3.1 diseño de experimentos.

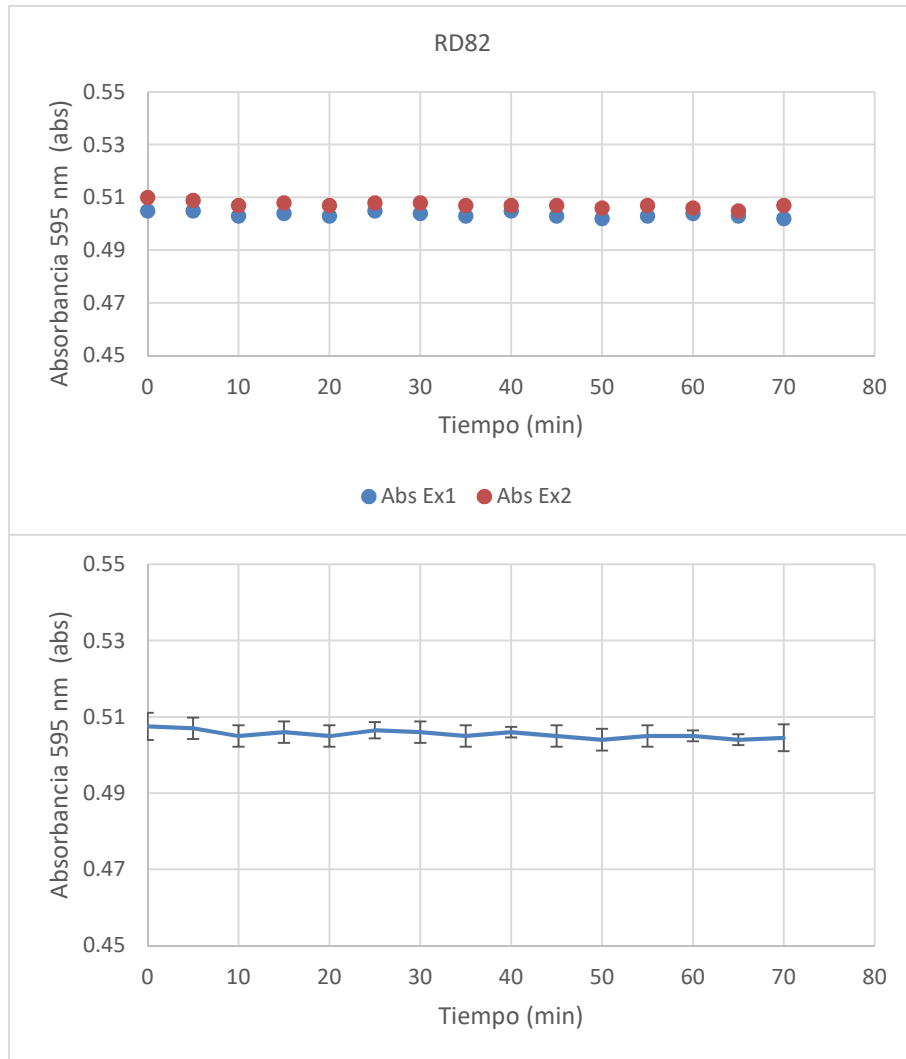


Figura 17 Gráficos de la estabilidad del colorante RD82 en solución.

Se observa en la tabla 41 y en la figura 36 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante RD82 al estar en solución.

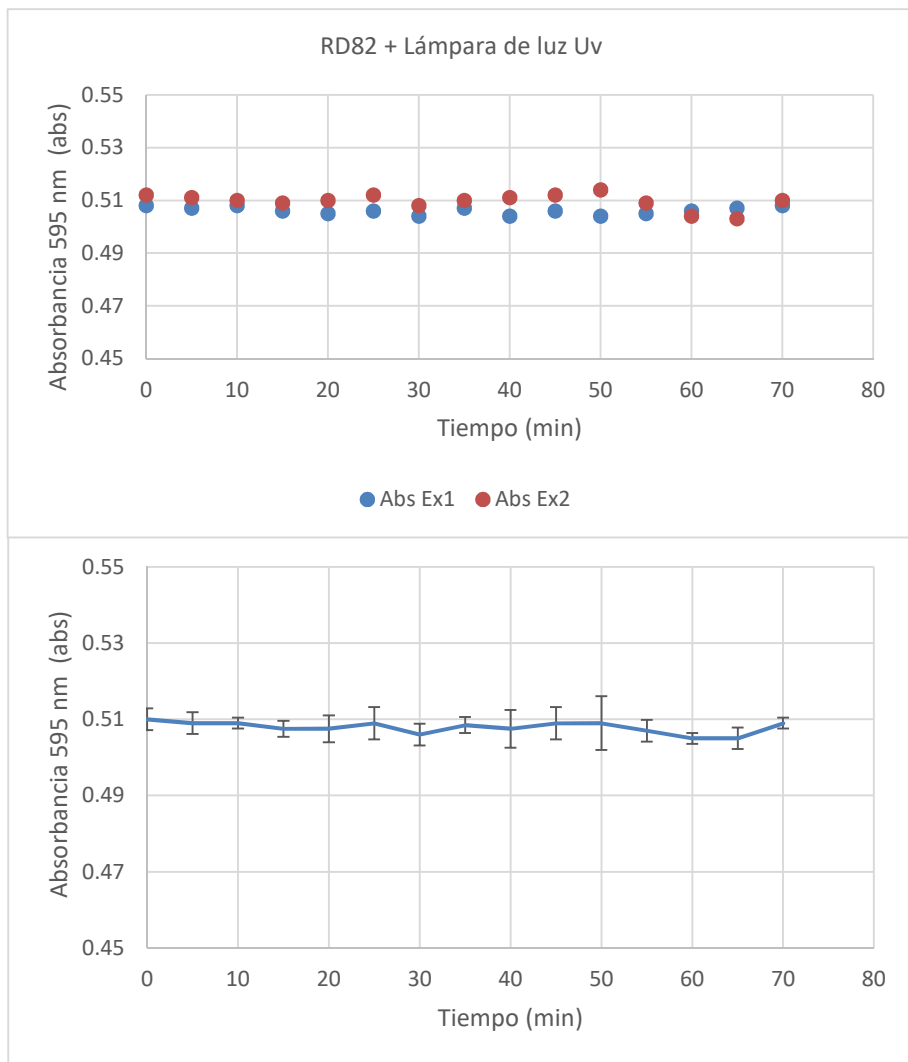
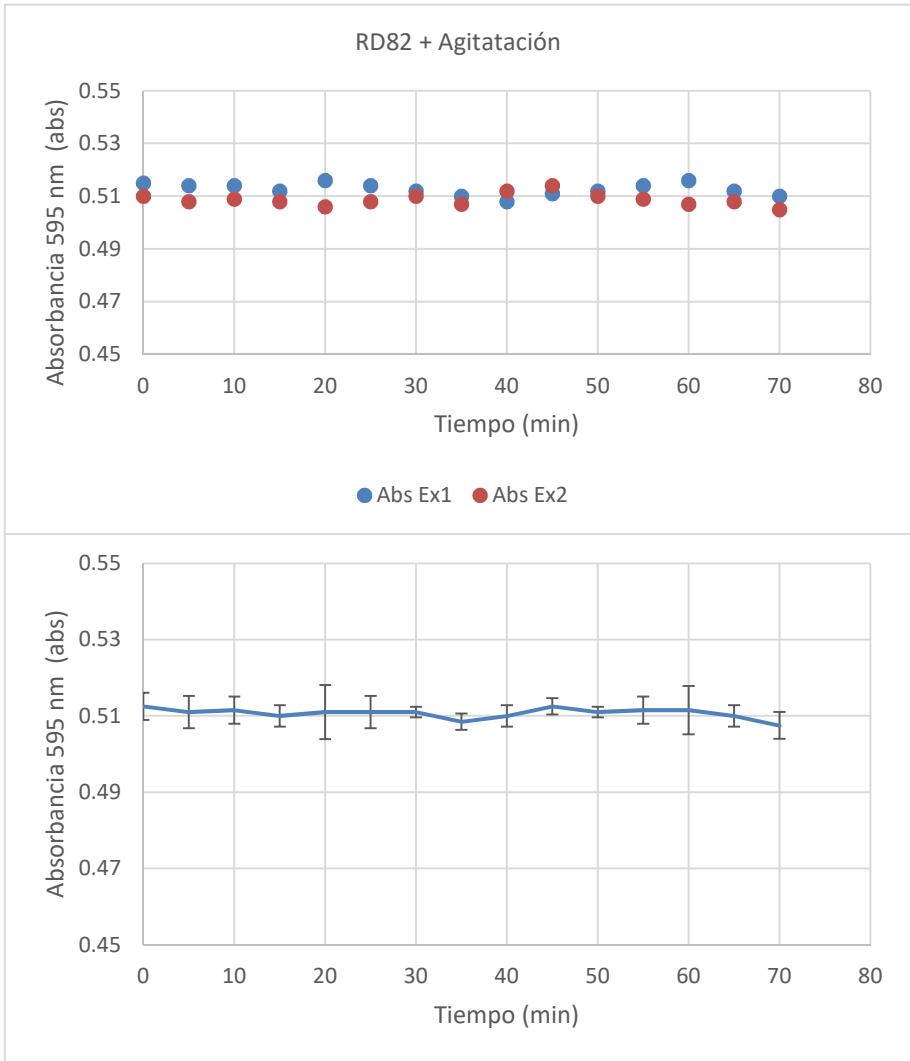


Figura 18 Gráficos del colorante RD82 más lámpara de luz Uv

Se observa en la tabla 42 y en la figura 37 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante RD82 al estar en solución expuesto a la radiación de la lámpara de luz UV.



Se observa en la tabla 43 y en la figura 38 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante NA52 al estar en solución y expuesto a agitación con aire.

Figura 19 Gráficos del colorante RD82 más agitación

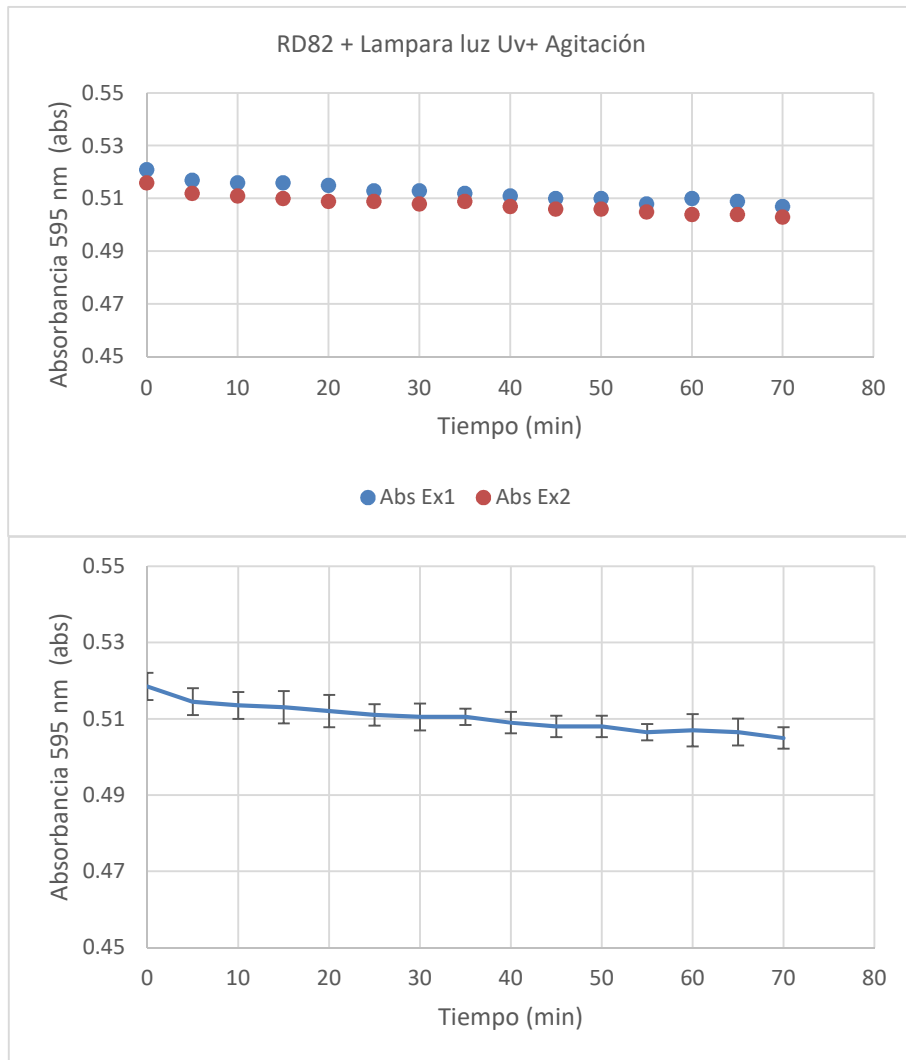


Figura 20 Gráficos del colorante RD82, lámpara de luz Uv mas agitación

Se observa en la tabla 44 y en la figura 39 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante NA52 al estar en solución, expuesto a agitación con aire e irradiado a luz UV.

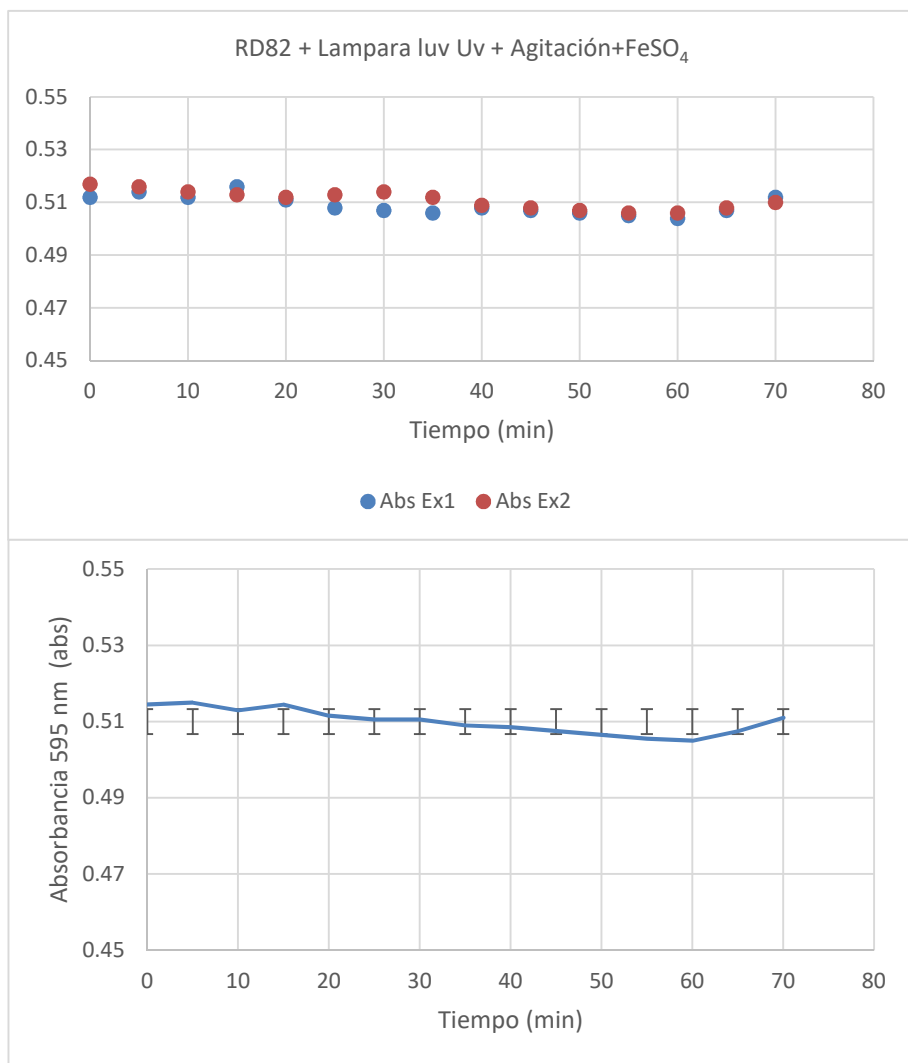


Figura 21 Gráficos del colorante RD82, lámpara de luz Uv, agitación más FeSO₄

Se observa en la tabla 45 y en la figura 40 que no existen cambios significativos en la concentración del colorante RD82 al estar en solución, expuesto a agitación con aire, irradiado a luz UV y agregado el catalizador FeSO₄.

4.1.3 Graficas de concentración, remoción de colorante y ecuaciones cinéticas NA52

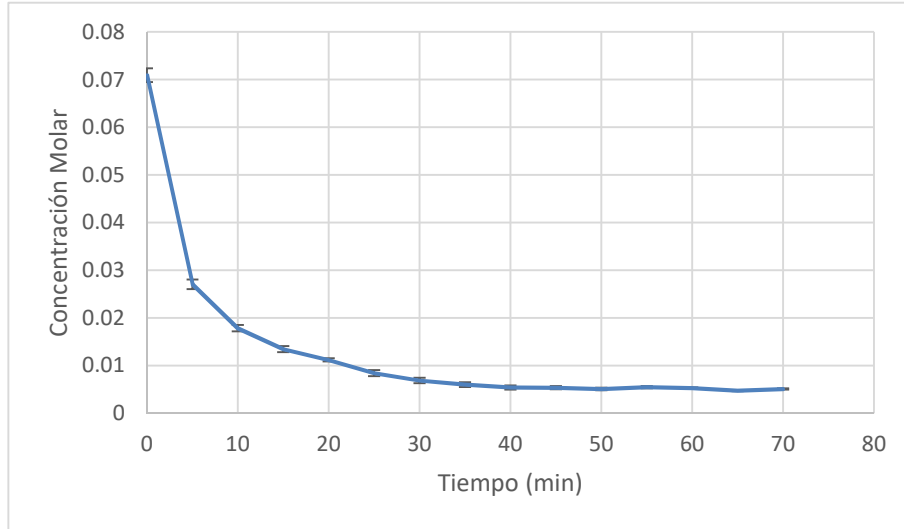


Figura 22 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla E1

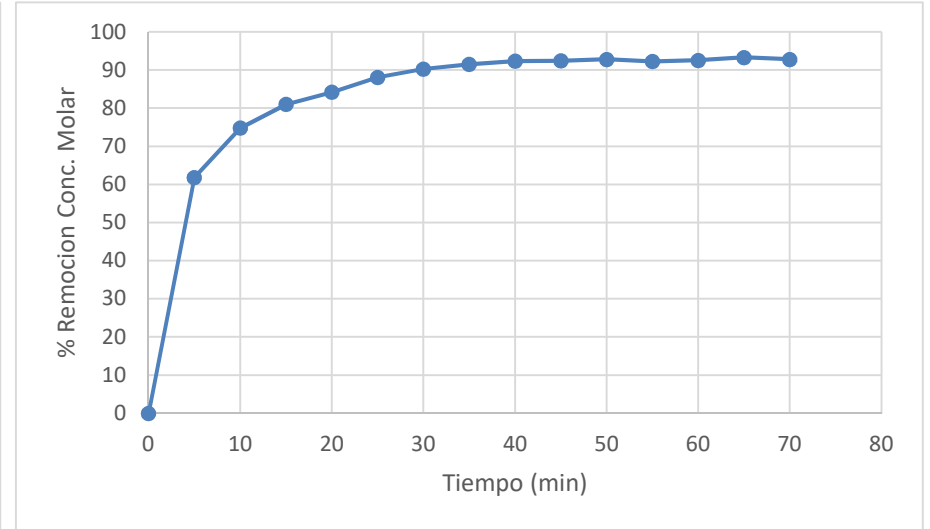


Figura 23 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E1

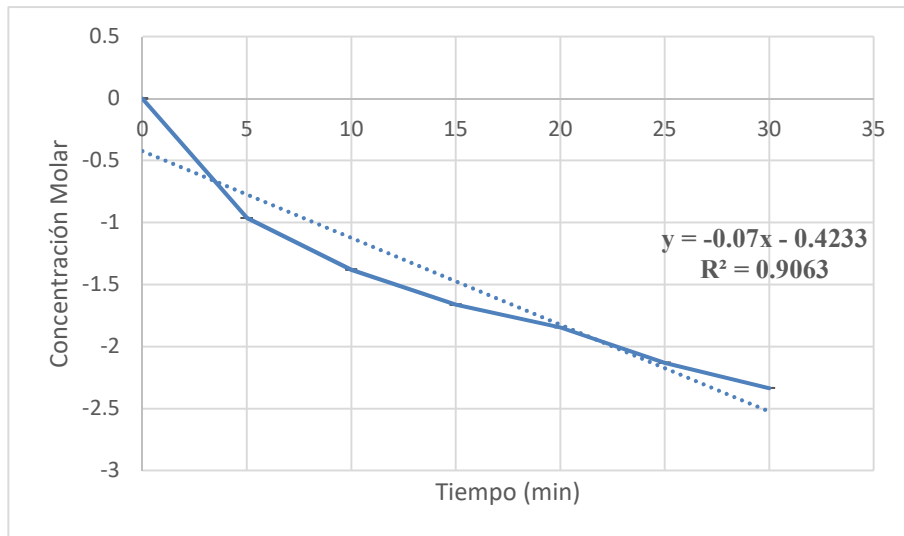


Figura 24 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E1

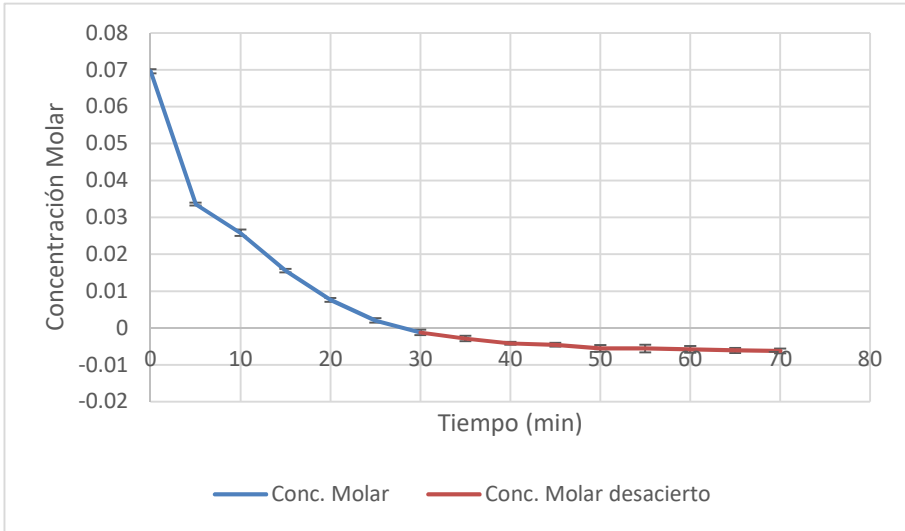


Figura 25 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla E4

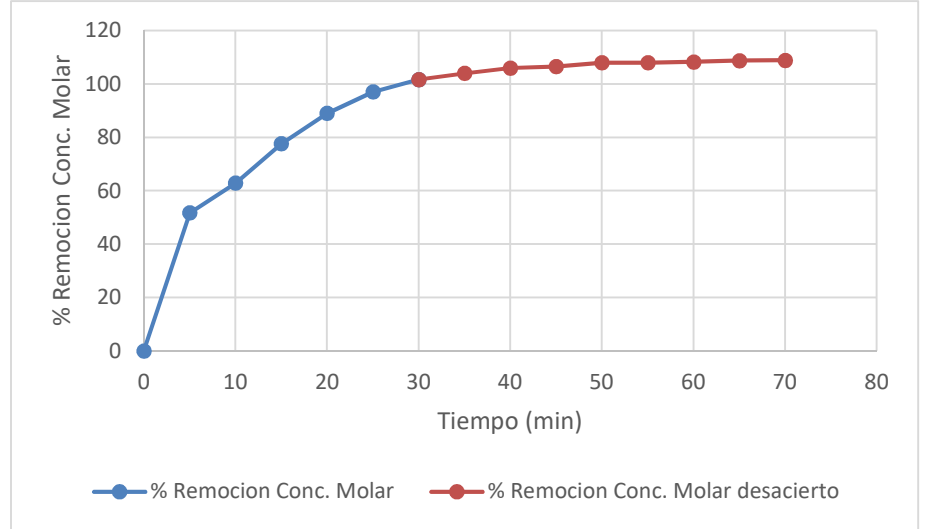


Figura 26 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E4

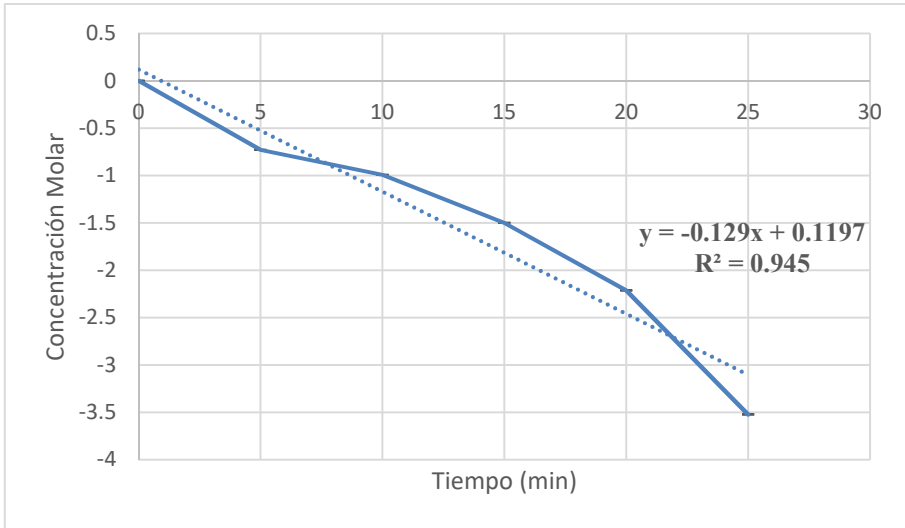


Figura 27 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E4

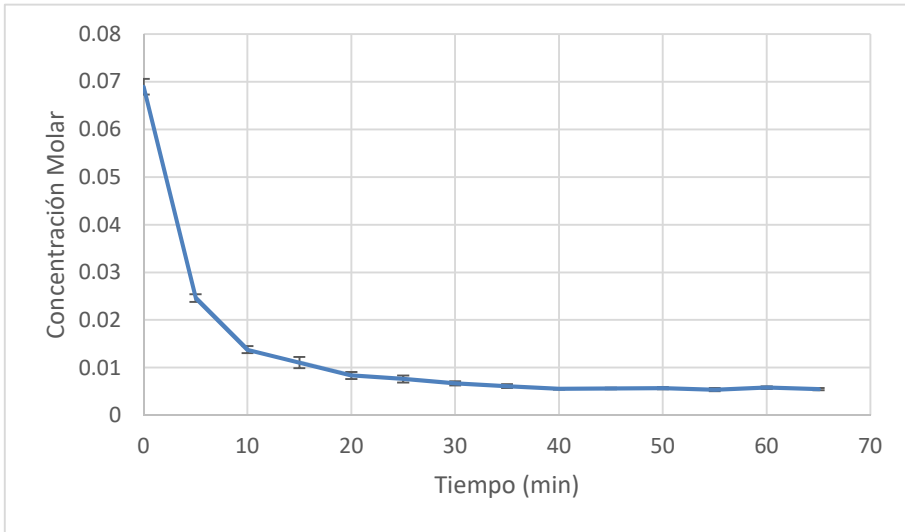


Figura 28 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla E7

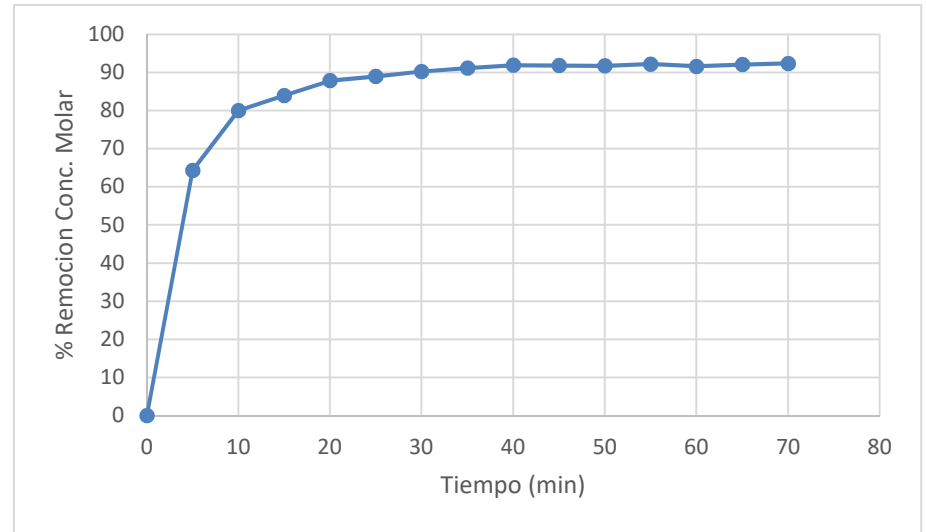


Figura 29 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E7

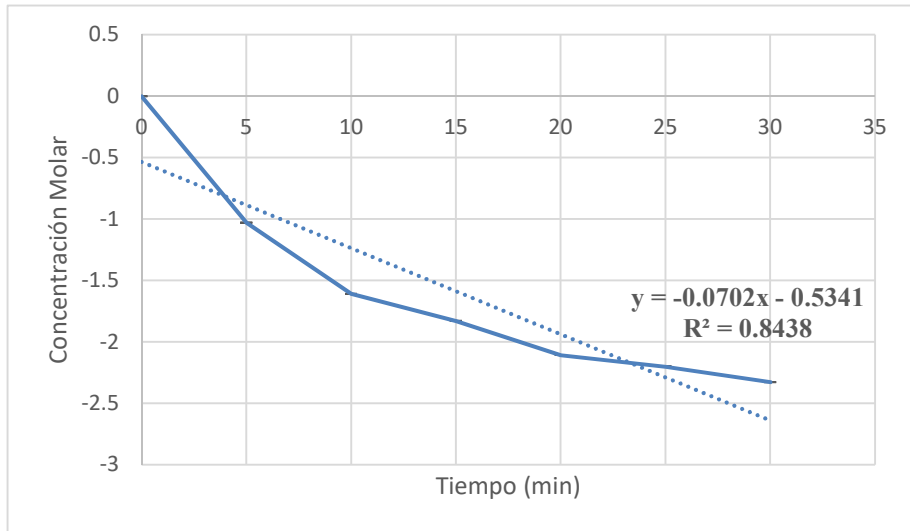


Figura 30 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E7

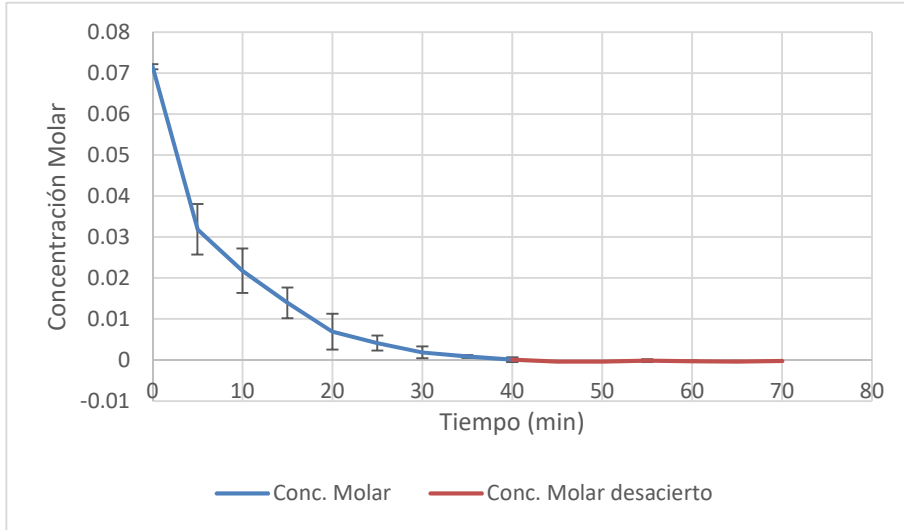


Figura 31 Ecuación cinética del NA52 ref.: Tabla E10

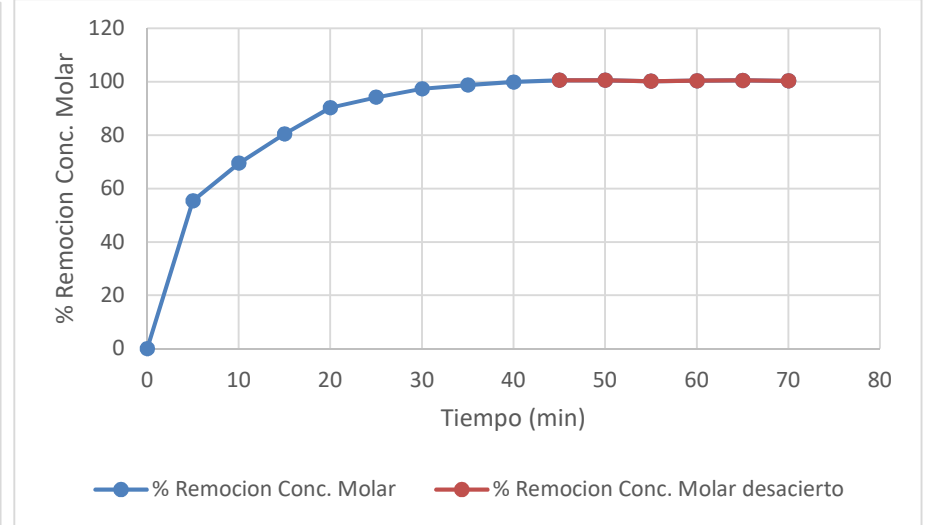


Figura 32 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E10

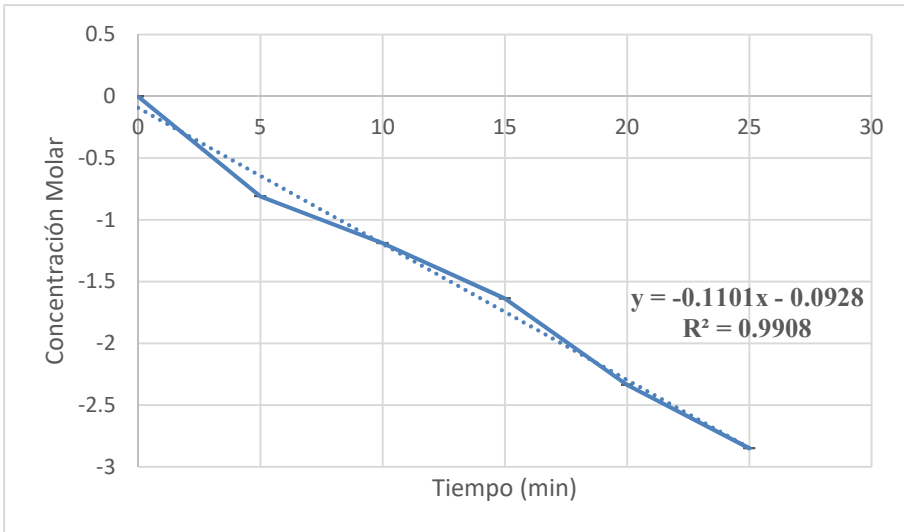


Figura 33 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla E10

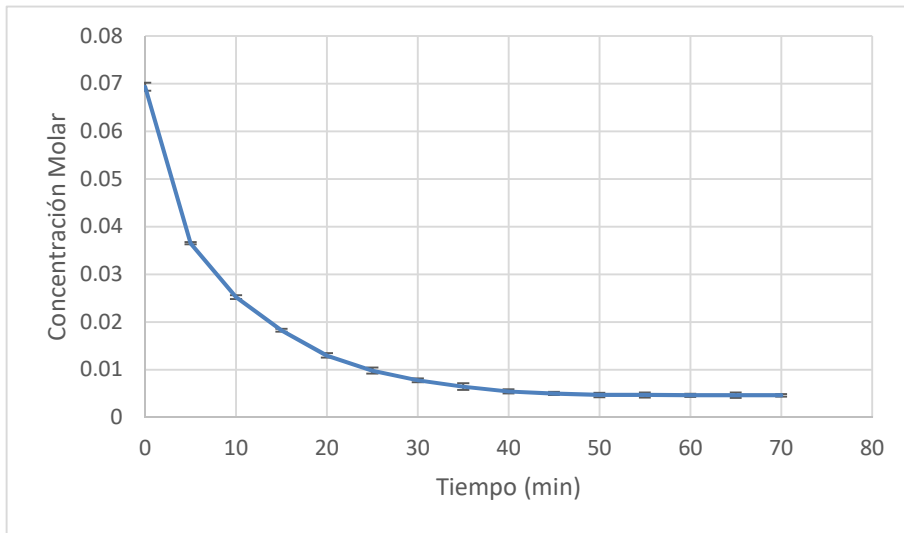


Figura 34 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E13

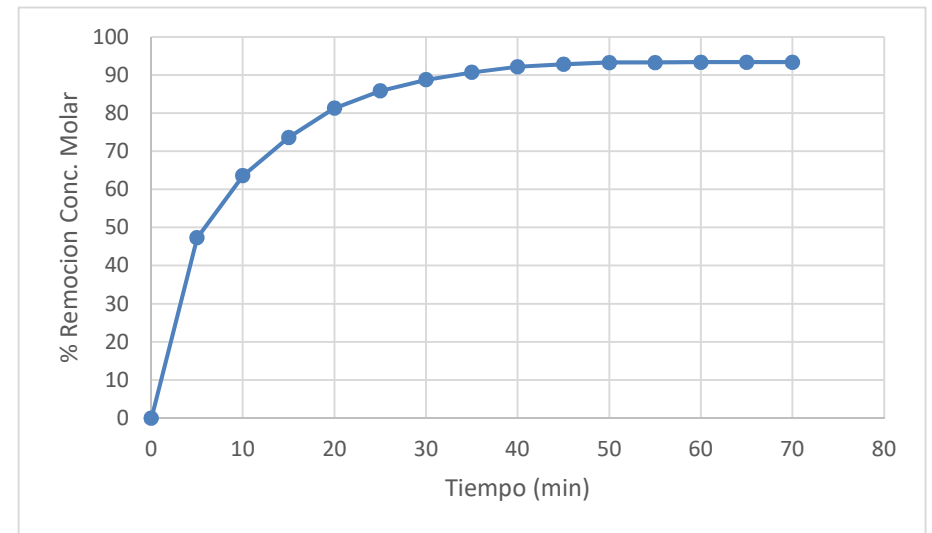


Figura 35 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E13

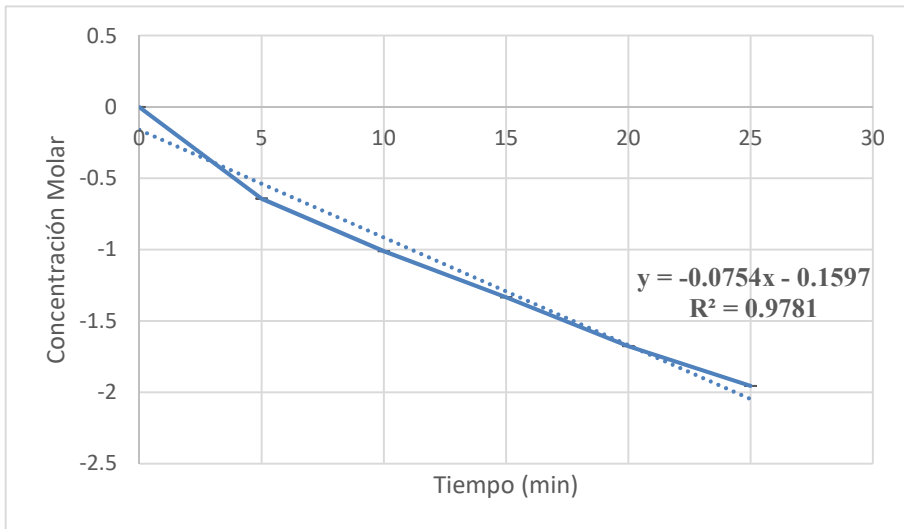


Figura 36 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E13

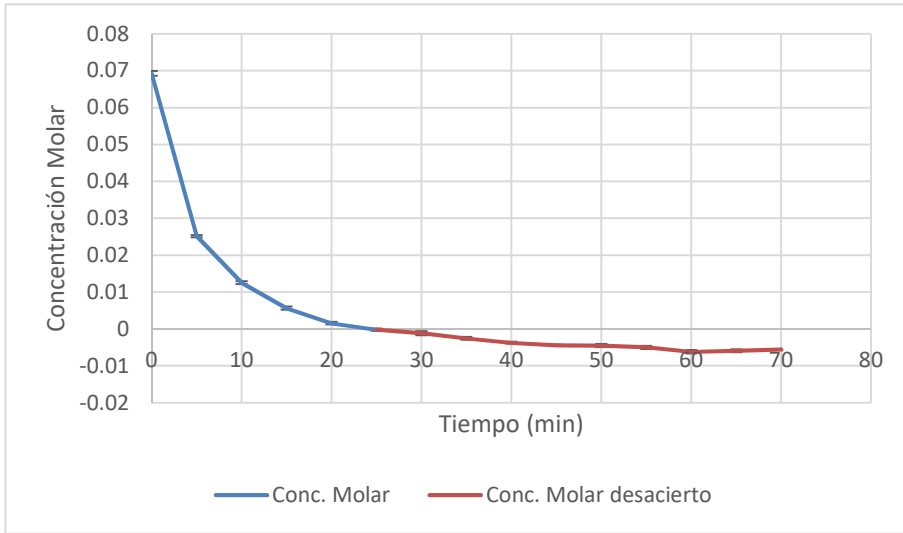


Figura 37 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E16

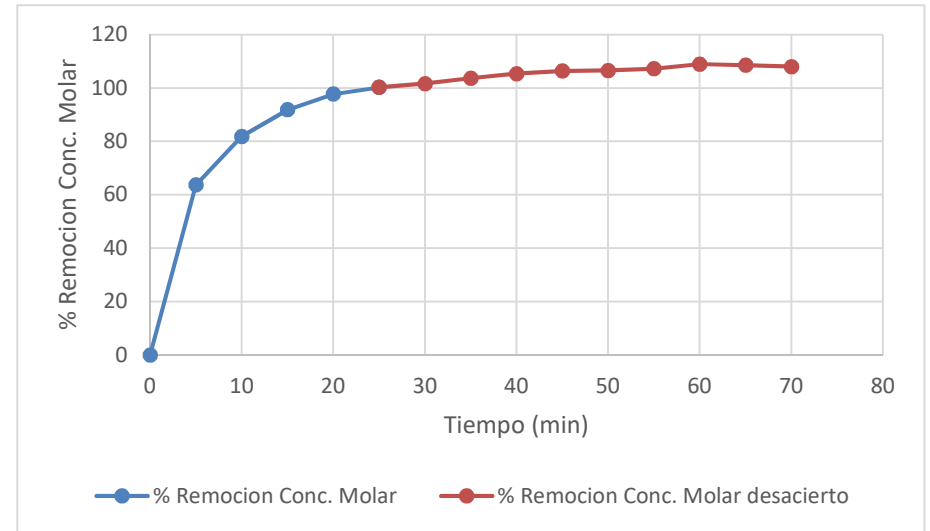


Figura 38 Remoción de colorante NA52 ref.: Tabla E16

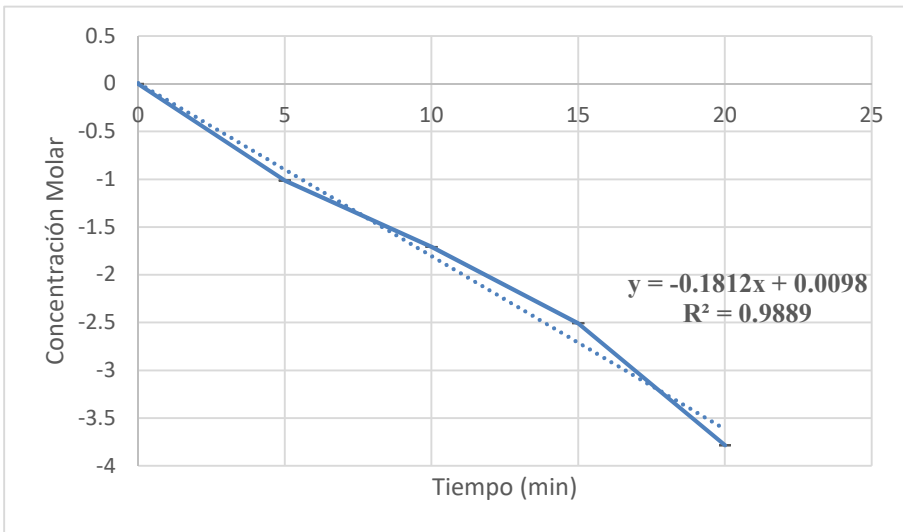


Figura 39 Ecuación cinética del colorante NA52 ref.: Tabla E16

4.1.4 Graficas de concentración, remoción de colorante y ecuaciones cinéticas RD82

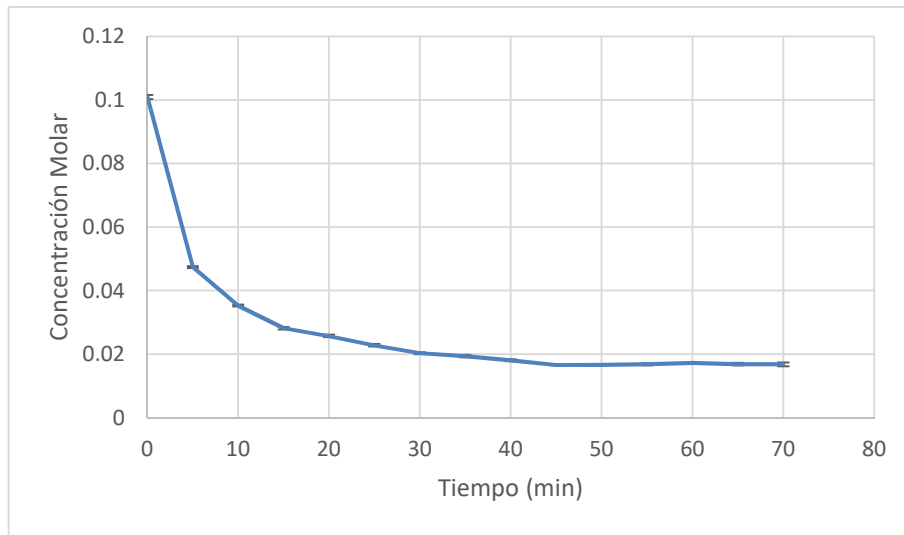


Figura 40 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F1

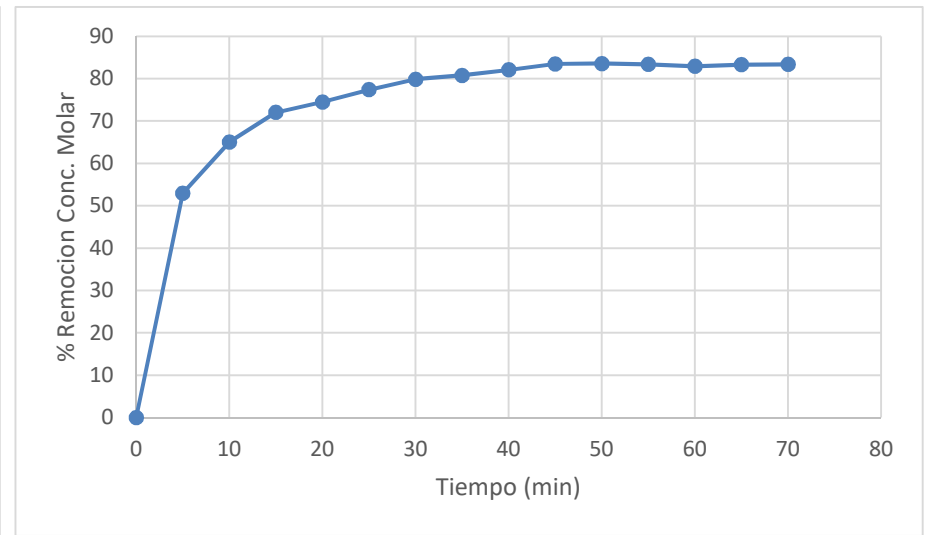


Figura 41 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F1

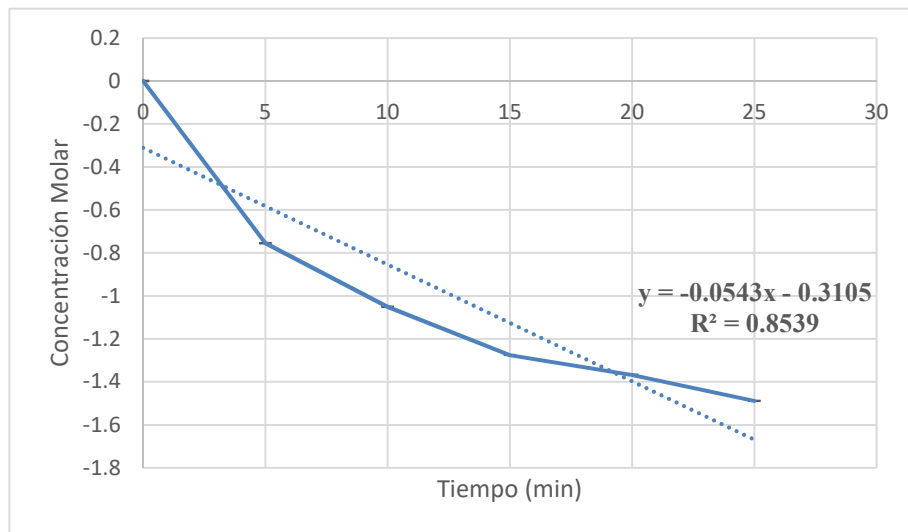


Figura 42 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F1

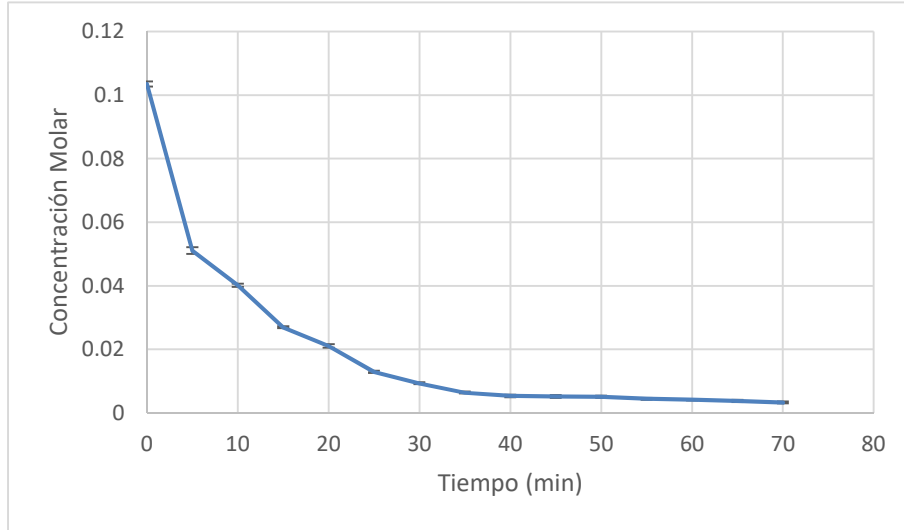


Figura 43 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F4

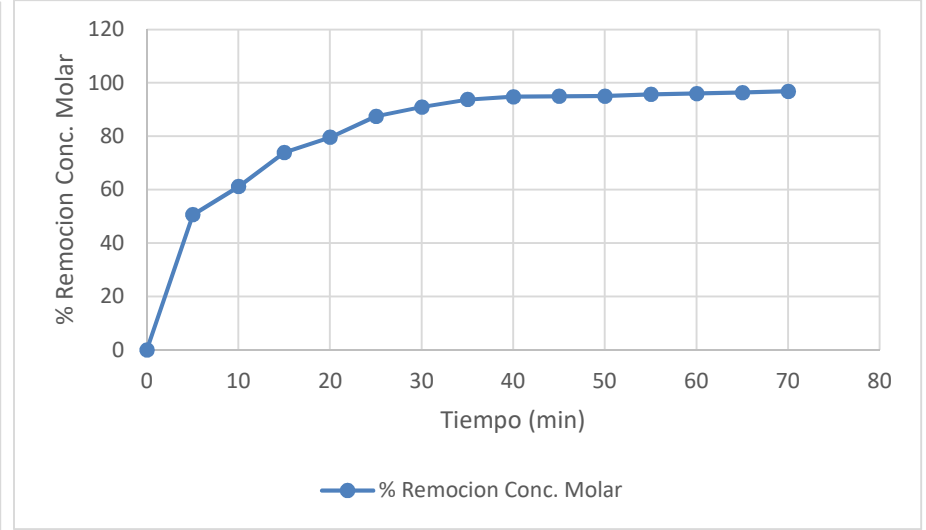


Figura 44 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F4

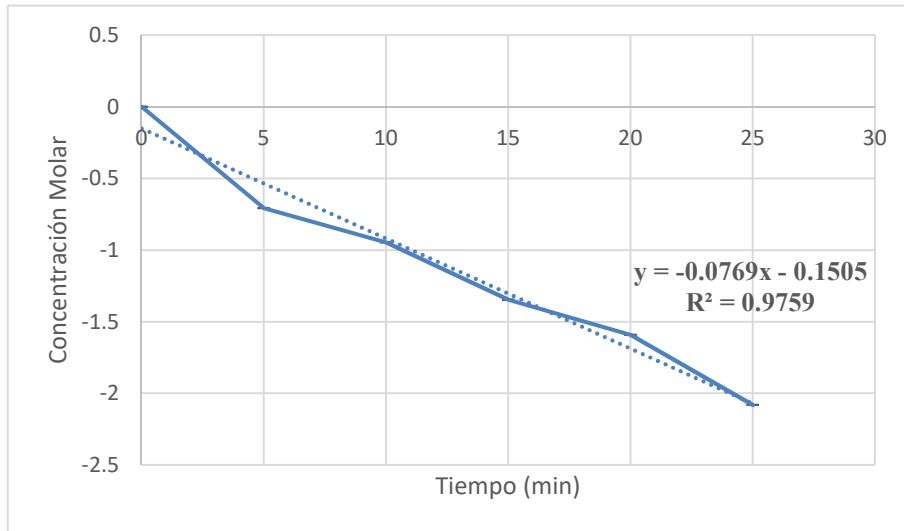


Figura 45 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F4

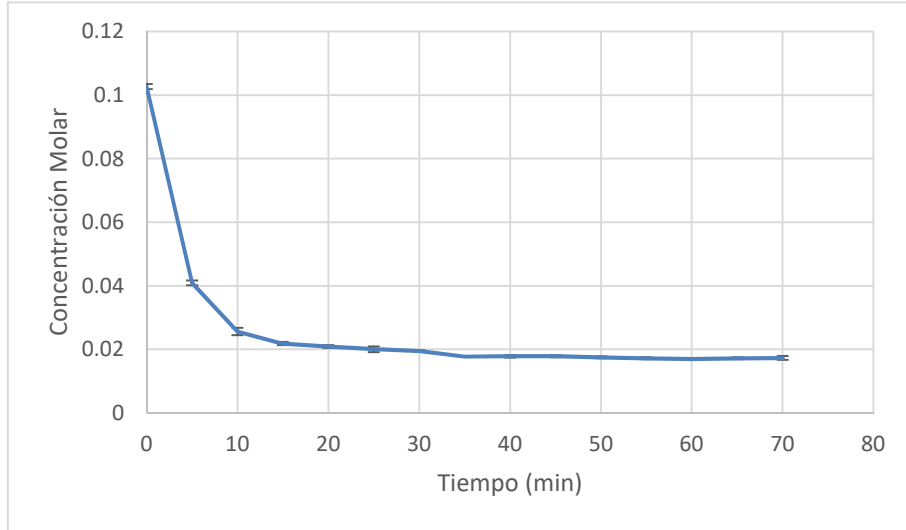


Figura 46 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F7

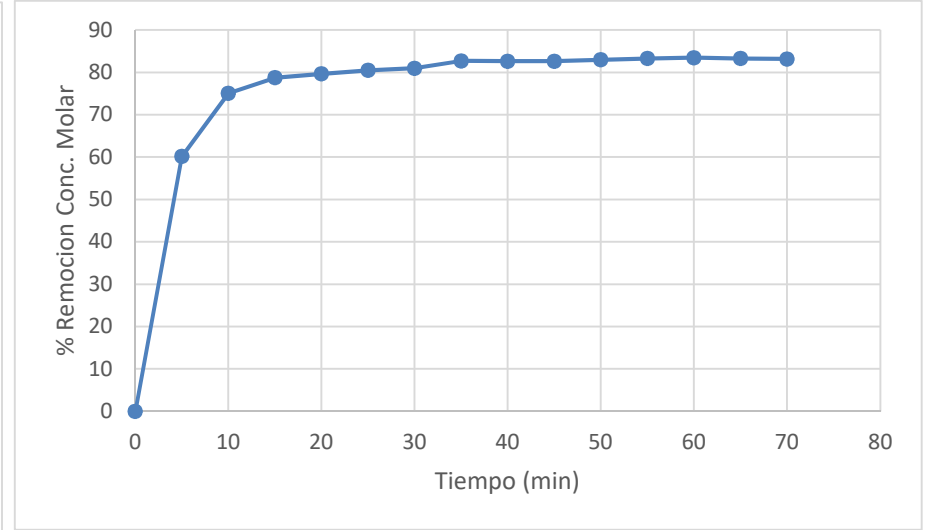


Figura 47 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F7

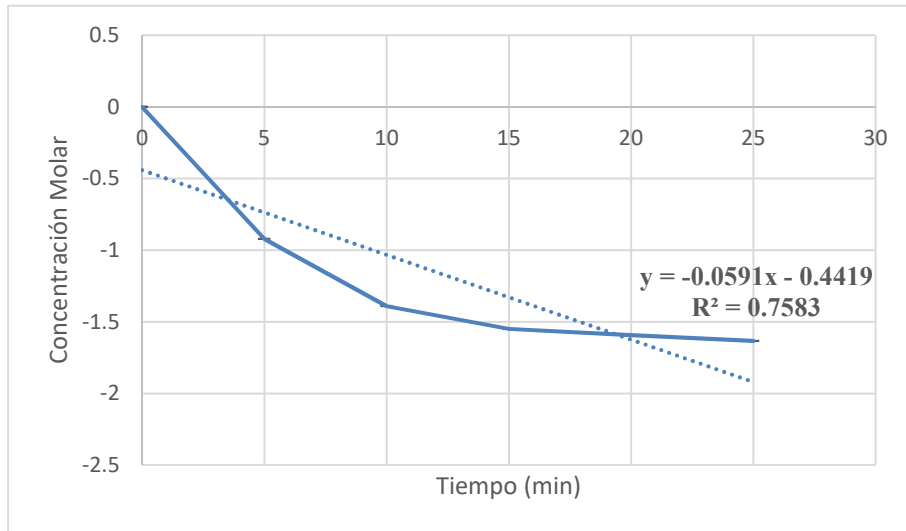


Figura 48 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F7

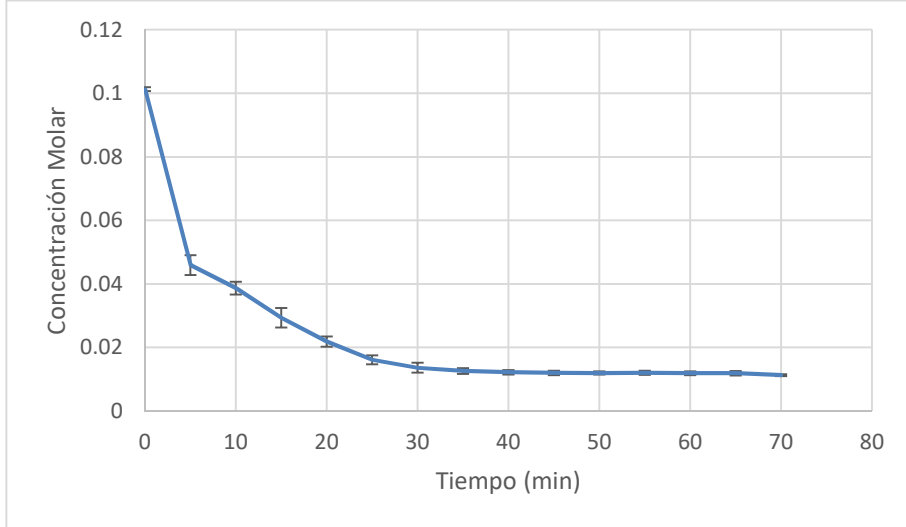


Figura 49 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F10

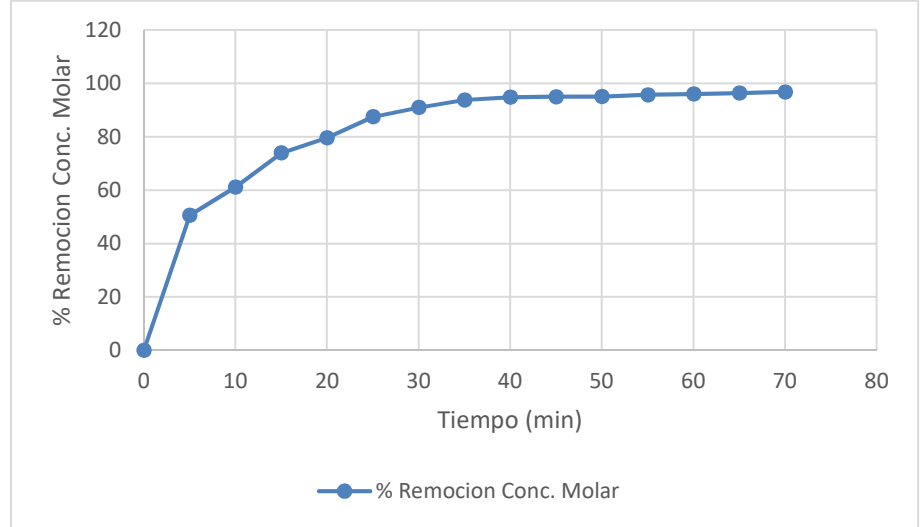


Figura 50 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F10

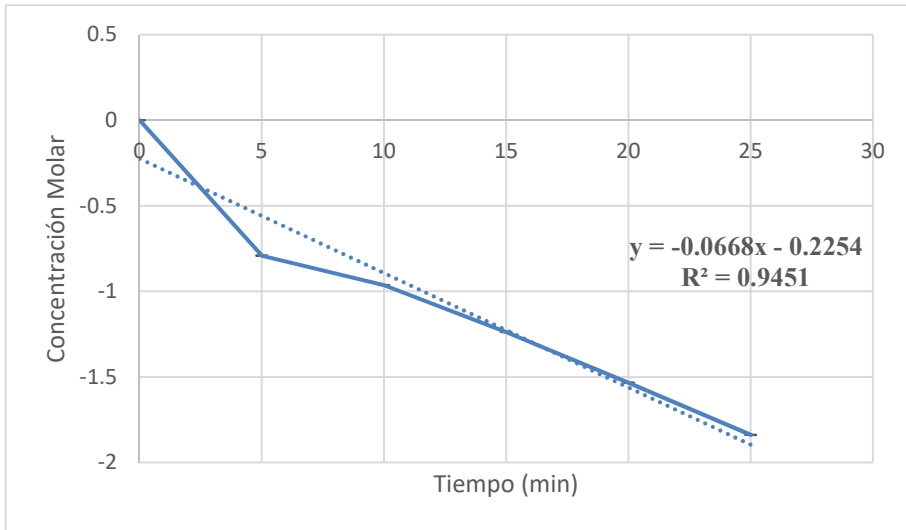


Figura 51 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F10

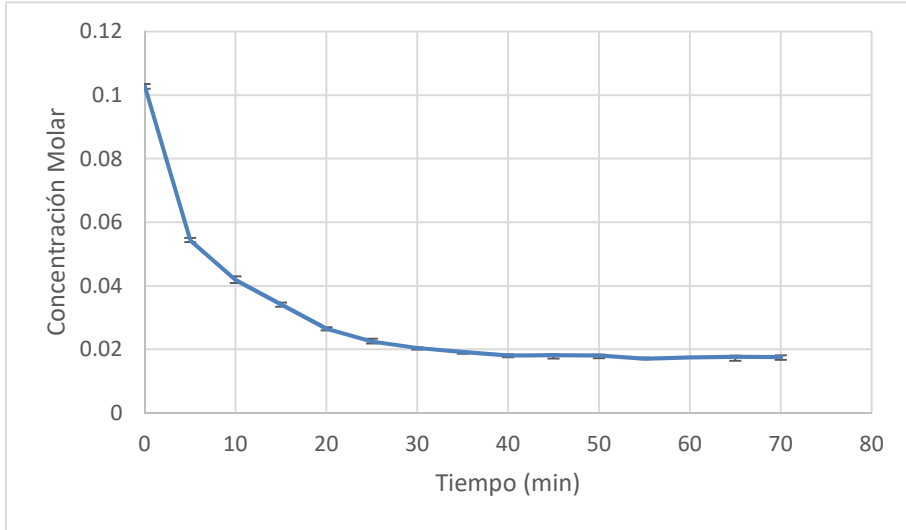


Figura 52 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F13

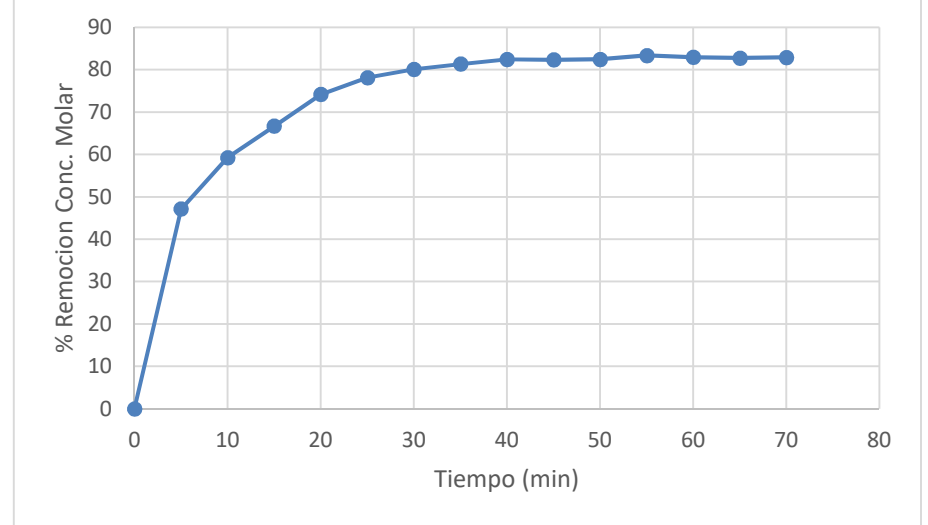


Figura 53 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F13

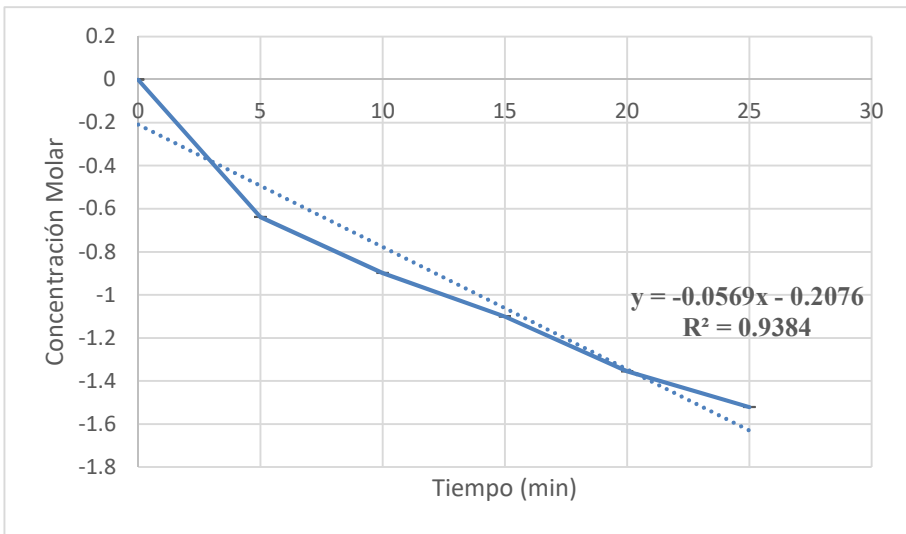


Figura 54 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F13

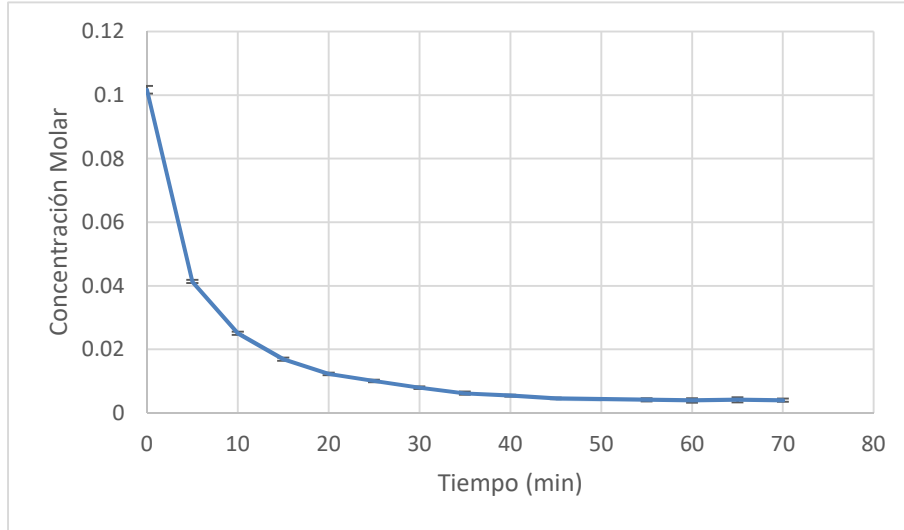


Figura 55 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla F16

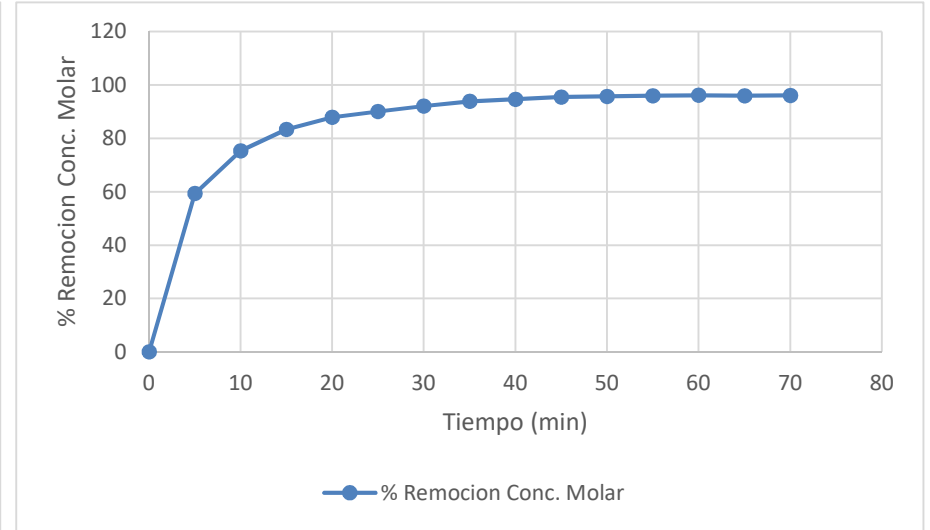


Figura 56 Remoción de colorante RD82 ref.: Tabla F16

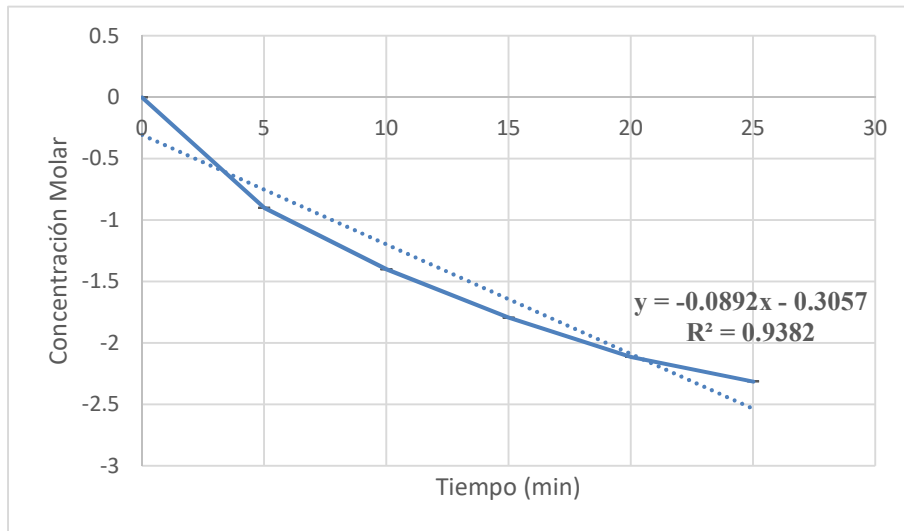


Figura 57 Ecuación cinética del colorante RD82 ref.: Tabla F16

4.1.5 Determinación de la concentración del colorante, DTO, DQO_t y COT_t del colorante RD82

En esta sección se muestran las tablas 70,73,76,79,82 y 85 y las figuras 71,75,79, 83,87 y 91 que representan la concentración del colorante en los experimentos que mostraron mayor porcentaje de remoción de color (> 80%), los cuales se obtuvieron a partir de las absorbancias de la sección 4.1.9 (Degradación del colorante rojo disperso 82) y de las ecuaciones de la sección 4.1.3 (Curvas de calibración del rojo disperso 82), más concretamente de la ecuación generada a partir de la regresión lineal de la curva de calibración del colorante RD82 a 0.1Mm (ecuación 4.14). Así mismo de las tablas antes mencionadas se graficó el porcentaje de remoción del colorante RD52 para cada uno de los experimentos utilizando la ecuación 4.33 obteniendo así las figuras 72,76,80,84,88 y 92.

$$R_{RD82} (\%) = \frac{(Conc.RD82_i - Conc.RD82_f)}{Conc.RD82_i} \times 100 \quad \text{Ecuación 4.33}$$

Obtenida la concentración de éste colorante, se procedió a calcular la DQO_t con las ecuaciones 4.28 y 4.29, generando las tablas 71,74,77,80,83 y 86 y las figuras 73,77,81,85,89 y 93. La ecuación 4.28 describe la relación estequiométrica que existe entre la cantidad teórica de oxígeno requerido y la oxidación completa con el colorante RD82, la ecuación 4.29 representa el resultado de la Demanda Química Teórica de Oxígeno.

Las tablas 72,75,78,81,84 y 87 y figuras 74,78,82,86,90 y 94 muestran los resultados del COT_t del colorante RD82 a partir de los cálculos de la concentración del colorante, utilizando la ecuación 4.26, y para la determinación de DTO se utilizó la ecuación 4.22.

4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.2.1 Discusión de resultados NA52

Los resultados obtenidos en la sección 4.1.6 pruebas control para el colorante textil NA52, observados en las tablas 11.3 a la 11.7, y las figuras 11.4 a 11.8 indicaron que los factores analizados en las pruebas de control, no son significativos en las pruebas de degradación, por lo tanto, todos los resultados mostrados se deben a la acción del proceso Foto-Fenton.

Tal y como se observa en la sección 4.1.7 degradación del colorante textil negro ácido 52 se muestra que los resultados obtenidos más confiables en función de su degradación, se consiguieron al llevar a cabo los experimentos en pH 3, esto coincide con las condiciones de operación que se han registrado en la literatura para el proceso de oxidación avanzada Foto-Fenton, ya que la acción del catalizador se ve inhibida al presentarse un valor de pH que se salga fuera del rango 2.5-4 según diversos autores (Pignatello J. J., 2006; Durán Moreno, et al., 2011) tal y como se describió en la sección 1.1.3.2 Efectos del pH en el proceso Foto-Fenton. A continuación, se muestra la tabla 88 y figura 95 recopilando los promedios de las absorbancias obtenidas de las pruebas de degradación que se llevaron a cabo a pH 3 para este colorante. Las condiciones de operación de la tabla 88 se muestran en la tabla 89.

Tabla 17 Promedios de las absorbancias a diferentes condiciones de operación NA52

Tiempo (min)	Abs Prom A	Abs Prom B	Abs Prom C	Abs Prom D	Abs Prom E	Abs Prom F
0	0.496666667	0.488666667	0.484333333	0.500666667	0.487	0.486333333
5	0.223666667	0.264333333	0.208333333	0.253666667	0.282666667	0.211666667
10	0.166333333	0.216	0.141	0.191	0.212333333	0.133333333
15	0.139	0.152	0.124	0.142	0.169	0.090333333
20	0.125	0.102666667	0.107333333	0.098333333	0.136	0.065
25	0.107666667	0.068	0.102666667	0.081	0.116333333	0.054
30	0.098	0.048	0.097	0.066666667	0.103666667	0.048
35	0.092666667	0.037666667	0.093333333	0.060666667	0.095333333	0.039333333
40	0.089	0.029333333	0.09	0.055666667	0.089	0.032
45	0.088666667	0.027	0.090333333	0.052666667	0.086333333	0.027666667
50	0.087	0.020666667	0.090666667	0.052666667	0.084333333	0.027
55	0.089333333	0.020666667	0.088666667	0.054333333	0.084333333	0.024
60	0.088	0.019333333	0.091333333	0.053333333	0.084	0.016666667
65	0.084666667	0.017333333	0.089333333	0.053	0.084	0.018333333
70	0.087	0.016666667	0.088	0.053666667	0.084	0.020666667
% Abs Remoción	82.48322148	96.5893588	81.83069511	89.28095872	82.75154004	95.75051405

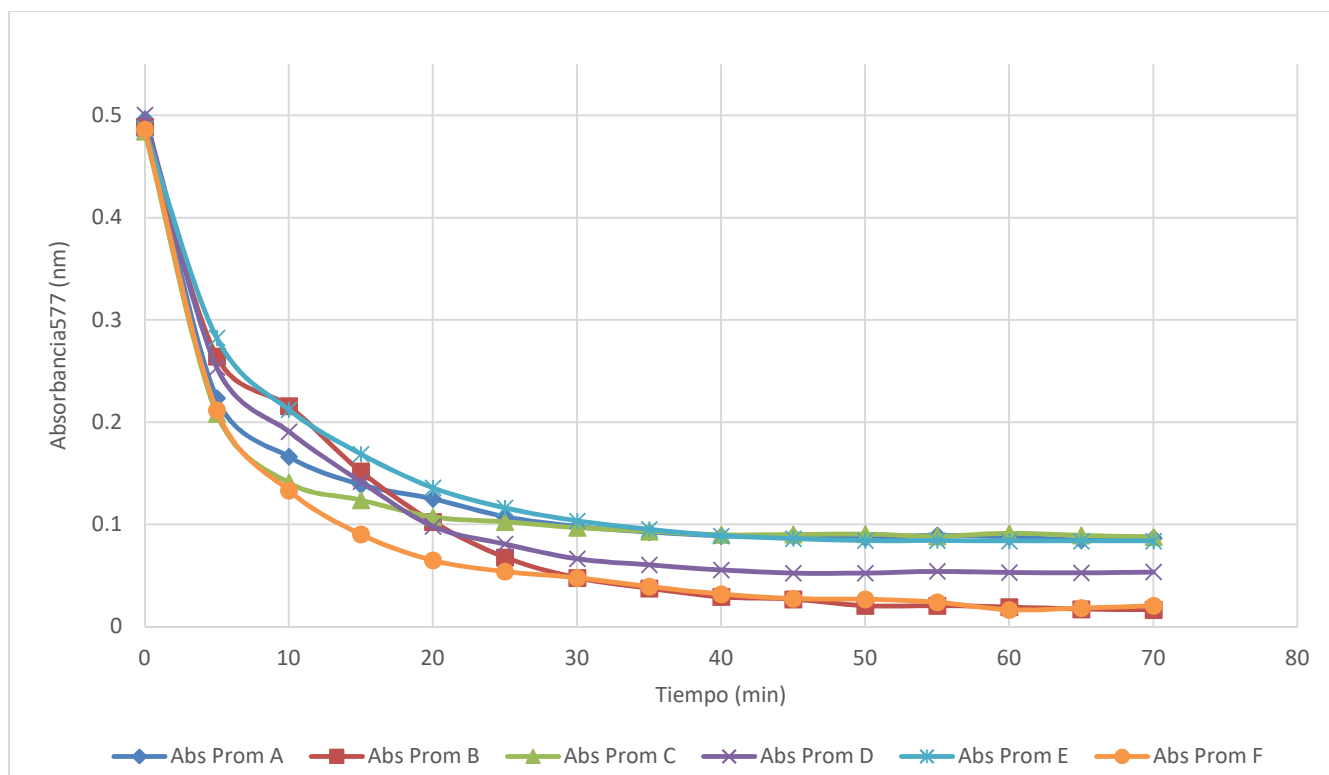


Figura 58 Promedios de las absorbancias a diferentes condiciones de operación NA52

Tabla 18 Condiciones de operación a pH 3 para NA52	
Abs Prom A	Tabla 22 Abs NA52 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1
Abs Prom B	Tabla 23 Abs NA52 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1
Abs Prom C	Tabla 24 Abs NA52 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2
Abs Prom D	Tabla 25 Abs NA52 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2
Abs Prom E	Tabla 26 Abs NA52 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1
Abs Prom F	Tabla 27 Abs NA52 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 2:1

Como se puede observar en la figura 95 se observa que existe dos experimentos que destacan del resto estos son Abs Prom B y Abs Prom F estos dos experimentos comparten la característica de que ambas pruebas fueron llevadas a cabo a una concentración de catalizador FeSO₄ de 0.5 mM muy cerca de ellos también se encuentra Abs Prom D que igualmente posee la característica de tener 0.5 mM de FeSO₄. Los experimentos Abs Prom A, C y E los cuales comparten la característica de tener 1 mM de FeSO₄ todos siguen una tendencia muy similar a partir del minuto 30 al minuto 70. Así que los datos obtenidos pueden aseverar que en función del catalizador los experimentos llevados con una concentración de catalizador 0.5 mM tienen mayor eficiencia que aquellos llevados a una concentración de catalizador 1 mM.

Dentro de los dos experimentos que destacaron que Abs Prom B y Abs Prom F se puede observar que el Abs Prom B tiene una relación estequiométrica 1:1 $[H_2O_2]:[NA52]$ con una remoción de la absorbancia de 96.59 % y el Abs Prom F tiene una relación estequiométrica 2:1 $[H_2O_2]:[NA52]$ con una remoción de la absorbancia de 95.75%, esto quiere decir que solo hay una diferencia de remoción de menos de 1% entre estos experimentos, si se toma en cuenta la relación estequiométrica antes mencionada se obtiene que el experimento Abs Prom F utilizó el doble de la cantidad de agente oxidante (H_2O_2) que con respecto a Abs Prom B, con lo antes mencionado se puede deducir que no existe una diferencia significativa de agregar el doble de la cantidad estequiométrica de agente oxidante.

Compilando las figuras 48,52,56,60,64 y 68 en una sola (figura 96), se observa el comportamiento que se tiene la degradación de color para el colorante NA52. En esta gráfica se puede percibir que existe un desacierto matemático en las líneas % Rem Prom. Conc. Molar F, % Rem Prom. Conc. Molar B y en % Rem Prom. Conc. Molar D, esto se debe a que el modelo matemático generado en las ecuaciones de la sección 4.1.4 (Curvas de calibración del negro ácido 52), más concretamente de la ecuación generada a partir de la regresión lineal de la curva de calibración del colorante NA52 a 0.1Mm (ecuación 4.18), no puede inferir los datos obtenidos de los experimentos realizados, ya que los resultados obtenidos de las absorbancias son tan diminutos que el modelo generado no lo puede iterar de manera correcta estos resultados, es decir que estos experimentos redujeron tanto sus absorbancias que prácticamente la remoción de color a la longitud de onda medida (577nm) para estos 3 casos es $\approx 100\%$.

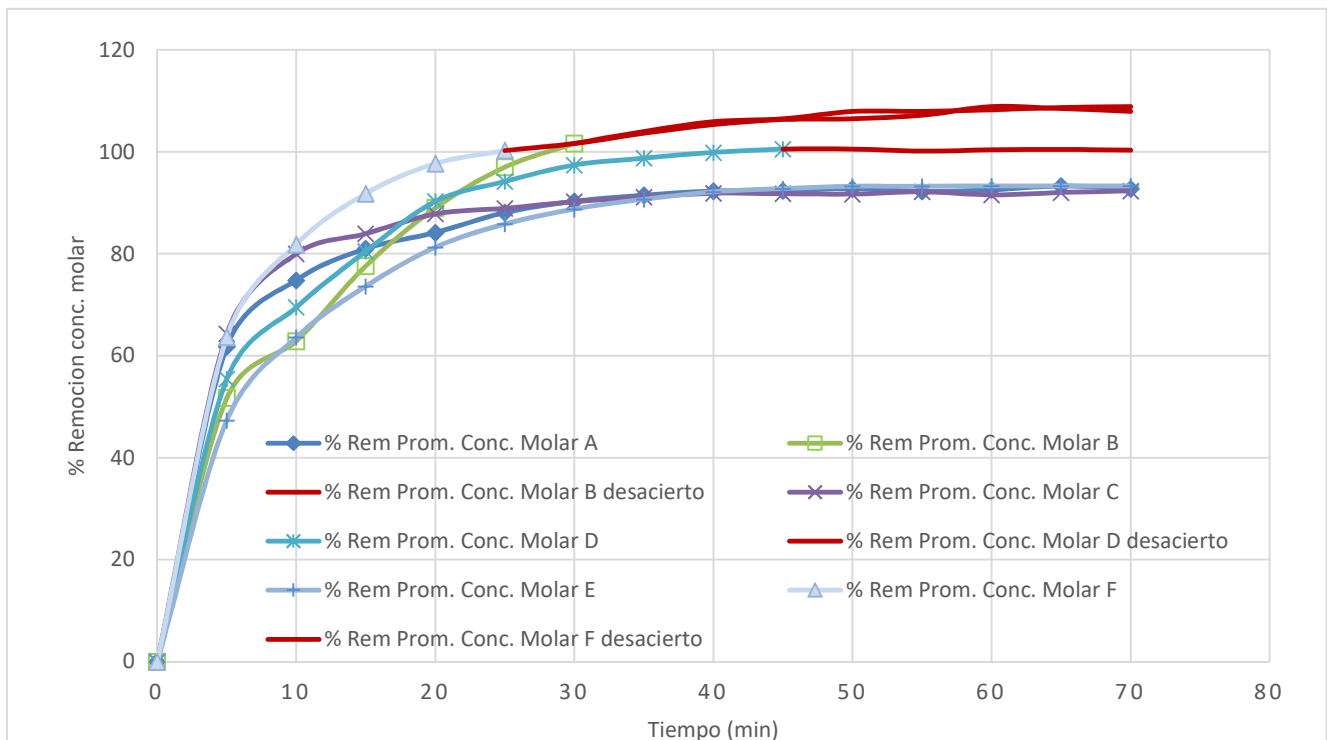


Figura 59 Compilación de graficas de remoción de color NA52

Los resultados obtenidos para este colorante se pueden comparar con los trabajos realizados por (Gómez, et al., 2017) quienes trabajaron en “la caracterización físico-química de la degradación del colorante textil Azo NA52 por plasma corona”. Estos investigadores obtuvieron después de 180 minutos de tratamiento, una pérdida de colorante del 98% utilizando una concentración de 1 mM NA52 y 1 mM FeSO₄ tal y como se muestra en la figura 97 extraída de dicho trabajo.

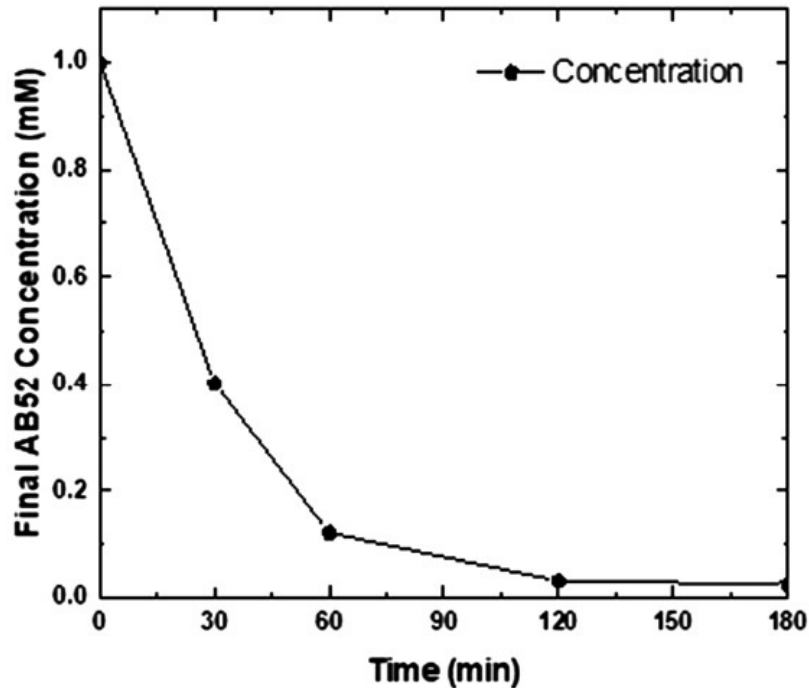


Figura 60 Concentración de colorante de tratamiento con NA52, usando 1 mM de FeSO₄ (Gómez, et al., 2017)

Así mismo en este trabajo se reportó obtuvieron una disminución drástica en la concentración de NA52 en el intervalo de 30-60 min, equivalente a una disminución en la concentración de colorante del 60% y 88%, valores que pueden ser comparados con este trabajo ya que en este rango de tiempo se obtuvieron valores del 90% y $\approx 100\%$ en función de la concentración de colorante para los experimentos eficientes.

Dentro del trabajo de los investigadores antes mencionados también se llevó a cabo la demanda química de oxígeno y el carbono orgánico total en las cuales se reportó que el porcentaje de degradación excedió el 90% después de los 60 minutos de tratamiento. Aunque en este trabajo se realizó el cálculo teórico a través del modelo matemático anteriormente descrito en la sección 4.1.5 Descripción de las ecuaciones para el cálculo de DTO, DQOt y COTt y las ecuaciones de la sección 4.1.4 (Curvas de calibración del negro ácido 52), se muestra que se obtuvieron resultados similares ya que en este trabajo se obtuvieron porcentajes de remoción de DQOt y COTt para este tiempo valores mayores al 98% de remoción.

4.2.2 Discusión de resultados RD82

Los resultados obtenidos en la sección 4.1.8 Pruebas control para el colorante textil rojo directo 82, observados en las tablas 11.27 a la 11.31, y las figuras 11.28 a 11.32 indicaron que los factores analizados en las pruebas de control, no son significativos en las pruebas de degradación, por lo tanto, todos los resultados mostrados se deben a la acción del proceso Foto-Fenton.

A continuación, se muestra la tabla 90 y figura 98 recopilando los promedios de las absorbancias obtenidas de las pruebas de degradación que se llevaron a cabo a pH 3 para este colorante. Las condiciones de operación de la tabla 88 se muestran en la tabla 89.

Tabla 19 Promedios de las absorbancias a diferentes condiciones de operación RD82

Tiempo	Abs Prom A	Abs Prom B	Abs Prom C	Abs Prom D	Abs Prom E	Abs Prom F
0	0.518666667	0.532	0.527666667	0.520666667	0.528	0.522666667
5	0.245333333	0.264	0.212	0.237666667	0.280333333	0.214333333
10	0.183333333	0.208333333	0.133666667	0.200666667	0.216666667	0.131
15	0.147	0.140666667	0.114333333	0.153	0.177666667	0.089333333
20	0.134333333	0.110666667	0.109666667	0.114666667	0.138333333	0.065666667
25	0.119333333	0.069	0.105333333	0.085333333	0.117666667	0.054333333
30	0.106666667	0.050666667	0.102666667	0.072666667	0.107333333	0.043666667
35	0.102	0.035666667	0.093666667	0.067333333	0.100666667	0.034666667
40	0.095333333	0.030333333	0.094	0.065333333	0.095	0.030666667
45	0.088	0.029333333	0.094	0.064333333	0.095666667	0.026333333
50	0.087666667	0.029	0.092333333	0.064	0.095	0.025
55	0.088666667	0.025666667	0.090666667	0.064333333	0.090333333	0.024
60	0.091	0.024	0.089666667	0.063666667	0.092333333	0.023
65	0.089	0.022	0.090666667	0.063666667	0.093333333	0.024
70	0.088666667	0.019666667	0.091333333	0.060666667	0.092666667	0.023333333
%Remoción	82.90488432	96.30325815	82.69109286	88.34827145	82.44949495	95.53571429

Tabla 20 Condiciones de operación a pH 3 para RD82

A	Tabla 46 Abs RD82 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1
B	Tabla 47 Abs RD82 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1
C	Tabla 48 Abs RD82 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2
D	Tabla 49 Abs RD82 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2
E	Tabla 50 Abs RD82 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1
F	Tabla 51 Abs RD82 = 0.1 mM, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 2:1

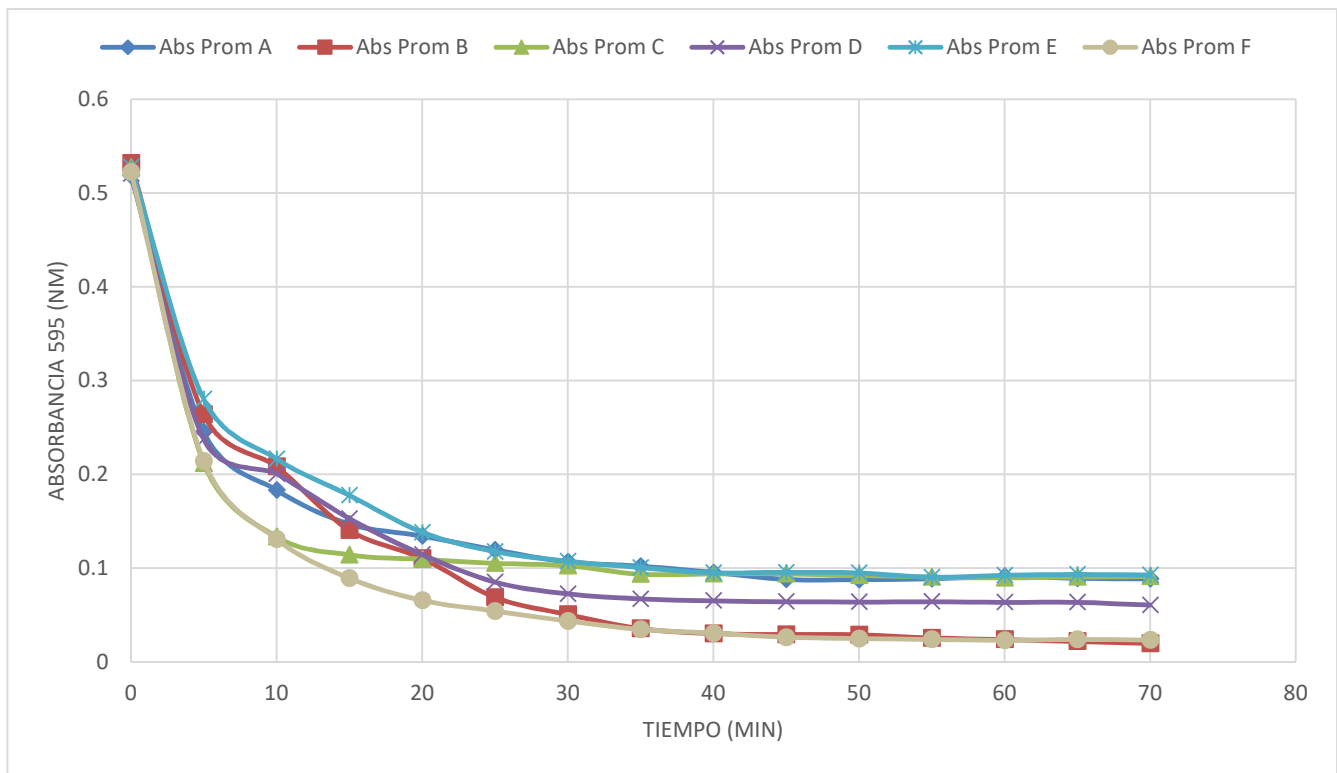


Figura 61 Promedios de las absorbancias a diferentes condiciones de operación RD82

Como se puede observar en la tabla 90 o en la figura 98 se observa que existe dos experimentos que destacan del resto estos son Abs Prom B y Abs Prom F estos dos experimentos comparten la característica de que ambas pruebas fueron llevadas a cabo a una concentración de catalizador FeSO_4 de 0.5mM muy cerca de ellos también se encuentra Abs Prom D que igualmente posee la característica de tener 0.5 mM de FeSO_4 . De igual manera que se observó en las pruebas para el colorante NA52 Los experimentos Abs Prom A, C y E los cuales comparten la característica de tener 1mM de FeSO_4 todos siguen una tendencia muy similar a partir del minuto 30 al minuto 70. Así que según los datos obtenidos se puede aseverar que en función del catalizador los experimentos llevados con una concentración de catalizador 0.5 mM tienen mayor eficiencia que aquellos llevados a una concentración de catalizador 1 mM

Dentro de los dos experimentos que destacaron que Abs Prom B y Abs Prom F se puede observar que el Abs Prom B tiene una relación estequiométrica 1:1 $[\text{H}_2\text{O}_2]:[\text{RD82}]$ con una remoción de la absorbancia de 96.3 % y el Abs Prom F tiene una relación estequiométrica 2:1 $[\text{H}_2\text{O}_2]:[\text{RD82}]$ con una remoción de la absorbancia de 95.5%, esto quiere decir que solo hay una diferencia de remoción de menos de 1% entre estos experimentos, si se toma en cuenta la relación estequiométrica antes mencionada se obtiene que el experimento Abs Prom F utilizó el doble de la cantidad de agente oxidante (H_2O_2) que con respecto

a Abs Prom B, con lo antes mencionado se puede deducir que no existe una diferencia significativa de agregar el doble de la cantidad estequiométrica de agente oxidante.

Compilando las figuras 72,76,80,84,88 y 92 en una sola (figura 99) generando la tabla 92, se observa el comportamiento que se tiene la degradación de color para el colorante RD82. En la gráfica y/o en esta tabla antes mencionada se puede observar que a diferencia del modelo matemático generado para el colorante NA52 el modelo generado para el colorante RD82 no existe ningún desacierto matemático y que en todos los experimentos se obtuvo una remoción de color mayor a 80% siendo los % Rem Prom. Conc. Molar B y % Rem Prom. Conc. Molar F los de mayor porcentaje de remoción de concentración de color, obteniendo 96.8% y 96.1% los porcentajes de remoción obtenidos.

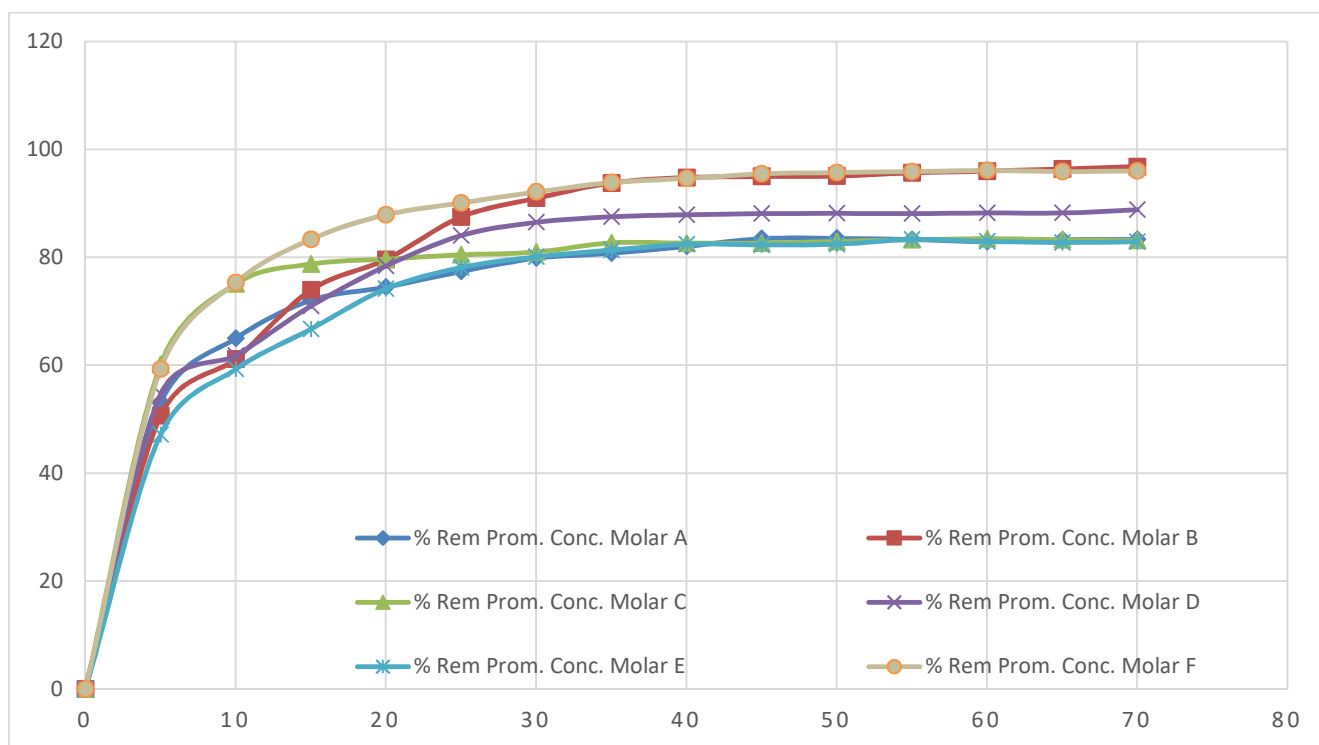


Figura 62 Compilación de graficas de remoción de color NA52

Se realizó el cálculo teórico a través del modelo matemático descrito en la sección 4.1.5 Descripción de las ecuaciones para el cálculo de DTO, DQOt y COTt y las ecuaciones de la sección 4.1.3 (Curva de calibración del rojo disperso 82), se muestra que se obtuvieron resultados de remoción de DQOt y COTt mayores del 80% para todos los experimentos después de 30 min de tratamiento y porcentajes de remoción mayores a 95 % en los experimentos B y F (condiciones mostradas en la tabla 91)

A continuación, se muestran algunas ilustraciones del reactor con los colorantes NA52 y RD82 antes y después del tratamiento con las siguientes condiciones: Tabla 47 Abs RD82 = 0.1 mM, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:1 y Tabla 23 Abs NA52 = 0.1 mM, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:1 ambos en pH = 3.

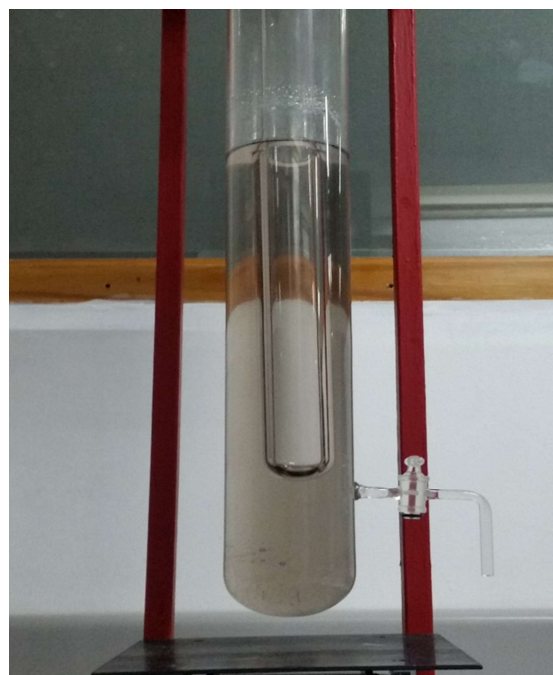


Figura 63 Reactor conteniendo el colorante NA52 antes y después del proceso

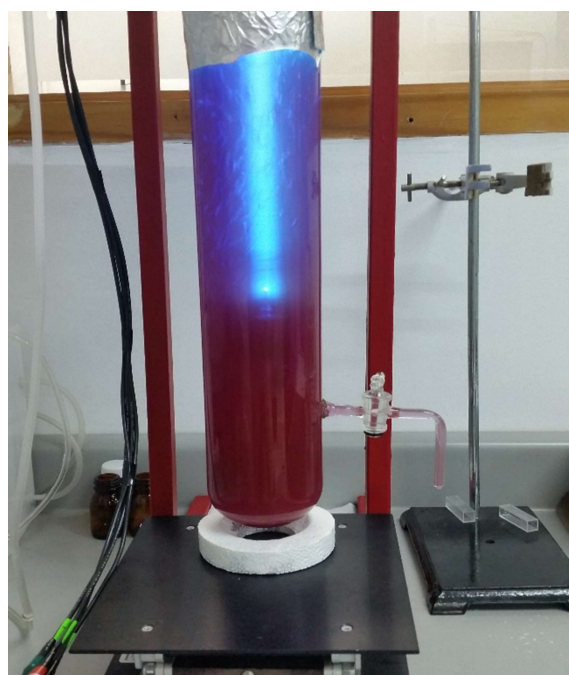


Figura 64 Reactor conteniendo el colorante RD82 antes y después del proceso

CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSIONES

- Se establecieron las condiciones estequimétricas para la degradación de los colorantes textiles RD82 y NA52 para su mineralización, siendo estas condiciones las más aptas para llevar a cabo el proceso Foto-Fenton.
- En la degradación de 0.1 Mm del RD82 se requieren 59 Mm de H₂O₂ y para 1 mM del NA52 se necesitan 50 Mm de H₂O₂.
- Se obtuvieron las ecuaciones para obtener las concentraciones de los colorantes estudiados a los diferentes tiempos de la degradación a través de las curvas de calibración de los colorantes RD82 y NA52.
- Se puede utilizar la mitad del agente oxidante calculado en las relaciones estequiométrica para ambos colorantes obteniendo resultados similares que al agregar el doble de la relación estequiométrica.
- Se obtuvo un porcentaje de remoción de aproximadamente 99% para 3 diferentes condiciones de operación para el colorante NA52 utilizando pH = 3, 0.5 mM de FeSO₄ RE=2:1; RE=1:1; RE=1:2 tenido a su vez para estos 3 casos remociones de COT_t y DQO_t de aproximadamente 99%.
- Se obtuvo un porcentaje de remoción de aproximadamente 97% para el colorante RD82 utilizando pH = 3, 0.5 mM de FeSO₄ RE=2:1 teniendo una remoción de COT_t y DQO_t de 96% y 97% respectivamente.
- Para ambos procesos se demostró que la concentración de catalizador afecta más a este proceso que la cantidad de agente oxidante agregado.
- Se determinó que, de las 6 lámparas evaluadas, la que obtuvo mayor porcentaje de remoción fue la lámpara GENERAL ELECTRIC G15T8.
- Se obtuvieron las ecuaciones cinéticas que describan el comportamiento de la degradación de los colorantes NA52 y RD82.

BIBLIOGRAFÍA

- Aleboye, A., Aleboye, H. & Moussa, Y., 2003. Critical effect of hydrogen peroxide in photochemical oxidative decolorization of dyes: acid orange 8, acid blue 74 and methyl orange.. *Dyes and pigments* 57,, pp. 67-75.
- Al-Kdasi, A., Idris, A. S. K. & Teong, C., 2004. Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes- a review.. *GLOBAL NEST: the International Journal* 6,, pp. 222-230.
- Almecija, M. et al., 2010. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: State of the Art. *Water Air Soil Pollution* 205. *Researchgate*, pp. 187-204.
- Amer, A., Amin, H., El Fecky, A. & Ibrahim, I., 2008. Treatment of textile wastewater using H₂O₂/UV system. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 42, pp. 17-28.
- Amigó, J., Buhigas, G. & Ortega, E., 2008. *Caracterización de la degradación de Sulfametazina mediante Foto-Fenton (POA's)*., Universidad Politécnica de Catalunya.: Departamento de Ingeniería Química..
- Aristizábal Castrillón, A. & Bermúdez Agudelo, M. C., 2007. *Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso*., Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería Facultad de Ingeniería Química.
- Azzi, M., 2006. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent.. *Journal of Hazardous Materials*, pp. Vol. 131, No.1-3; p.73-78.
- Baeyens, J. & Neyens, E., 2003. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique.. *Journal of Hazardous Materials* 98, pp. 33-50.
- Bisschops, I. y. S. H., 2003. Literature review on textile wastewater characterisation. *Environmental Technology*, pp. 24, 1399.
- Blánquez, P., 2005. «Desenvolupament d'un procés a escala pilot per al tractament del colorant Gris Lanaset G amb Trametes versicolor. Departament d'Enginyeria Química". Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona.: s.n.
- Cabala, P., 2005. *Estudio de la utilización de la reacción de Fenton para la detoxificación de efluentes de blanqueo de celulosa*., Universidad de Concepción.: Informe de Habilitación Profesional. Facultad de Ingeniería..
- Cañizares, P., Sáez, C., Paz, R. & Rodrigo, M., 2009. Costs of the electrochemical oxidation of wastewaters: A comparison with ozonation and Fenton oxidation processes.. *Journal of Environmental Management*, pp. 90, 410-420.
- Caronna, T., Colonna, G. & Marcandalli, B., 1999. Oxidative degradation of dyes by ultraviolet radiation in the presence of hydrogen peroxide.. *Dyes and Pigments* 41, pp. 211-220.
- Chudoba, J., Menéndez, C. & Perez, J. O., 1986. *Fundamentos teóricos de algunos procesos para la purificación de aguas residuales*. La Habana: ISPJAE.

Colour Index™ Constitution Number (CICN), 2013. *Chemical Constitutions in the Colour Index*. [Online] Available at: <https://colour-index.com/cicn-explained>

Comisión Nacional del Agua, 2010. *Estadísticas del Agua*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Domènech, X., Peral, J., Pérez, M. & Torrades, F., 2002. Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents. *Water Research* 36, pp. 2703-2710.

Durán Moreno, A. et al., 2011. Assessment of Fenton's reagent and ozonation as pre-treatments for increasing the biodegradability of aqueous diethanolamine solutions from an oil refinery gas sweetening process.. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 186, 1652–1659..

García, M., 2007. Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for commercial reactive azo dyes removal. *Departamento de Química. Universidad Autónoma de Barcelona*..

Ghosh, P., Samanta, A. N. & Ray, S., 2010. COD reduction of petrochemical industry wastewater using Fenton's oxidation.. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*., pp. 88 (6), 1021-1026..

Glaze, W. H., Kang, J. W. & Chapin, D. H., 1987. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation.. *Ozone: Science & Engineering*., 9, pp. 335-352.

Gómez, A. et al., 2017. Physical-chemical characterization of the textile dye Azo Ab52 degradation by corona plasma. *AIP Advances*, Volume 7.

Greenpeace, 2012. *Ríos mexicanos ríos tóxicos*.. [Online] Available at: http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2012/rios_toxicos.pdf

Guaratini, C. & Zanoni, M., 2000. Corantes têxteis. *Química Nova*, pp. 23,71.

Gupta, V. K. & Suhas, 2009. Application of low-cost adsorbents for dye removal. A review.. *Journal of environmental Management*, pp. 90: 2313-2342..

Gutarra, A. L. C. M. H. & R. J., 2001. *Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil*. En: Blesa, M.A. (Ed.). *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*, La Plata, Argentina: CYTED.

Harada, Y., 2008. *NORMAS OFICIALES PARA CALIDAD DEL AGUA*. México, D. F., s.n., p. 32.

Hassel, C. et al., 2007. Guidelines and legislation for dye house effluents.. *Journal Environmental Management*, pp. 83: 171-180..

Homem, V., Dias, Z., Santos, L. & Alves, A., 2009. Preliminary feasibility study of benzo(a)pyrene oxidative degradation by Fenton treatment.. *Journal of Environmental and Public Health*., pp. 2009, 1 - 6.

INEGI, 2011. *La Industria textil y del vestido en México*. México, D.F.: [Online].

Kalt, A. & Galindo, C., 1999. UV/H₂O₂ oxidation of azodyes in aqueous media: evidence of a structure-degradability relationship. *Dyes and Pigments* 42, pp. 199-207.

- Kavitha, V. & Palanivelu, K., 2004. The role of ferrous ion in Fenton and photo-Fenton processes for the degradation of phenol.. *Chemosphere*, pp. 55(9), 1235-1243. .
- Kim, S. & Vogelpohl, A., 2004. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in wastewater Treatment.. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 10, pp. 33-40.
- Kunz, A., Peralta-Zamora, P. & Gomes de Moraes, S. y., 2002. New Tendencies on Textile Effluent Treatment. *Química Nova*, pp. 25,78.
- Leist, K. H., 1982. Subacute toxicity studies of selected organic colorants.. *Ecotoxicol Environmental.*, pp. 6(5): 45-63.
- Lemley, A. T. & McCLUNG, S., 1994. Electrochemical treatment and HPLC analysis of wastewater containing acid dyes.. *Textile Chemist and Colorist*, pp. Vol.26, No. 8 p. 17-22.
- Lin, S. H. / P. C. F., 1995. A Continuous Fenton's Process for Treatment of Textile Wastewater. *Environmental Technology -London-*, pp. 16,693.
- López, C., Moreira, M. T., Feijoo, G. & Lema, J., 2006. Tecnologías para el tratamiento de efluentes de industrias textiles. *Afinidad*, p. 563.
- López, R., 2001. *Fotodecoloración de un azo colorante mediante el proceso H₂O₂/UV. Tesis presentada para optar por la Licenciatura en Ciencias*, Lima, Peru: Universidad Nacional de Ingeniería..
- Mackay, A., Oliveros, E. & Pignatello, J., 2006. Advanced Oxidation Processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry.. *Environmental Science and Technology* 36, pp. 1-84.
- Malato, S. et al., 2009. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. *Catalysis Today* 117, pp. 1-59.
- Malíková, P., Hajduková, J. & Nezvalová, L., 2009. Oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fenton reaction.. *GeoScience Engineering.*, pp. LV (4), 23-28..
- Marcano, D., 1990. *Introducción a la química de los colorantes*. Caracas, Venezuela: Reverte.
- McMullan, G. et al., 2001. Microbial decolourisation and degradation of textile dyes.. *National Center for Biotechnology Information*, pp. 58,81.
- Mejía, C. & Osorio, V., 2003. Decoloración de las aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación.. *Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.*, Junio.pp. Vol. 1, No. 29.
- Menéndez Gutiérrez, C. L. & Pérez Olmo, J. M., 2007. *Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales*. «Environmental Capacity Enhancement Project in Cuba». ed. Ciudad de La Habana: Félix Varera - Editorial Universitaria.

Moeller Chávez, G. E. & Garzon, M., 2006. *Decoloración y reducción de toxicidad de efluentes de la industria química de colorantes y pigmentos.*, Jiutepec, México.: Informe, primera etapa; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua..

Moeller Chávez, G. E., Sandoval Yoal, L. & Mijaylova Nacheva, P., 2013. *Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorantes sintéticos utilizados en la industria textil.*, s.l.: IMTA Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua..

Neyens, E. & Baeyens, J., 2003. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique.. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 98, 33-50.

Noriega, R. P., Silva, R. & Trovó, A., 2005. Influence of the iron source on the solar photo-Fenton degradation of different classes of organic compounds.. *Solar Energy.*, Volume V.79, pp. 384-392..

O'Neill, C. et al., 1999. Anerobic and aerobic of simulated textile effluent. *Journal Chemical Technology and Biotechnology*, pp. 74, 993-999.

Parag R.G, A. B., 2004. A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions.. *Advances in Environmental Research*, pp. P, 8, 501-555..

Pérez, M., Torrades, F., Doménech, X. & Peral, J., 2002. Removal of organic contaminants in paper pulp treatment effluents under Fenton and Photo-Fenton conditions.. *Applied Catalysis B: Environmental.*, pp. 36, 63-74.

Pignatello J. J., O. E. M. A., 2006. Advanced Oxidation Processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry.. *Environmental Science and Technology*, pp. 35, 1-84; 36:1-84..

Químico Técnica Industrial, S.R.L., 2014. *Medición del Color.* [Online]
Available at: <http://quimicotecnica.com/tip-color-measurement/>

QUIMINET, 2011. *La importancia de los colorantes en la industria textil.* [Online]
Available at: <https://www.quiminet.com/articulos/la-importancia-de-los-colorantes-en-la-industria-textil-2637578.htm>

Robinson, T., McMullan, G. & Marchant, R. y. N. P., 2001. Bioresource Technology. *Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative.*, pp. 77, 247.

Rodríguez, O. & Roldan, J. J., 1997. *Alternativas para el tratamiento de aguas residuales en tintorerías textiles : Caso PANTEX S.A.Medellín.* Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Química, s.n., p. 150.

Rojas, G. et al., 2005. Adsorption of Chromium onto Cross-Linked Chitosan. Separation and Purification Technology. *Scientific Research Publishing*, Volume 44, pp. 31-36.

Saldaña, F. P., Sandoval, M. J. C., López, L. R. & Salcedo, S. E., 2001. Utilización de un índice de diversidad para determinar la calidad del agua en sistemas loticos.. *Ingeniería Hidráulica de México*, pp. 16(2): 57-66..

Sarria, V. & Pullgarin, C., 2004. Desarrollo de procesos fotoquímicos y biológicos acoplados como una alternativa natural para el tratamiento de aguas.. *Seminario Internacional de Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales.*, pp. 108-115.

Secretaria de Economía, 2012. [Online]

Available at: <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/economia-para-todos/abc-de-economia/mercado-interno/365-textil-y-vestido>

Sedlak, D., 2013. *AG Afirm Group*. [Online]

Available at: <http://www.afirm-group.com/wp-content/uploads/2013/07/Apendice-F-Manual-de-Guia-Quimica.pdf>

Stolz, A., 2001. Basic and applied aspects in the microbial degradation of azo dyes.. *Applied Microbiology and Biotechnology.*, pp. 56: 69-80.

Supaca, N. et al., 2004. Microbial decolorization of reactive azo dyes in a sequential anaerobic-aerobic system.. *Chemical Engineering Journal.* , pp. 99(2): 169-176..

Vandevivere, P. & Veertraete, W., 1998. Treatment and reuse of wastewater from the textile industry: review of emerging technologies.. *Journal of chemical technology and biotechnology.*, pp. 72, 289-302..

Vogelpohl, A., 2007. Applications of AOPs in wastewater treatment.. *Water Science and Technology* 55, pp. 207-211.

Vogelpohl, A. & Kim, S. M., 2004. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in wastewater treatment.. *Journal Industrial Engineering Chemistry.*, pp. 10, 33-40.

Weisburger, J., 2002. Comments on the history and importance of aromatic and heterocyclic amines in public health.. *Mutation Research*, pp. 506-507, 9.

Wong, Y. X. & Yu, J., 1999. Laccase-catalyzed decolorization of synthetic dyes. *Water Research*; 33(16), p. 3512–3520.

Zhang, F., Knapp, S. & Tapley, N., 1999. Decolourization of cotton bleaching effluent with woodrotting fungus. *Water Reserch*; 33 (4), pp. 919-928.

Zhang, H., Choi, H. J. & Huang, C., 2005. Optimization of Fenton process for the treatment of landfill leachate.. *Journal of Hazardous Materials.*, pp. 125, 166-174.

Anexo A Evaluación de diversos fotocatalizadores para el proceso Foto-Fenton.

Tabla 21 Pruebas con diversas lámparas de luz: UV, lámpara de luz blanca y luz led

	UVC Germicida G15T8 + O3	INSECTRONIC -200 F10T9/BL + O3	O3	INSECTRONIC -200 F10T9/BL	O3 no enchaquetad o	O3 (2)	TECNOLITE F15T8D + O3	RAISETEC RT-LEDT- 9W	LEDs enchaquetado el reactor
Tiempo de muestra (min)	Absorbanci a ($\lambda=577$ nm)	Absorbancia ($\lambda=577$ nm)	Absorbanci a ($\lambda=577$ nm)	Absorbancia ($\lambda=577$ nm)	Absorbancia ($\lambda=577$ nm)	Absorbanci a ($\lambda=577$ nm)	Absorbanci a ($\lambda=577$ nm)	Absorbanci a ($\lambda=577$ nm)	Absorbancia ($\lambda=577$ nm)
0	0.728	0.685	0.698	0.699	0.665	0.687	0.725	0.755	0.727
10	0.558	0.576	0.566	0.703	0.502	0.551	0.616	0.63	0.619
20	0.455	0.489	0.472	0.7	0.368	0.462	0.53	0.534	0.549
30	0.383	0.413	0.402	0.699	0.276	0.385	0.459	0.448	0.492
40	0.319	0.375	0.346	0.701	0.215	0.324	0.386	0.381	0.448
50	0.268	0.324	0.297	0.7	0.173	0.268	0.341	0.328	0.418
60	0.228	0.29	0.259	0.699	0.144	0.229	0.296	0.283	0.384
70	0.193	0.259	0.229	0.702	0.122	0.191	0.256	0.253	0.354
80	0.169	0.234	0.202	0.699	0.106	0.162	0.223	0.234	0.326
90	0.151	0.208	0.181	0.701	0.091	0.14	0.195	0.215	0.297
100	0.138	0.183	0.158	0.702	0.082	0.124	0.172	0.197	0.275

En la tabla 92 se muestran las pruebas realizadas para poder llevar a cabo la elección de la lámpara que fue utilizada en este trabajo utilizando como agente oxidante O_3 . Así mismo se muestra la figura 102 en la cual se graficaron dichos resultados obtenidos.

Se utilizó para estos experimentos un equipo ozonador de la marca Biozon modelo OZC-0.5GB con alimentación directa de aire con un flujo de aire de 0.66 l/min obteniendo una concentración de ozono en el aire 0.2218 mg/l y un flujo de ozono de 0.1464 mg/min o 0.0030 mmol/min.

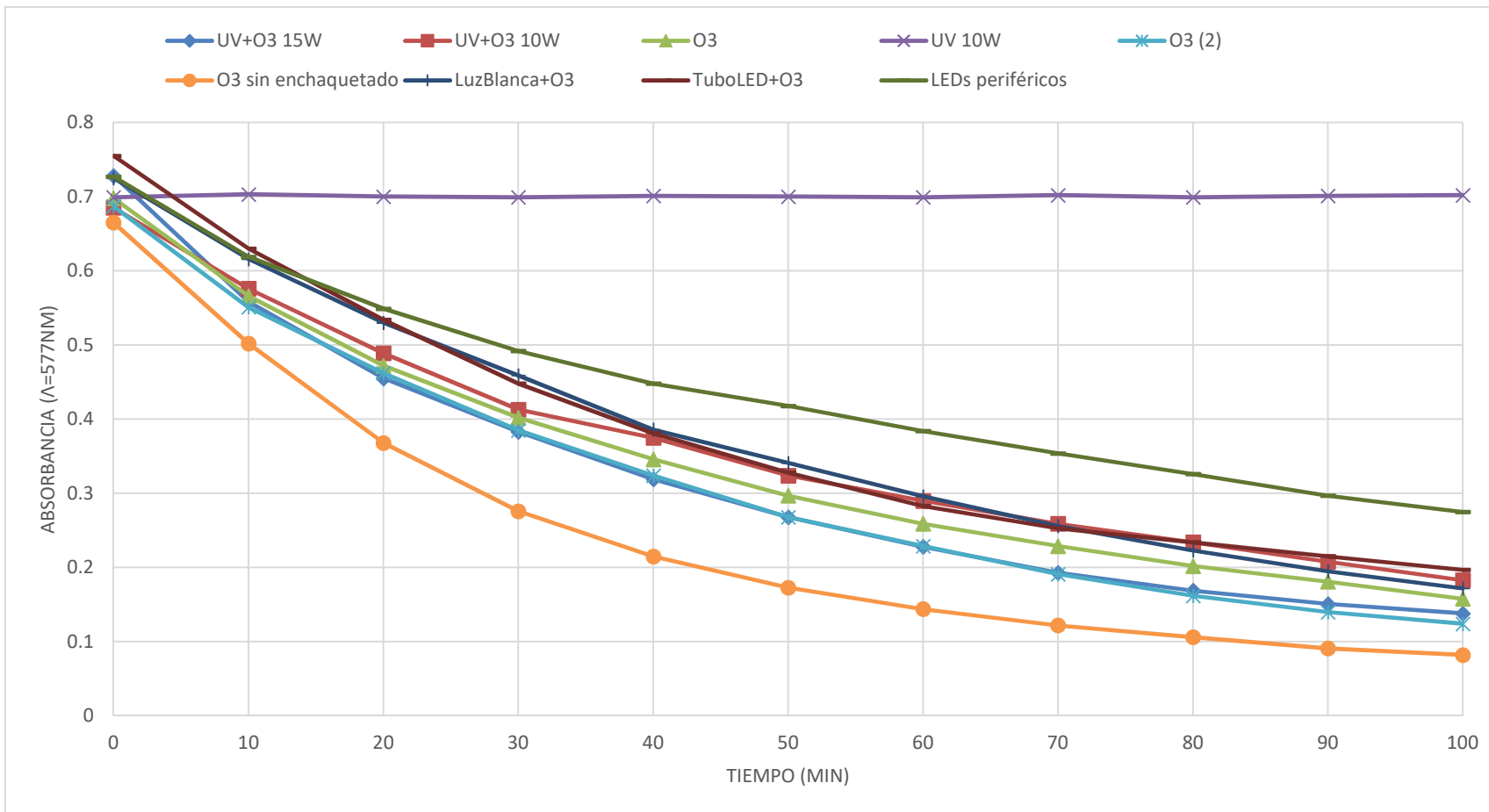


Figura 65 Pruebas con diversas lámparas de luz : UV, lámpara de luz blanca y luz led

La grafica muestra los resultados obtenidos a partir de diferentes modelos de lámparas. Estos resultados describen la capacidad de fotocátalisis (producción de radicales hidroxilo). Se utilizó para medir la velocidad de degradación el colorante NA52, y el parámetro indirecto para medir su concentración fue la absorbancia a una longitud de onda de 577 nm.

Anexo B Pruebas de control para los colorantes NA52 y RD82

Tabla 22 Estabilidad del colorante NA52 en solución

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.555	0.557	0.556	0.00141421
5	0.55	0.553	0.5515	0.00212132
10	0.552	0.552	0.552	0
15	0.554	0.552	0.553	0.00141421
20	0.553	0.55	0.5515	0.00212132
25	0.552	0.552	0.552	0
30	0.55	0.554	0.552	0.00282843
35	0.55	0.555	0.5525	0.00353553
40	0.551	0.554	0.5525	0.00212132
45	0.553	0.553	0.553	0
50	0.55	0.552	0.551	0.00141421
55	0.552	0.555	0.5535	0.00212132
60	0.552	0.551	0.5515	0.00070711
65	0.553	0.555	0.554	0.00141421
70	0.553	0.555	0.554	0.00141421

Tabla 23 Colorante NA52 más lámpara de luz Uv

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.556	0.547	0.5515	0.00636396
5	0.555	0.554	0.5545	0.00070711
10	0.549	0.552	0.5505	0.00212132
15	0.555	0.551	0.553	0.00282843
20	0.549	0.556	0.5525	0.00494975
25	0.549	0.55	0.5495	0.00070711
30	0.552	0.555	0.5535	0.00212132
35	0.556	0.554	0.555	0.00141421
40	0.551	0.55	0.5505	0.00070711
45	0.554	0.551	0.5525	0.00212132
50	0.552	0.554	0.553	0.00141421
55	0.551	0.55	0.5505	0.00070711
60	0.55	0.556	0.553	0.00424264
65	0.556	0.549	0.5525	0.00494975
70	0.556	0.552	0.554	0.00282843

Tabla 24 Colorante NA52 más agitación				
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.555	0.556	0.5555	0.00070711
5	0.545	0.554	0.5495	0.00636396
10	0.547	0.551	0.549	0.00282843
15	0.548	0.548	0.548	0
20	0.549	0.549	0.549	0
25	0.554	0.549	0.5515	0.00353553
30	0.552	0.551	0.5515	0.00070711
35	0.552	0.551	0.5515	0.00070711
40	0.55	0.548	0.549	0.00141421
45	0.547	0.547	0.547	0
50	0.548	0.55	0.549	0.00141421
55	0.547	0.556	0.5515	0.00636396
60	0.554	0.547	0.5505	0.00494975
65	0.545	0.553	0.549	0.00565685
70	0.551	0.556	0.5535	0.00353553

Tabla 25 Colorante NA52, lámpara de luz Uv mas agitación				
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.553	0.552	0.5525	0.00070711
5	0.555	0.557	0.556	0.00141421
10	0.558	0.553	0.5555	0.00353553
15	0.559	0.557	0.558	0.00141421
20	0.559	0.556	0.5575	0.00212132
25	0.56	0.556	0.558	0.00282843
30	0.558	0.548	0.553	0.00707107
35	0.551	0.557	0.554	0.00424264
40	0.552	0.548	0.55	0.00282843
45	0.556	0.553	0.5545	0.00212132
50	0.55	0.554	0.552	0.00282843
55	0.553	0.552	0.5525	0.00070711
60	0.558	0.554	0.556	0.00282843
65	0.554	0.551	0.5525	0.00212132
70	0.554	0.553	0.5535	0.00070711

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.558	0.557	0.5575	0.00070711
5	0.553	0.555	0.554	0.00141421
10	0.553	0.554	0.5535	0.00070711
15	0.555	0.557	0.556	0.00141421
20	0.553	0.555	0.554	0.00141421
25	0.553	0.555	0.554	0.00141421
30	0.553	0.552	0.5525	0.00070711
35	0.554	0.556	0.555	0.00141421
40	0.557	0.548	0.5525	0.00636396
45	0.557	0.549	0.553	0.00565685
50	0.548	0.552	0.55	0.00282843
55	0.553	0.548	0.5505	0.00353553
60	0.556	0.549	0.5525	0.00494975
65	0.552	0.55	0.551	0.00141421
70	0.557	0.55	0.5535	0.00494975

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.505	0.51	0.5075	0.00353553
5	0.505	0.509	0.507	0.00282843
10	0.503	0.507	0.505	0.00282843
15	0.504	0.508	0.506	0.00282843
20	0.503	0.507	0.505	0.00282843
25	0.505	0.508	0.5065	0.00212132
30	0.504	0.508	0.506	0.00282843
35	0.503	0.507	0.505	0.00282843
40	0.505	0.507	0.506	0.00141421
45	0.503	0.507	0.505	0.00282843
50	0.502	0.506	0.504	0.00282843
55	0.503	0.507	0.505	0.00282843
60	0.504	0.506	0.505	0.00141421
65	0.503	0.505	0.504	0.00141421
70	0.502	0.507	0.5045	0.00353553

Tabla 28 Colorante RD82 más lámpara de luz Uv				
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.508	0.512	0.51	0.00282843
5	0.507	0.511	0.509	0.00282843
10	0.508	0.51	0.509	0.00141421
15	0.506	0.509	0.5075	0.00212132
20	0.505	0.51	0.5075	0.00353553
25	0.506	0.512	0.509	0.00424264
30	0.504	0.508	0.506	0.00282843
35	0.507	0.51	0.5085	0.00212132
40	0.504	0.511	0.5075	0.00494975
45	0.506	0.512	0.509	0.00424264
50	0.504	0.514	0.509	0.00707107
55	0.505	0.509	0.507	0.00282843
60	0.506	0.504	0.505	0.00141421
65	0.507	0.503	0.505	0.00282843
70	0.508	0.51	0.509	0.00141421

Tabla 29 Colorante RD82 más agitación				
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.515	0.51	0.5125	0.00353553
5	0.514	0.508	0.511	0.00424264
10	0.514	0.509	0.5115	0.00353553
15	0.512	0.508	0.51	0.00282843
20	0.516	0.506	0.511	0.00707107
25	0.514	0.508	0.511	0.00424264
30	0.512	0.51	0.511	0.00141421
35	0.51	0.507	0.5085	0.00212132
40	0.508	0.512	0.51	0.00282843
45	0.511	0.514	0.5125	0.00212132
50	0.512	0.51	0.511	0.00141421
55	0.514	0.509	0.5115	0.00353553
60	0.516	0.507	0.5115	0.00636396
65	0.512	0.508	0.51	0.00282843
70	0.51	0.505	0.5075	0.00353553

Tabla 30 Colorante RD82, lámpara de luz Uv mas agitación				
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.521	0.516	0.5185	0.00353553
5	0.517	0.512	0.5145	0.00353553
10	0.516	0.511	0.5135	0.00353553
15	0.516	0.51	0.513	0.00424264
20	0.515	0.509	0.512	0.00424264
25	0.513	0.509	0.511	0.00282843
30	0.513	0.508	0.5105	0.00353553
35	0.512	0.509	0.5105	0.00212132
40	0.511	0.507	0.509	0.00282843
45	0.51	0.506	0.508	0.00282843
50	0.51	0.506	0.508	0.00282843
55	0.508	0.505	0.5065	0.00212132
60	0.51	0.504	0.507	0.00424264
65	0.509	0.504	0.5065	0.00353553
70	0.507	0.503	0.505	0.00282843

Tabla 31 Colorante RD82, lámpara de luz Uv, agitación más FeSO ₄				
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Promedio	Desviación estándar
0	0.512	0.517	0.5145	0.00353553
5	0.514	0.516	0.515	0.00141421
10	0.512	0.514	0.513	0.00141421
15	0.516	0.513	0.5145	0.00212132
20	0.511	0.512	0.5115	0.00070711
25	0.508	0.513	0.5105	0.00353553
30	0.507	0.514	0.5105	0.00494975
35	0.506	0.512	0.509	0.00424264
40	0.508	0.509	0.5085	0.00070711
45	0.507	0.508	0.5075	0.00070711
50	0.506	0.507	0.5065	0.00070711
55	0.505	0.506	0.5055	0.00070711
60	0.504	0.506	0.505	0.00141421
65	0.507	0.508	0.5075	0.00070711
70	0.512	0.51	0.511	0.00141421

Anexo C Absorbancias obtenidas de la degradación del colorante textil NA52

Tabla 32 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.505	0.498	0.487	0.4966667	0.0090738
5	0.231	0.221	0.219	0.2236667	0.0064291
10	0.171	0.165	0.163	0.1663333	0.0041633
15	0.143	0.139	0.135	0.139	0.004
20	0.127	0.123	0.125	0.125	0.002
25	0.112	0.107	0.104	0.1076667	0.0040415
30	0.102	0.097	0.095	0.098	0.0036056
35	0.096	0.092	0.09	0.0926667	0.0030551
40	0.092	0.088	0.087	0.089	0.0026458
45	0.091	0.087	0.088	0.0886667	0.0020817
50	0.089	0.086	0.086	0.087	0.0017321
55	0.091	0.088	0.089	0.0893333	0.0015275
60	0.089	0.087	0.088	0.088	0.001
65	0.085	0.084	0.085	0.0846667	0.0005774
70	0.088	0.087	0.086	0.087	0.001
%Remoción	82.57426	82.53012	82.34086		

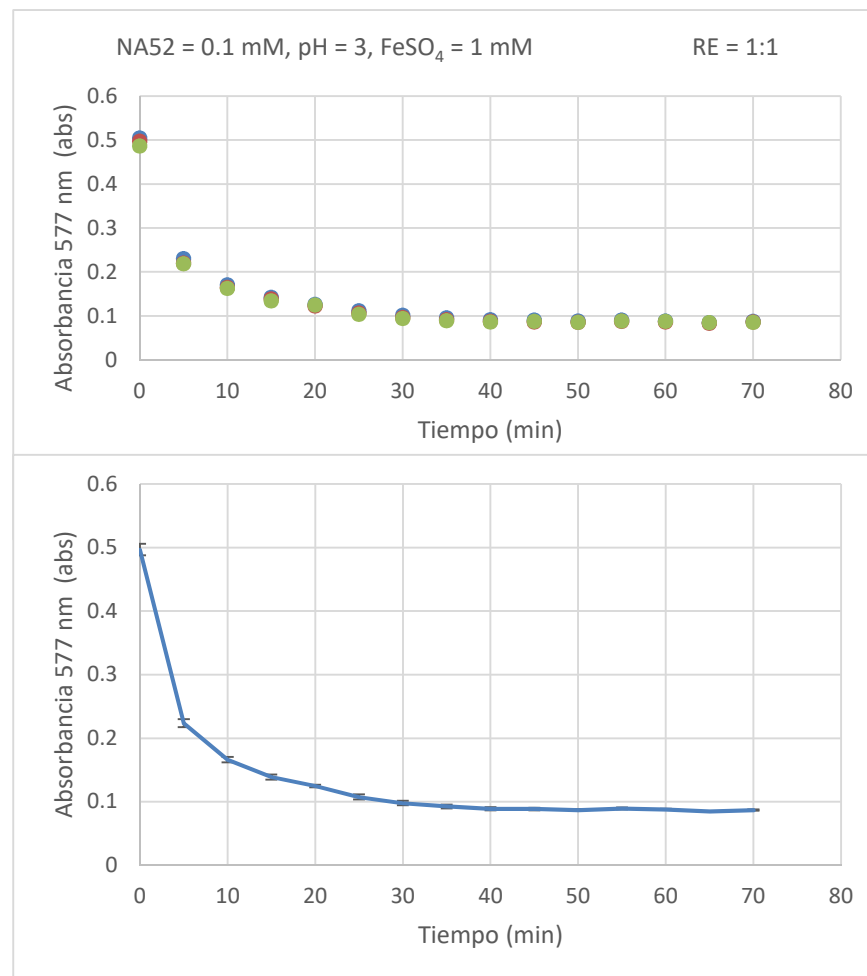


Figura 66 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:1

Tabla 33 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.485	0.489	0.492	0.4886667	0.0035119
5	0.262	0.264	0.267	0.2643333	0.0025166
10	0.21	0.217	0.221	0.216	0.0055678
15	0.149	0.152	0.155	0.152	0.003
20	0.1	0.102	0.106	0.1026667	0.0030551
25	0.064	0.069	0.071	0.068	0.0036056
30	0.044	0.047	0.053	0.048	0.0045826
35	0.033	0.038	0.042	0.0376667	0.0045092
40	0.027	0.029	0.032	0.0293333	0.0025166
45	0.024	0.027	0.03	0.027	0.003
50	0.016	0.019	0.027	0.0206667	0.0056862
55	0.016	0.018	0.028	0.0206667	0.0064291
60	0.013	0.021	0.024	0.0193333	0.0056862
65	0.013	0.017	0.022	0.0173333	0.0045092
70	0.012	0.019	0.019	0.0166667	0.0040415
%Remoción	97.52577	96.11452	96.13821		

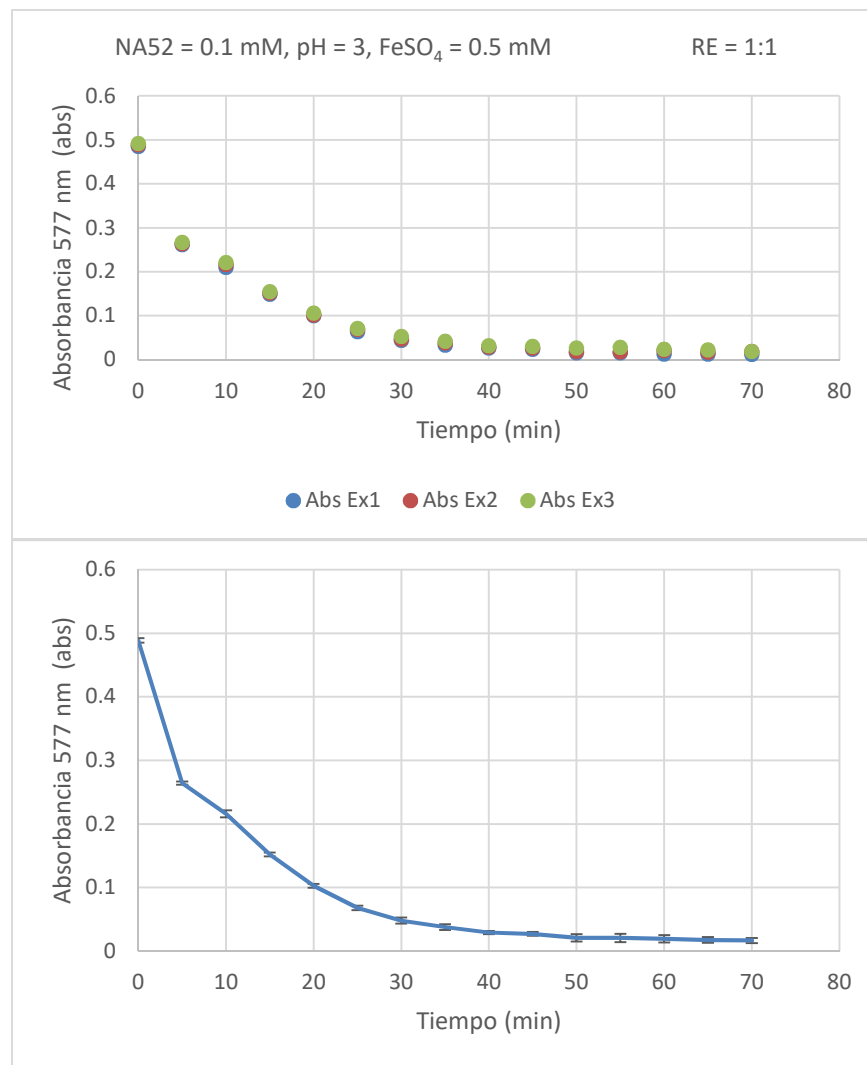


Figura 67 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:1

Tabla 34 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:2

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.495	0.475	0.483	0.4843333	0.0100664
5	0.204	0.214	0.207	0.2083333	0.0051316
10	0.136	0.142	0.145	0.141	0.0045826
15	0.116	0.126	0.13	0.124	0.0072111
20	0.102	0.11	0.11	0.1073333	0.0046188
25	0.098	0.103	0.107	0.1026667	0.0045092
30	0.095	0.096	0.1	0.097	0.0026458
35	0.096	0.091	0.093	0.0933333	0.0025166
40	0.091	0.089	0.09	0.09	0.001
45	0.091	0.089	0.091	0.0903333	0.0011547
50	0.092	0.091	0.089	0.0906667	0.0015275
55	0.091	0.087	0.088	0.0886667	0.0020817
60	0.093	0.09	0.091	0.0913333	0.0015275
65	0.091	0.088	0.089	0.0893333	0.0015275
70	0.091	0.086	0.087	0.088	0.0026458
%Remoción	81.6162	81.8947	81.9876		

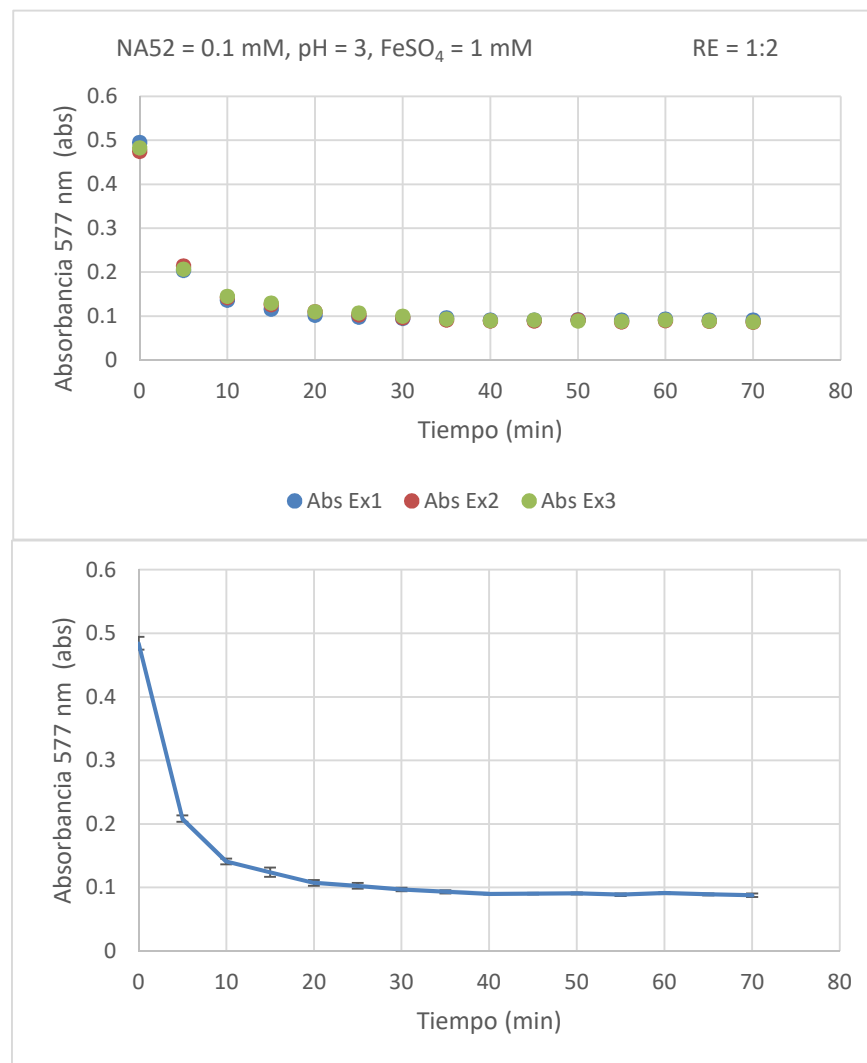


Figura 68 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:2

Tabla 35 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.5	0.505	0.497	0.5006667	0.0040415
5	0.298	0.231	0.232	0.2536667	0.038397
10	0.23	0.171	0.172	0.191	0.0337787
15	0.169	0.129	0.128	0.142	0.023388
20	0.127	0.095	0.073	0.0983333	0.0271539
25	0.094	0.075	0.074	0.081	0.0112694
30	0.077	0.062	0.061	0.0666667	0.0089629
35	0.063	0.059	0.06	0.0606667	0.0020817
40	0.06	0.053	0.054	0.0556667	0.0037859
45	0.055	0.051	0.052	0.0526667	0.0020817
50	0.052	0.053	0.053	0.0526667	0.0005774
55	0.054	0.054	0.055	0.0543333	0.0005774
60	0.056	0.052	0.052	0.0533333	0.0023094
65	0.053	0.054	0.052	0.053	0.001
70	0.053	0.055	0.053	0.0536667	0.0011547
%Remoción	89.4	89.10891	89.33602		

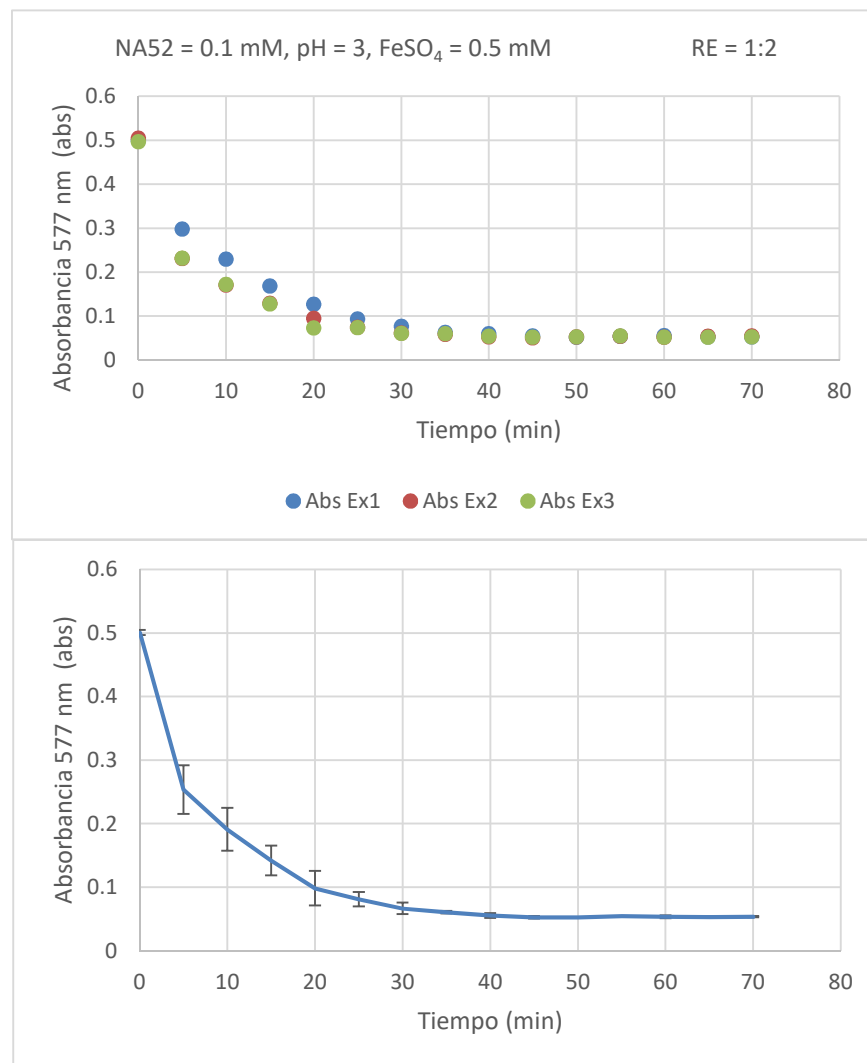


Figura 69 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:2

Tabla 36 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 2:1					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.483	0.485	0.493	0.487	0.0052915
5	0.281	0.283	0.284	0.2826667	0.0015275
10	0.21	0.212	0.215	0.2123333	0.0025166
15	0.167	0.169	0.171	0.169	0.002
20	0.133	0.136	0.139	0.136	0.003
25	0.112	0.117	0.12	0.1163333	0.0040415
30	0.101	0.104	0.106	0.1036667	0.0025166
35	0.091	0.095	0.1	0.0953333	0.0045092
40	0.086	0.09	0.091	0.089	0.0026458
45	0.084	0.087	0.088	0.0863333	0.0020817
50	0.081	0.085	0.087	0.0843333	0.0030551
55	0.082	0.083	0.088	0.0843333	0.0032146
60	0.082	0.084	0.086	0.084	0.002
65	0.082	0.082	0.088	0.084	0.0034641
70	0.083	0.083	0.086	0.084	0.0017321
%Remoción	82.81573	82.8866	82.55578		

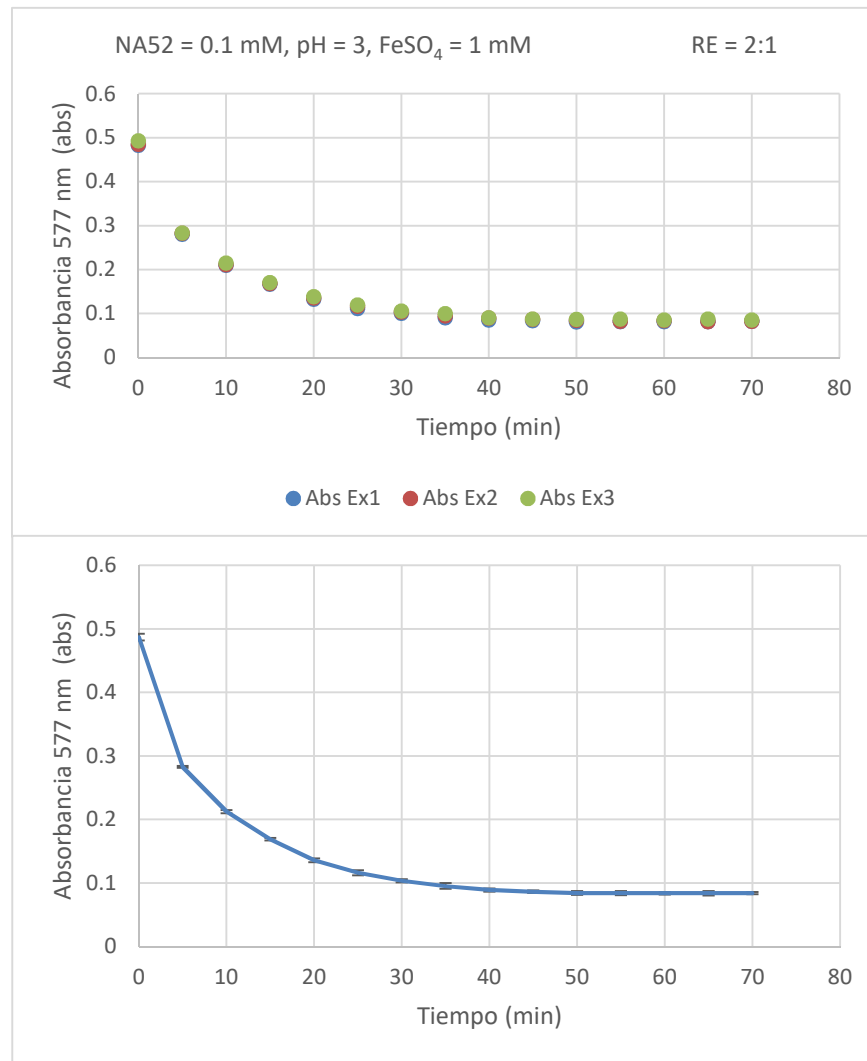


Figura 70 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 2:1

Tabla 37 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 2:1					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.483	0.485	0.491	0.4863333	0.0041633
5	0.21	0.211	0.214	0.2116667	0.0020817
10	0.131	0.133	0.136	0.1333333	0.0025166
15	0.088	0.09	0.093	0.0903333	0.0025166
20	0.063	0.065	0.067	0.065	0.002
25	0.052	0.054	0.056	0.054	0.002
30	0.046	0.048	0.05	0.048	0.002
35	0.036	0.039	0.043	0.0393333	0.0035119
40	0.03	0.031	0.035	0.032	0.0026458
45	0.026	0.028	0.029	0.0276667	0.0015275
50	0.026	0.027	0.028	0.027	0.001
55	0.021	0.025	0.026	0.024	0.0026458
60	0.014	0.017	0.019	0.0166667	0.0025166
65	0.015	0.019	0.021	0.0183333	0.0030551
70	0.018	0.021	0.023	0.0206667	0.0025166
%Remoción	96.27329	95.6701	95.31568		

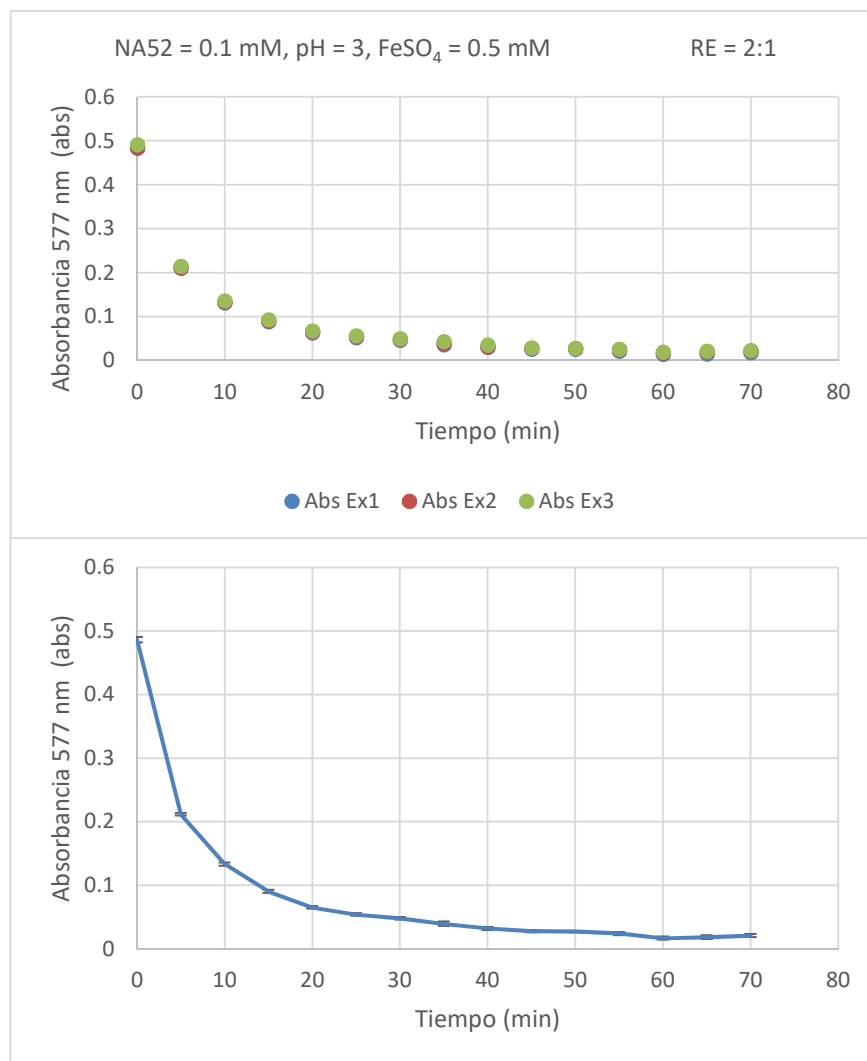


Figura 71 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 2:1

Tabla 38 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.543	0.546	0.55	0.5463333	0.0035119
5	0.55	0.556	0.557	0.5543333	0.0037859
10	0.557	0.558	0.562	0.559	0.0026458
15	0.565	0.566	0.567	0.566	0.001
20	0.553	0.55	0.558	0.5536667	0.0040415
25	0.56	0.562	0.564	0.562	0.002
30	0.566	0.565	0.563	0.5646667	0.0015275
35	0.546	0.547	0.548	0.547	0.001
40	0.543	0.545	0.547	0.545	0.002
45	0.546	0.549	0.548	0.5476667	0.0015275
50	0.548	0.55	0.552	0.55	0.002
55	0.541	0.542	0.544	0.5423333	0.0015275
60	0.546	0.549	0.551	0.5486667	0.0025166
65	0.542	0.545	0.547	0.5446667	0.0025166
70	0.543	0.547	0.549	0.5463333	0.0030551
%Remoción	0	0.18315	0.181818		

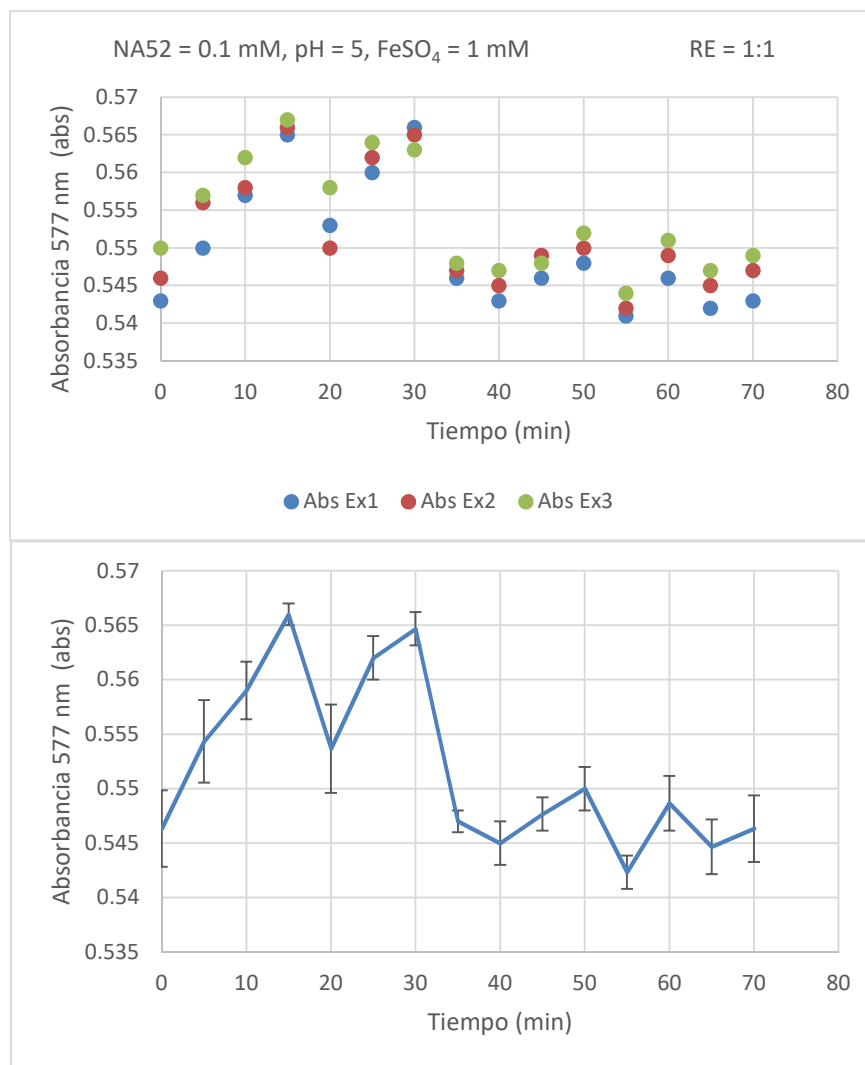


Figura 72 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:1

Tabla 39 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:1

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.609	0.607	0.604	0.6066667	0.0025166
5	0.605	0.604	0.603	0.604	0.001
10	0.609	0.607	0.611	0.609	0.002
15	0.632	0.635	0.638	0.635	0.003
20	0.606	0.603	0.606	0.605	0.0017321
25	0.599	0.597	0.601	0.599	0.002
30	0.602	0.605	0.603	0.6033333	0.0015275
35	0.605	0.607	0.605	0.6056667	0.0011547
40	0.603	0.607	0.605	0.605	0.002
45	0.599	0.605	0.603	0.6023333	0.0030551
50	0.604	0.608	0.607	0.6063333	0.0020817
55	0.597	0.603	0.601	0.6003333	0.0030551
60	0.598	0.602	0.6	0.6	0.002
65	0.602	0.603	0.602	0.6023333	0.0005774
70	0.598	0.6	0.601	0.5996667	0.0015275
%Remoción	1.80624	1.153213	0.496689		

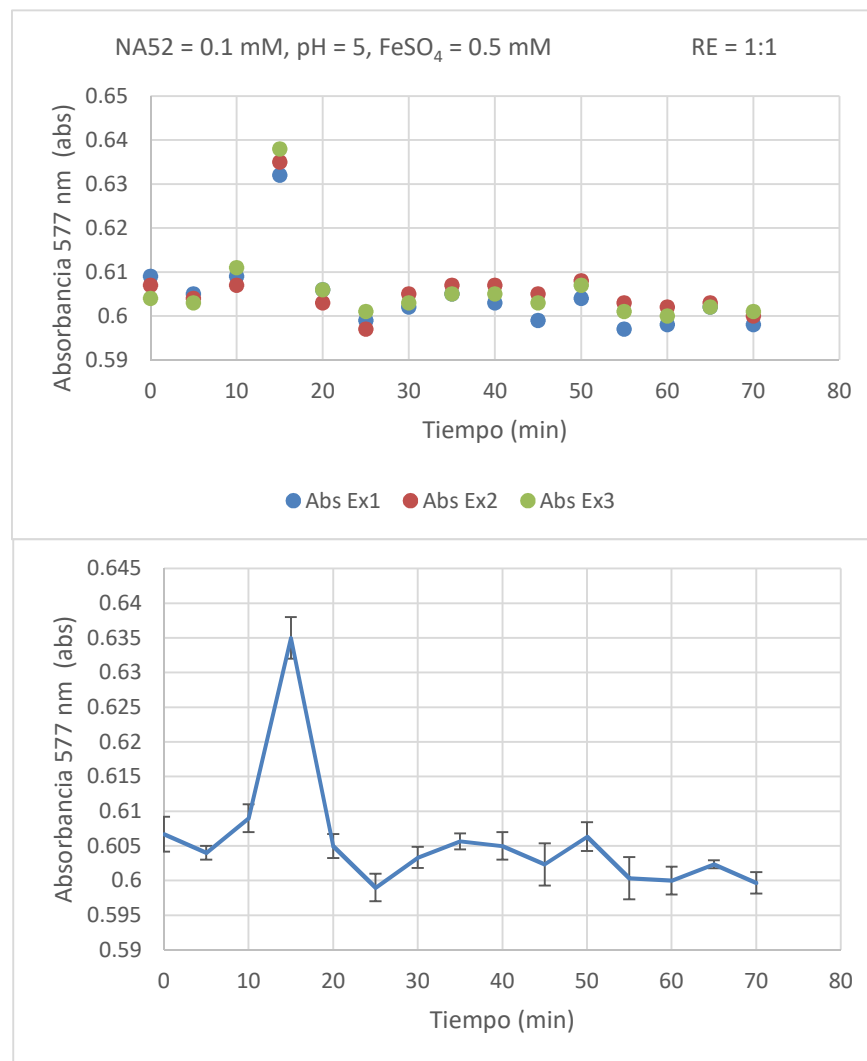


Figura 73 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:1

Tabla 40 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:2					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.483	0.485	0.48	0.4826667	0.0025166
5	0.478	0.48	0.475	0.4776667	0.0025166
10	0.485	0.487	0.482	0.4846667	0.0025166
15	0.473	0.472	0.471	0.472	0.001
20	0.479	0.481	0.477	0.479	0.002
25	0.485	0.488	0.481	0.4846667	0.0035119
30	0.485	0.487	0.481	0.4843333	0.0030551
35	0.486	0.489	0.483	0.486	0.003
40	0.48	0.483	0.485	0.4826667	0.0025166
45	0.475	0.478	0.472	0.475	0.003
50	0.491	0.493	0.488	0.4906667	0.0025166
55	0.483	0.486	0.485	0.4846667	0.0015275
60	0.484	0.487	0.483	0.4846667	0.0020817
65	0.479	0.481	0.481	0.4803333	0.0011547
70	0.479	0.481	0.481	0.4803333	0.0011547
%Remoción	0.828157	0.824742	0.20833		

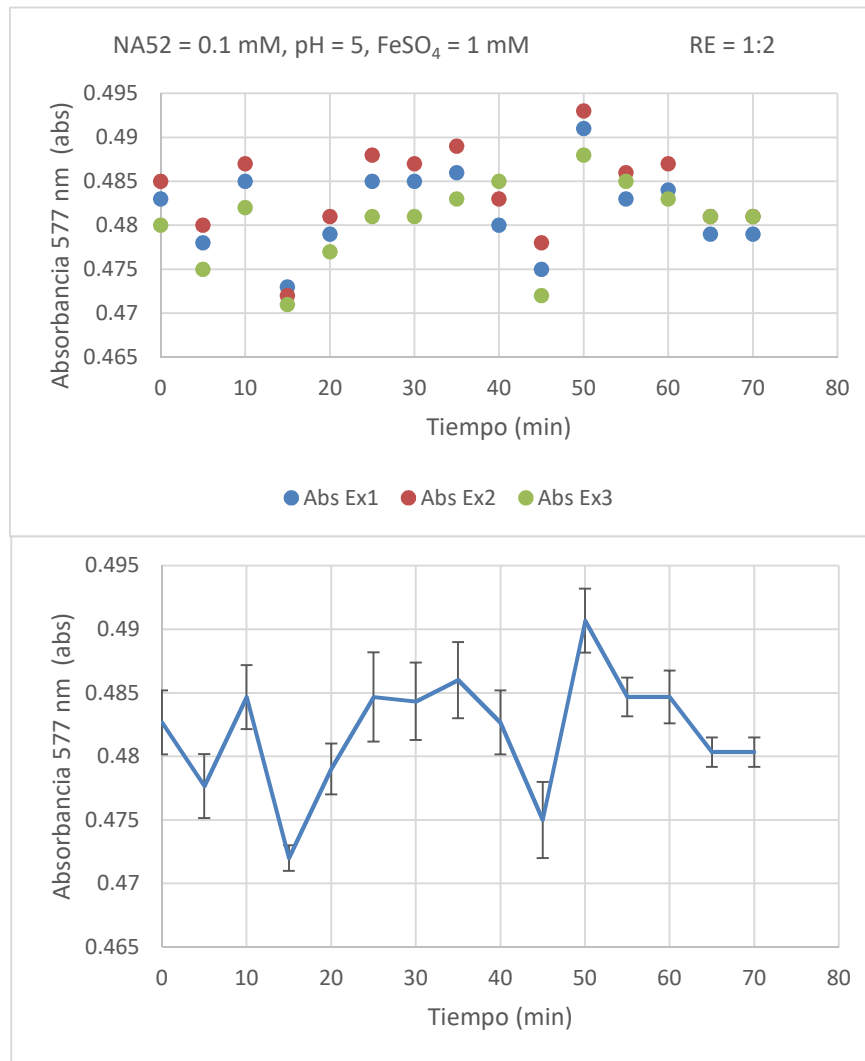


Figura 74 Absorbancias de NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:2

Tabla 41 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:2

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.548	0.555	0.553	0.552	0.0036056
5	0.56	0.564	0.562	0.562	0.002
10	0.538	0.542	0.541	0.5403333	0.0020817
15	0.533	0.535	0.537	0.535	0.002
20	0.535	0.537	0.539	0.537	0.002
25	0.538	0.543	0.544	0.5416667	0.0032146
30	0.542	0.545	0.546	0.5443333	0.0020817
35	0.545	0.548	0.549	0.5473333	0.0020817
40	0.547	0.552	0.554	0.551	0.0036056
45	0.543	0.547	0.549	0.5463333	0.0030551
50	0.54	0.543	0.547	0.5433333	0.0035119
55	0.538	0.541	0.543	0.5406667	0.0025166
60	0.537	0.542	0.543	0.5406667	0.0032146
65	0.54	0.547	0.551	0.546	0.0055678
70	0.538	0.54	0.539	0.539	0.001
%Remoción	1.824818	2.702703	2.531646		

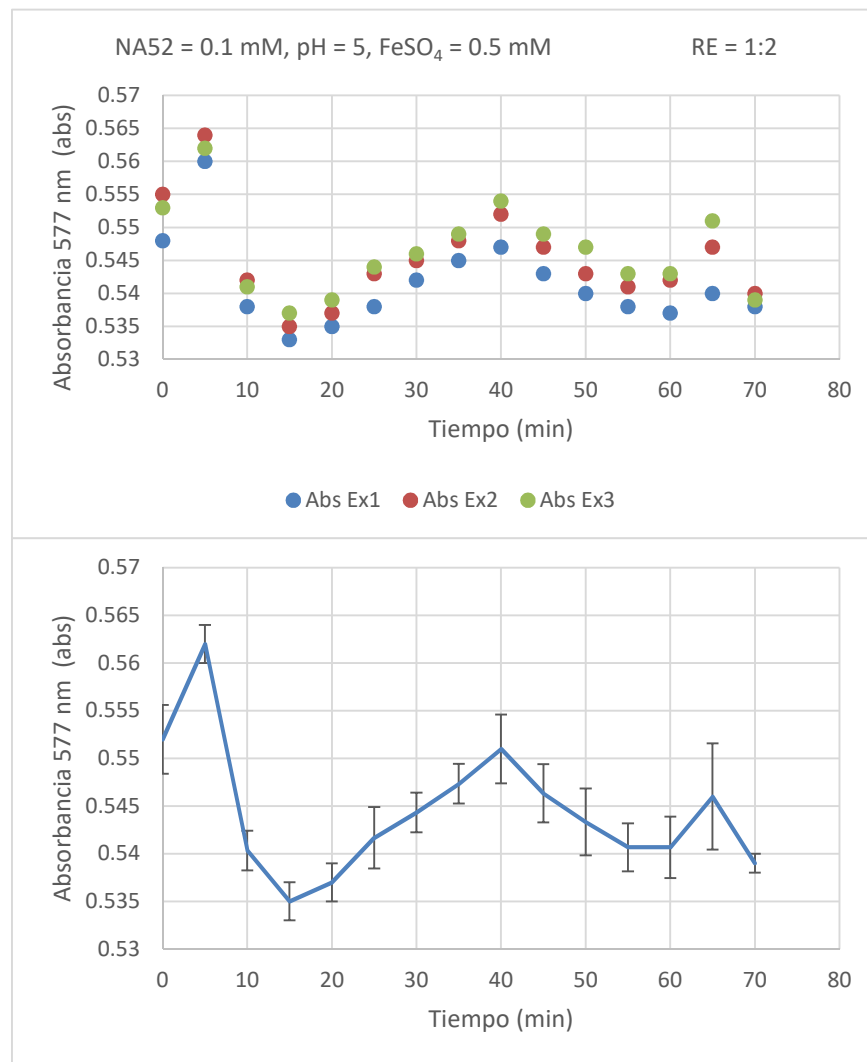


Figura 75 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:2

Tabla 42 Absorbancias de NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 1 mM RE = 2:1

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.503	0.505	0.515	0.5076667	0.0064291
5	0.543	0.547	0.556	0.5486667	0.0066583
10	0.468	0.477	0.485	0.4766667	0.0085049
15	0.475	0.478	0.481	0.478	0.003
20	0.479	0.482	0.486	0.4823333	0.0035119
25	0.477	0.48	0.485	0.4806667	0.0040415
30	0.474	0.476	0.479	0.4763333	0.0025166
35	0.476	0.479	0.482	0.479	0.003
40	0.474	0.477	0.481	0.4773333	0.0035119
45	0.477	0.479	0.483	0.4796667	0.0030551
50	0.474	0.476	0.477	0.4756667	0.0015275
55	0.475	0.477	0.479	0.477	0.002
60	0.471	0.473	0.471	0.4716667	0.0011547
65	0.473	0.475	0.474	0.474	0.001
70	0.469	0.473	0.475	0.4723333	0.0030551
%Remoción	6.759443	6.336634	7.76699		

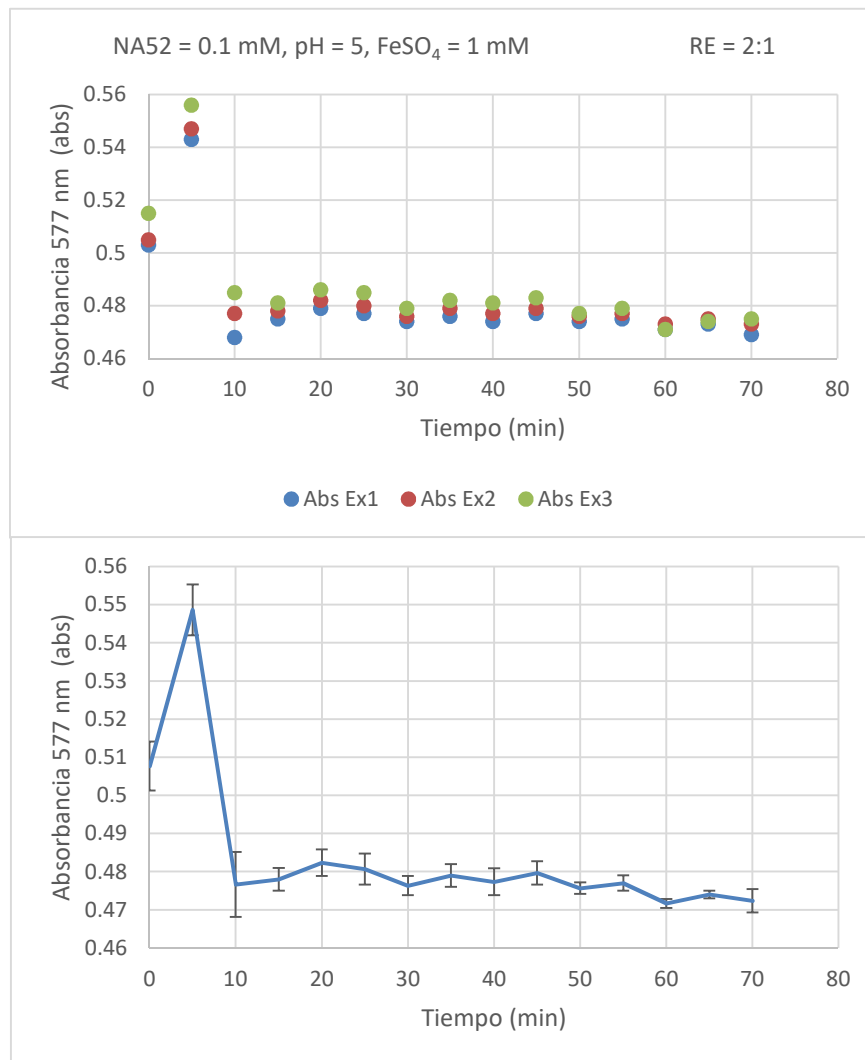


Figura 76 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 1 mM RE = 2:1

Tabla 43 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 2:1

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.552	0.532	0.544	0.5426667	0.0100664
5	0.543	0.527	0.532	0.534	0.0081854
10	0.541	0.525	0.532	0.5326667	0.0080208
15	0.54	0.542	0.537	0.5396667	0.0025166
20	0.543	0.537	0.54	0.54	0.003
25	0.542	0.538	0.541	0.5403333	0.0020817
30	0.54	0.536	0.538	0.538	0.002
35	0.543	0.537	0.539	0.5396667	0.0030551
40	0.553	0.549	0.551	0.551	0.002
45	0.549	0.546	0.548	0.5476667	0.0015275
50	0.549	0.546	0.547	0.5473333	0.0015275
55	0.54	0.537	0.538	0.5383333	0.0015275
60	0.548	0.542	0.545	0.545	0.003
65	0.532	0.539	0.536	0.5356667	0.0035119
70	0.53	0.536	0.533	0.533	0.003
%Remoción	3.985507	0.75188	2.022059		

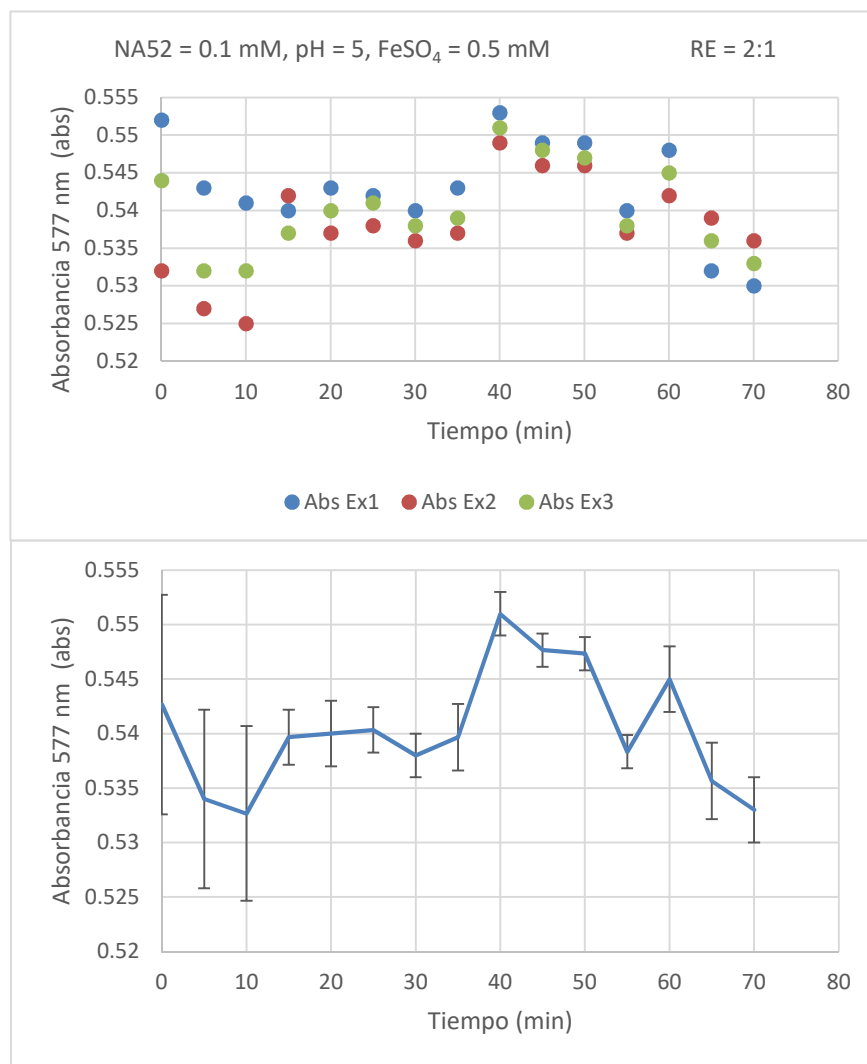


Figura 77 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 5, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 2:1

Tabla 44 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.575	0.553	0.588	0.572	0.0176918
5	0.565	0.551	0.582	0.566	0.0155242
10	0.572	0.554	0.58	0.5686667	0.0133167
15	0.572	0.556	0.583	0.5703333	0.0135769
20	0.571	0.559	0.58	0.57	0.0105357
25	0.564	0.552	0.577	0.5643333	0.0125033
30	0.559	0.551	0.569	0.5596667	0.0090185
35	0.567	0.552	0.572	0.5636667	0.0104083
40	0.559	0.553	0.564	0.5586667	0.0055076
45	0.564	0.554	0.569	0.5623333	0.0076376
50	0.562	0.557	0.564	0.561	0.0036056
55	0.564	0.56	0.557	0.5603333	0.0035119
60	0.566	0.555	0.556	0.559	0.0060828
65	0.567	0.562	0.553	0.5606667	0.0070946
70	0.562	0.567	0.552	0.5603333	0.0076376
%Remoción	2.26087	2.53165	6.122449		

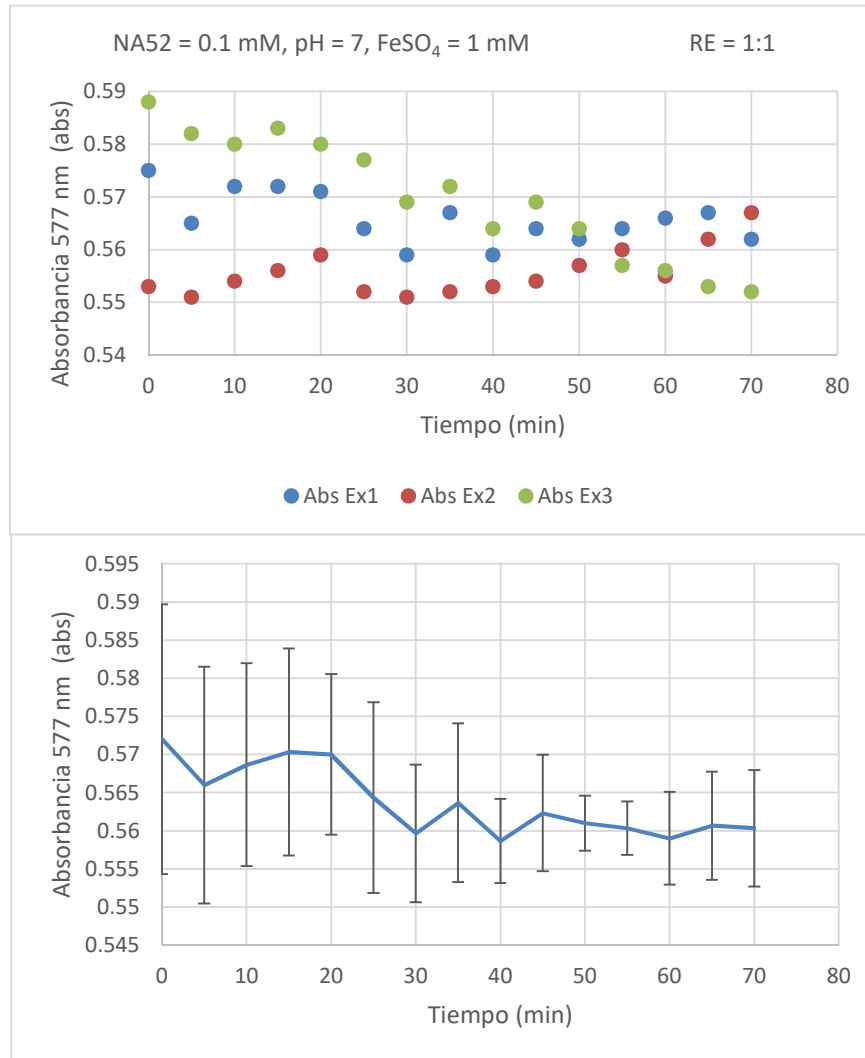


Figura 78 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:1

Tabla 45 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:1

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.585	0.59	0.578	0.5843333	0.0060277
5	0.599	0.605	0.593	0.599	0.006
10	0.6	0.606	0.594	0.6	0.006
15	0.594	0.597	0.586	0.5923333	0.0056862
20	0.593	0.596	0.585	0.5913333	0.0056862
25	0.592	0.594	0.584	0.59	0.0052915
30	0.589	0.592	0.582	0.5876667	0.0051316
35	0.588	0.591	0.581	0.5866667	0.0051316
40	0.587	0.59	0.579	0.5853333	0.0056862
45	0.584	0.582	0.58	0.582	0.002
50	0.588	0.592	0.578	0.586	0.0072111
55	0.583	0.586	0.579	0.5826667	0.0035119
60	0.585	0.587	0.573	0.5816667	0.0075719
65	0.58	0.582	0.575	0.579	0.0036056
70	0.582	0.585	0.576	0.581	0.0045826
%Remoción	0.512821	0.847458	0.346021		

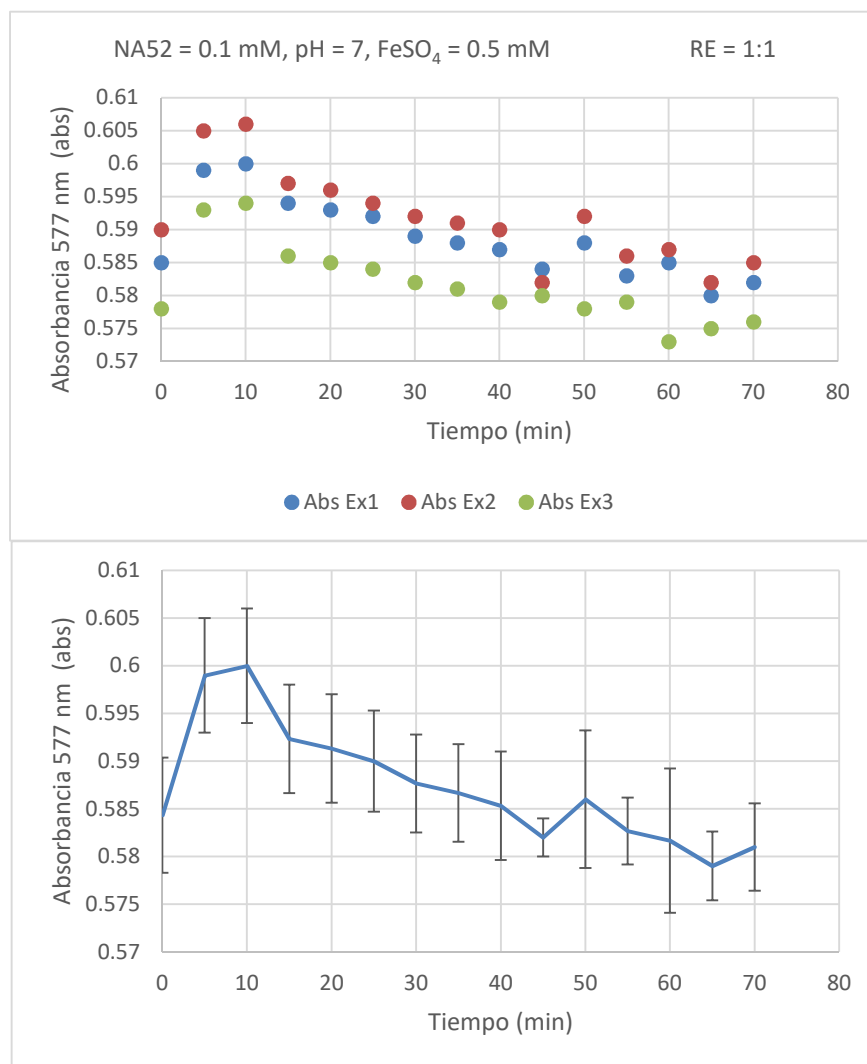


Figura 79 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:1

Tabla 46 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:2

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.555	0.552	0.56	0.556	0.00565685
5	0.549	0.546	0.551	0.5485	0.00353553
10	0.547	0.545	0.549	0.547	0.00282843
15	0.543	0.541	0.545	0.543	0.00282843
20	0.537	0.535	0.54	0.5375	0.00353553
25	0.531	0.528	0.53	0.529	0.00141421
30	0.532	0.528	0.531	0.5295	0.00212132
35	0.533	0.535	0.537	0.536	0.00141421
40	0.525	0.527	0.529	0.528	0.00141421
45	0.522	0.525	0.527	0.526	0.00141421
50	0.534	0.537	0.539	0.538	0.00141421
55	0.536	0.538	0.539	0.5385	0.00070711
60	0.537	0.539	0.541	0.54	0.00141421
65	0.542	0.541	0.542	0.5415	0.00070711
70	0.536	0.537	0.539	0.538	0.00141421
%Remoción	3.423423	2.717391	3.75		

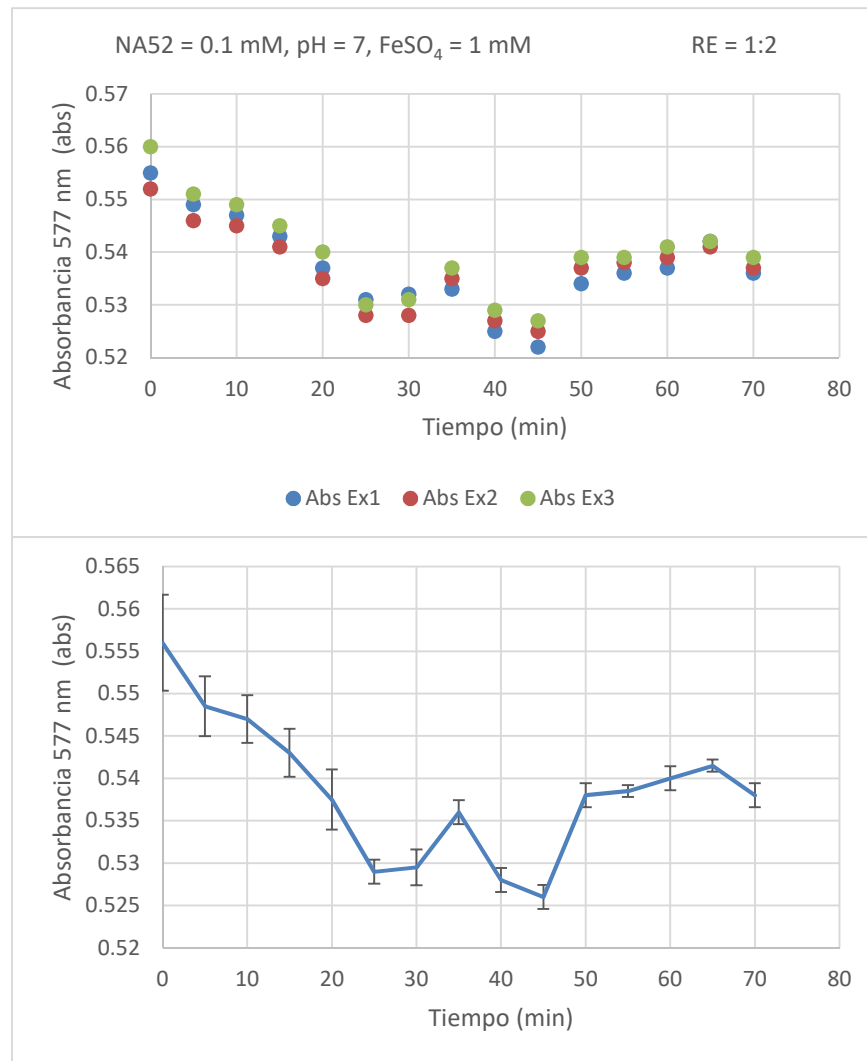


Figura 80 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:2

Tabla 47 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:2

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.547	0.55	0.562	0.556	0.0084853
5	0.543	0.547	0.549	0.548	0.0014142
10	0.537	0.541	0.545	0.543	0.0028284
15	0.535	0.538	0.542	0.54	0.0028284
20	0.532	0.534	0.536	0.535	0.0014142
25	0.53	0.532	0.535	0.5335	0.0021213
30	0.533	0.535	0.537	0.536	0.0014142
35	0.527	0.53	0.538	0.534	0.0056569
40	0.525	0.529	0.532	0.5305	0.0021213
45	0.527	0.529	0.533	0.531	0.0028284
50	0.531	0.53	0.532	0.531	0.0014142
55	0.528	0.529	0.531	0.53	0.0014142
60	0.526	0.527	0.539	0.533	0.0084853
65	0.524	0.526	0.529	0.5275	0.0021213
70	0.526	0.529	0.531	0.53	0.0014142
%Remoción	3.839122	3.818182	5.516014		

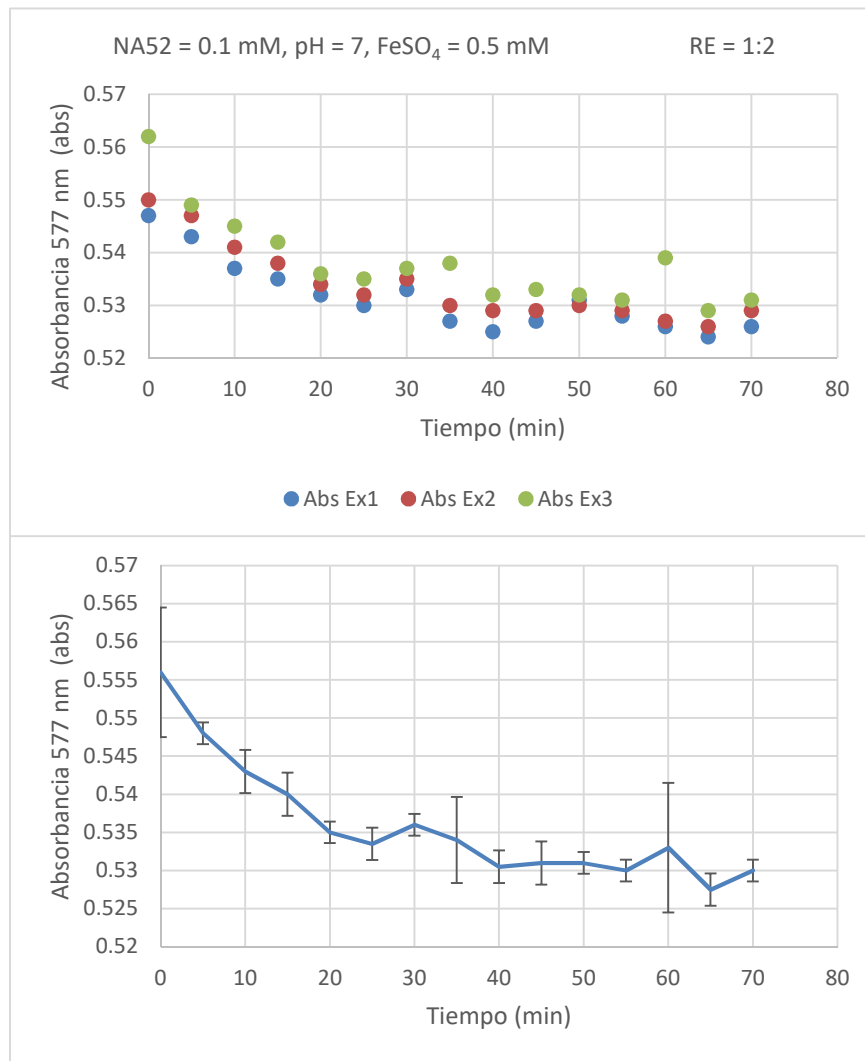


Figura 81 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:2

Tabla 48 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 1 mM RE = 2:1

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.497	0.501	0.5	0.4993333	0.0020817
5	0.558	0.556	0.556	0.5566667	0.0011547
10	0.557	0.555	0.554	0.5553333	0.0015275
15	0.556	0.553	0.55	0.553	0.003
20	0.554	0.552	0.554	0.5533333	0.0011547
25	0.55	0.549	0.54	0.5463333	0.0055076
30	0.546	0.544	0.547	0.5456667	0.0015275
35	0.54	0.538	0.541	0.5396667	0.0015275
40	0.541	0.537	0.542	0.54	0.0026458
45	0.539	0.537	0.54	0.5386667	0.0015275
50	0.535	0.532	0.54	0.5356667	0.0040415
55	0.535	0.533	0.53	0.5326667	0.0025166
60	0.532	0.535	0.553	0.54	0.0113578
65	0.53	0.531	0.53	0.5303333	0.0005774
70	0.526	0.527	0.527	0.5266667	0.0005774
%Remoción	5.83501	5.18962	-5.4		

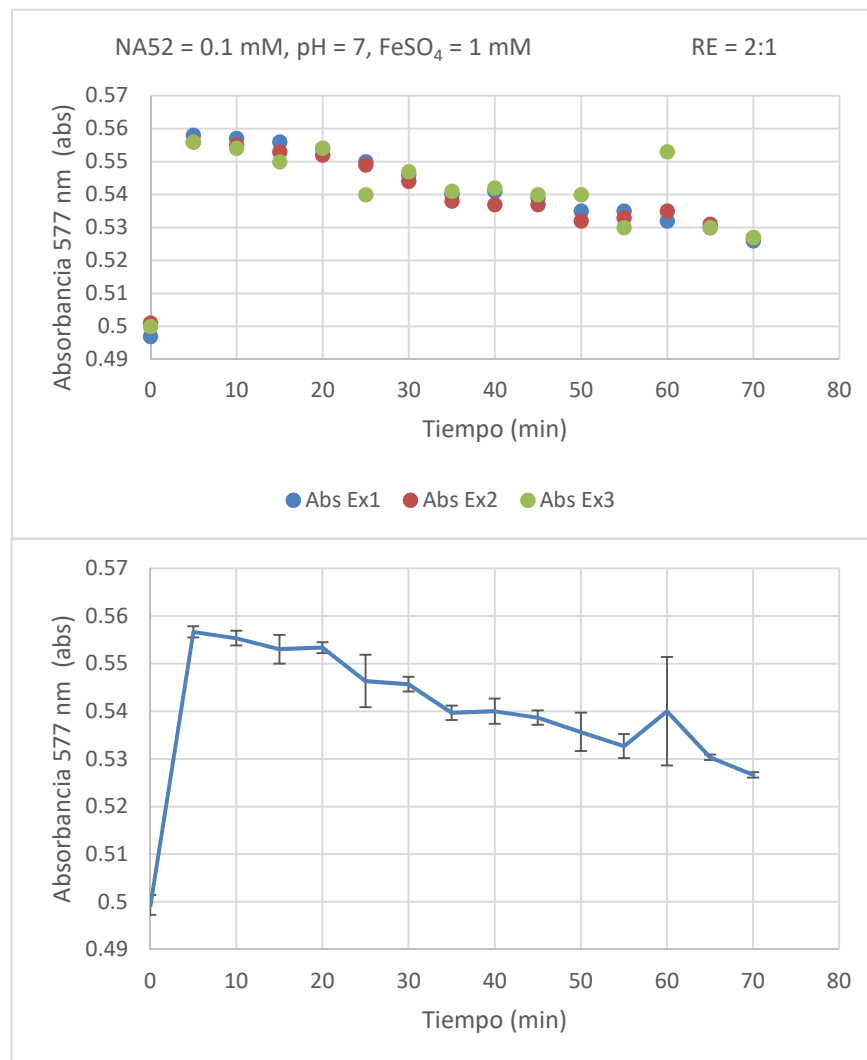


Figura 82 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 1 mM RE = 2:1

Tabla 49 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.553	0.557	0.548	0.5526667	0.0045092
5	0.551	0.555	0.547	0.551	0.004
10	0.554	0.556	0.549	0.553	0.0036056
15	0.556	0.559	0.56	0.5583333	0.0020817
20	0.559	0.563	0.561	0.561	0.002
25	0.552	0.555	0.554	0.5536667	0.0015275
30	0.551	0.554	0.549	0.5513333	0.0025166
35	0.552	0.554	0.55	0.552	0.002
40	0.553	0.556	0.552	0.5536667	0.0020817
45	0.554	0.555	0.553	0.554	0.001
50	0.557	0.559	0.552	0.556	0.0036056
55	0.56	0.562	0.553	0.5583333	0.0047258
60	0.556	0.559	0.547	0.554	0.006245
65	0.552	0.555	0.542	0.5496667	0.0068069
70	0.549	0.553	0.537	0.5463333	0.0083267
%Remoción	0.723327	0.718133	2.007299		

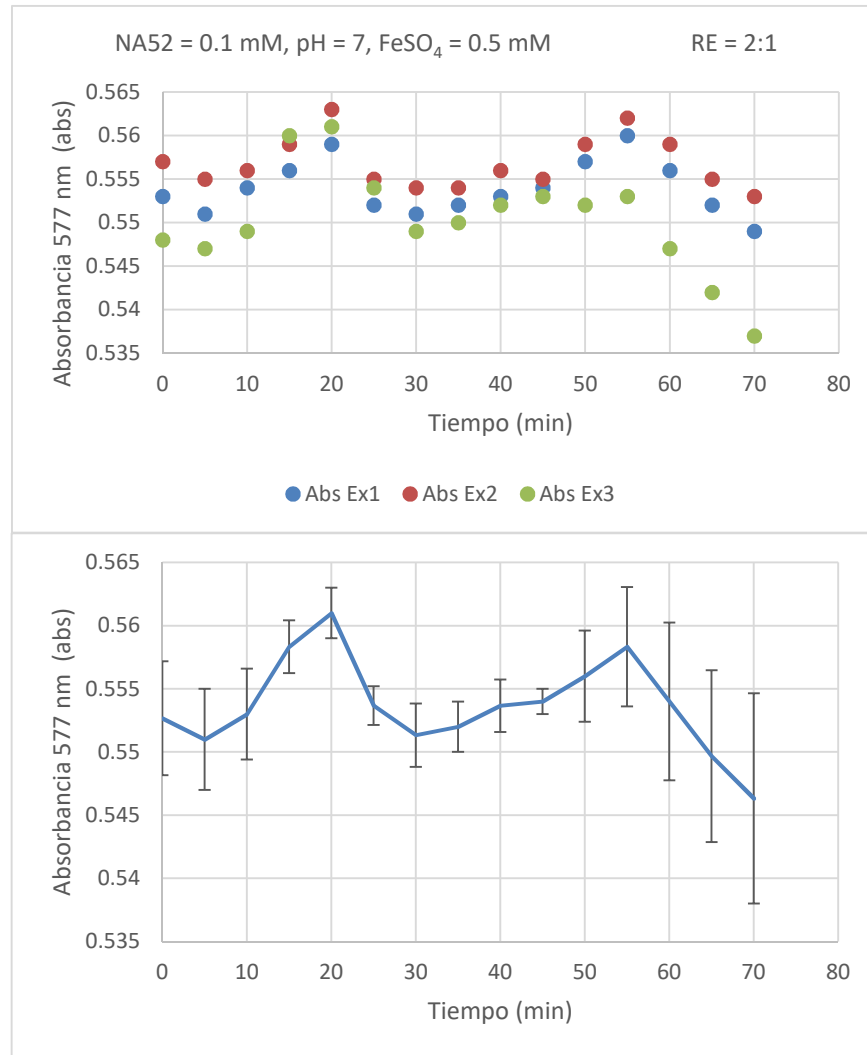


Figura 83 Absorbancias NA52 = 0.1 mM, pH = 7, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 2:1

Tabla 50 Absorbancias NA52 = 1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 1 mM RE = 1:1					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	4	3.97	4.15	4.04	0.0964365
5	0.908	0.924	0.947	0.926333	0.0196044
10	0.667	0.642	0.696	0.668333	0.0270247
15	0.397	0.401	0.421	0.406333	0.0128582
20	0.283	0.291	0.3	0.291333	0.0085049
25	0.193	0.196	0.201	0.196667	0.0040415
30	0.146	0.149	0.152	0.149	0.003
35	0.117	0.12	0.124	0.120333	0.0035119
40	0.088	0.096	0.112	0.098667	0.0122202
45	0.074	0.071	0.077	0.074	0.003
50	0.068	0.071	0.072	0.070333	0.0020817
55	0.058	0.054	0.051	0.054333	0.0035119
60	0.056	0.055	0.052	0.054333	0.0020817
65	0.053	0.049	0.059	0.053667	0.0050332
70	0.048	0.051	0.048	0.049	0.0017321
75	0.044	0.041	0.042	0.042333	0.0015275
80	0.039	0.032	0.041	0.037333	0.0047258
85	0.04	0.046	0.051	0.045667	0.0055076
90	0.213	0.2	0.251	0.221333	0.0265016
95	0.143	0.148	0.156	0.149	0.0065574
100	0.118	0.121	0.132	0.123667	0.0073711
105	0.093	0.091	0.102	0.095333	0.0058595
110	0.083	0.081	0.084	0.082667	0.0015275
115	0.079	0.08	0.091	0.083333	0.0066583
120	0.076	0.074	0.084	0.078	0.0052915
%Rem(70)	98.8	98.7154	98.8434		
%Rem(90)	94.675	94.9622	93.9518		
%Rem(120)	98.1	98.136	97.9759		

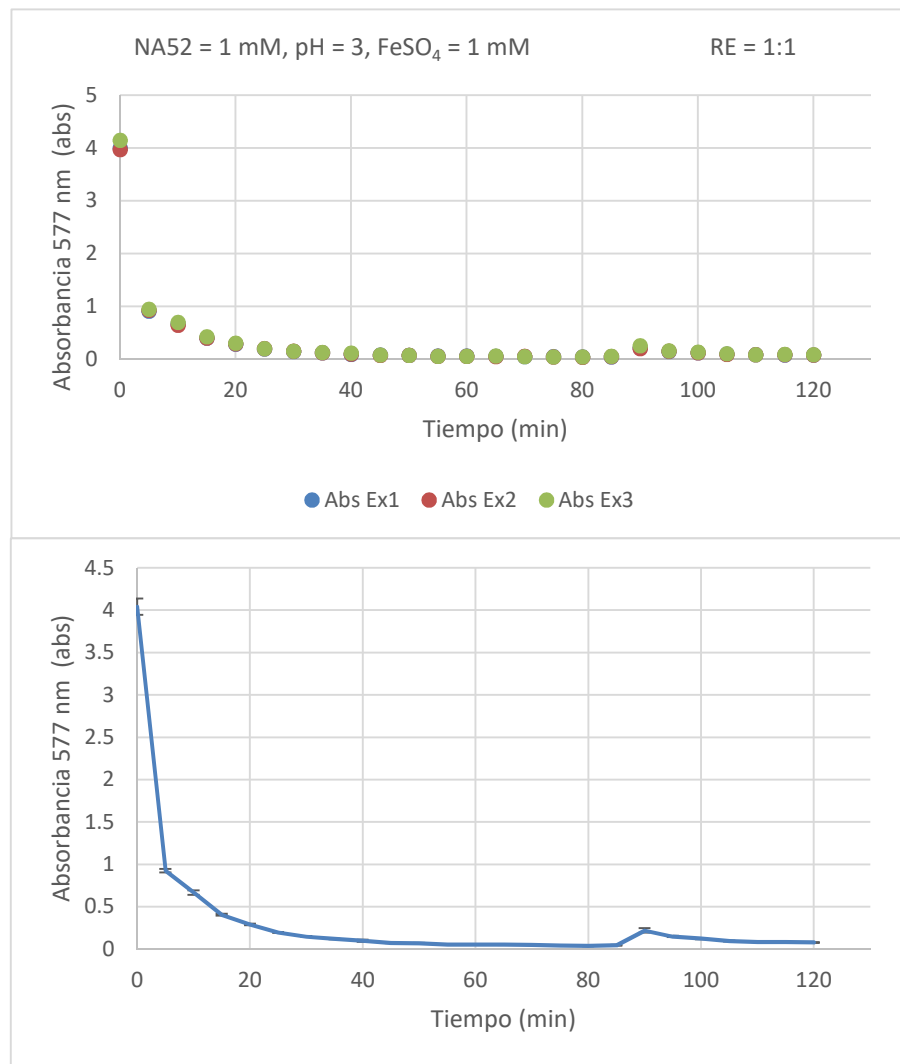


Figura 84 Absorbancias NA52 = 1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:1

Anexo D Absorbancias obtenidas de la degradación del colorante textil RD82

Tabla 51 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:1

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.515	0.522	0.519	0.5186667	0.0035119
5	0.244	0.247	0.245	0.2453333	0.0015275
10	0.182	0.185	0.183	0.1833333	0.0015275
15	0.145	0.149	0.147	0.147	0.002
20	0.132	0.136	0.135	0.1343333	0.0020817
25	0.117	0.121	0.12	0.1193333	0.0020817
30	0.105	0.108	0.107	0.1066667	0.0015275
35	0.1	0.102	0.104	0.102	0.002
40	0.095	0.097	0.094	0.0953333	0.0015275
45	0.087	0.089	0.088	0.088	0.001
50	0.088	0.087	0.088	0.0876667	0.0005774
55	0.09	0.089	0.087	0.0886667	0.0015275
60	0.092	0.091	0.09	0.091	0.001
65	0.091	0.089	0.087	0.089	0.002
70	0.092	0.088	0.086	0.0886667	0.0030551
%Remoción	82.1359	83.1418	83.4297		

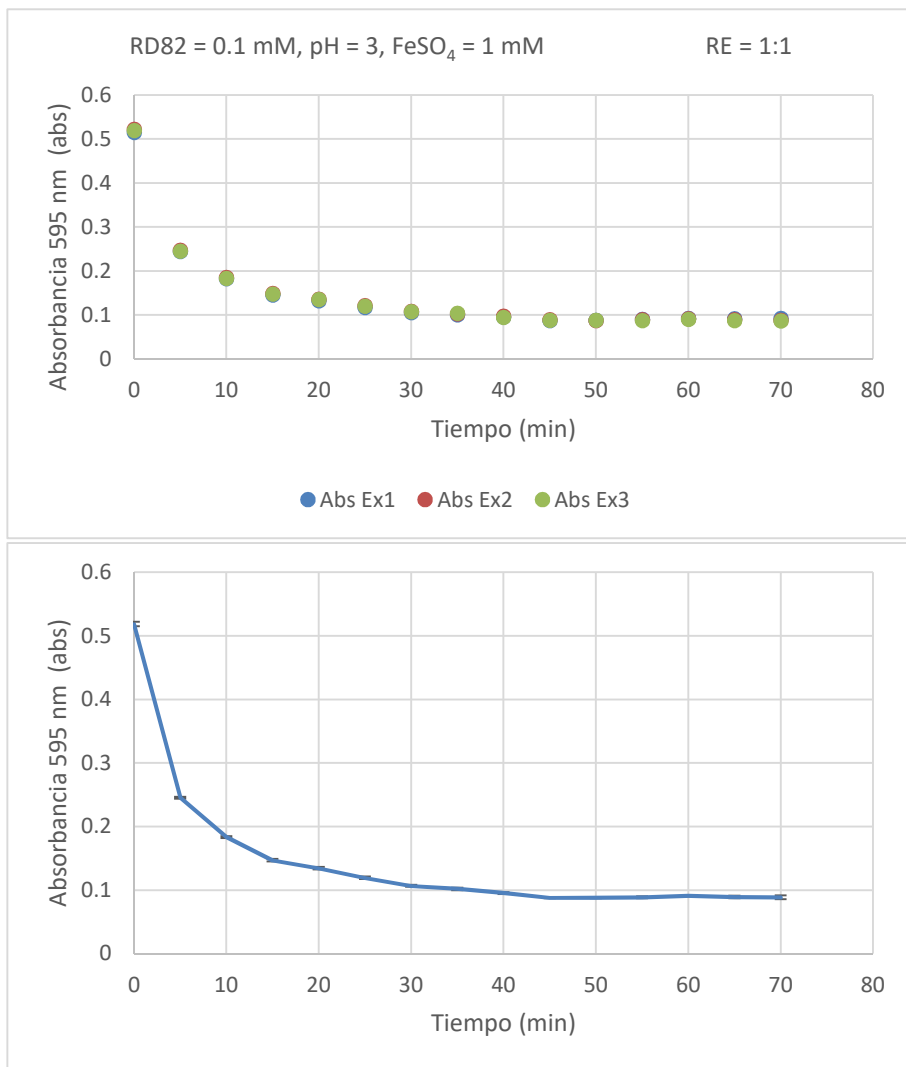


Figura 85 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:1

Tabla 52 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:1					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.536	0.532	0.528	0.532	0.004
5	0.266	0.268	0.258	0.264	0.0052915
10	0.208	0.211	0.206	0.2083333	0.0025166
15	0.142	0.141	0.139	0.1406667	0.0015275
20	0.11	0.114	0.108	0.1106667	0.0030551
25	0.071	0.069	0.067	0.069	0.002
30	0.049	0.052	0.051	0.0506667	0.0015275
35	0.037	0.036	0.034	0.0356667	0.0015275
40	0.032	0.031	0.028	0.0303333	0.0020817
45	0.031	0.03	0.027	0.0293333	0.0020817
50	0.03	0.03	0.027	0.029	0.0017321
55	0.027	0.026	0.024	0.0256667	0.0015275
60	0.024	0.025	0.023	0.024	0.001
65	0.021	0.024	0.021	0.022	0.0017321
70	0.018	0.021	0.02	0.0196667	0.0015275
%Remoción	96.6418	96.0526	96.2121		

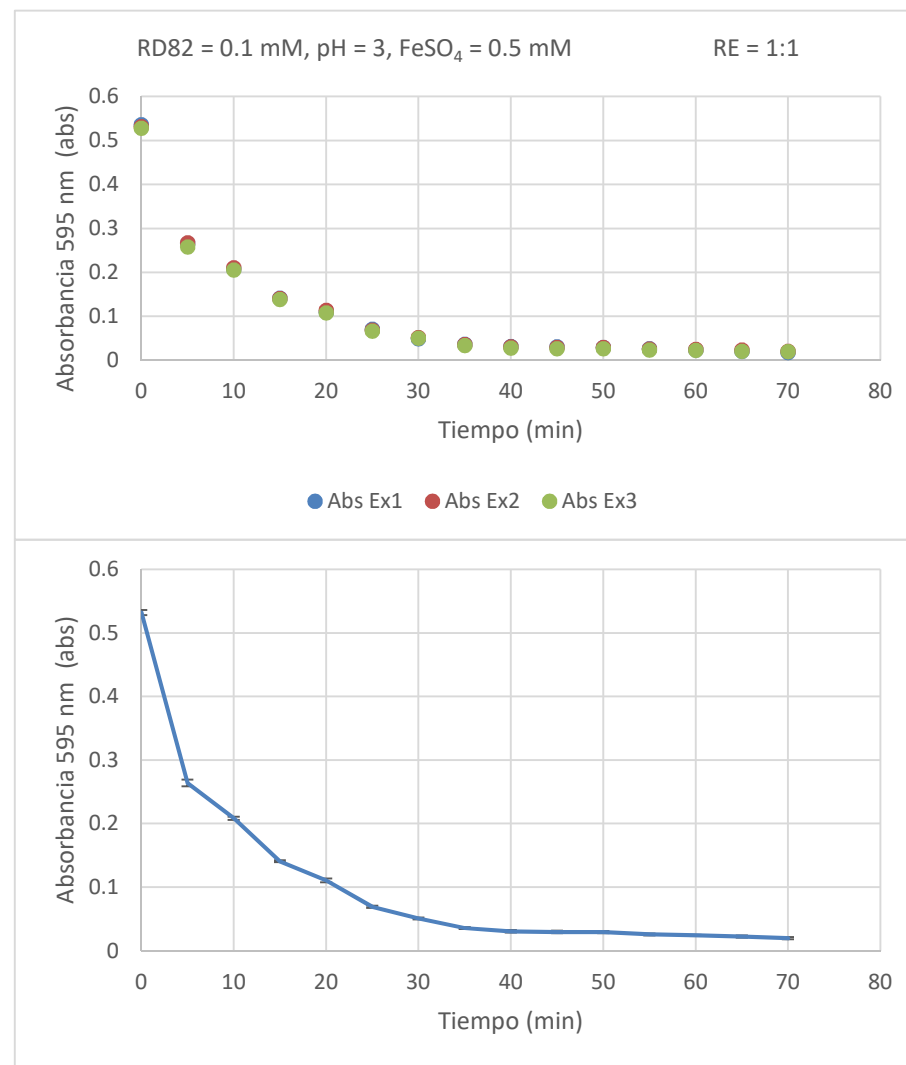


Figura 86 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:1

Tabla 53 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:2

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.524	0.532	0.527	0.527667	0.0040415
5	0.216	0.208	0.212	0.212	0.004
10	0.138	0.127	0.136	0.133667	0.0058595
15	0.117	0.112	0.114	0.114333	0.0025166
20	0.11	0.107	0.112	0.109667	0.0025166
25	0.107	0.1	0.109	0.105333	0.0047258
30	0.102	0.104	0.102	0.102667	0.0011547
35	0.093	0.094	0.094	0.093667	0.0005774
40	0.092	0.096	0.094	0.094	0.002
45	0.092	0.095	0.095	0.094	0.0017321
50	0.091	0.094	0.092	0.092333	0.0015275
55	0.092	0.089	0.091	0.090667	0.0015275
60	0.09	0.09	0.089	0.089667	0.0005774
65	0.089	0.091	0.092	0.090667	0.0015275
70	0.088	0.092	0.094	0.091333	0.0030551
%Remoción	83.2061	82.7068	82.1632		

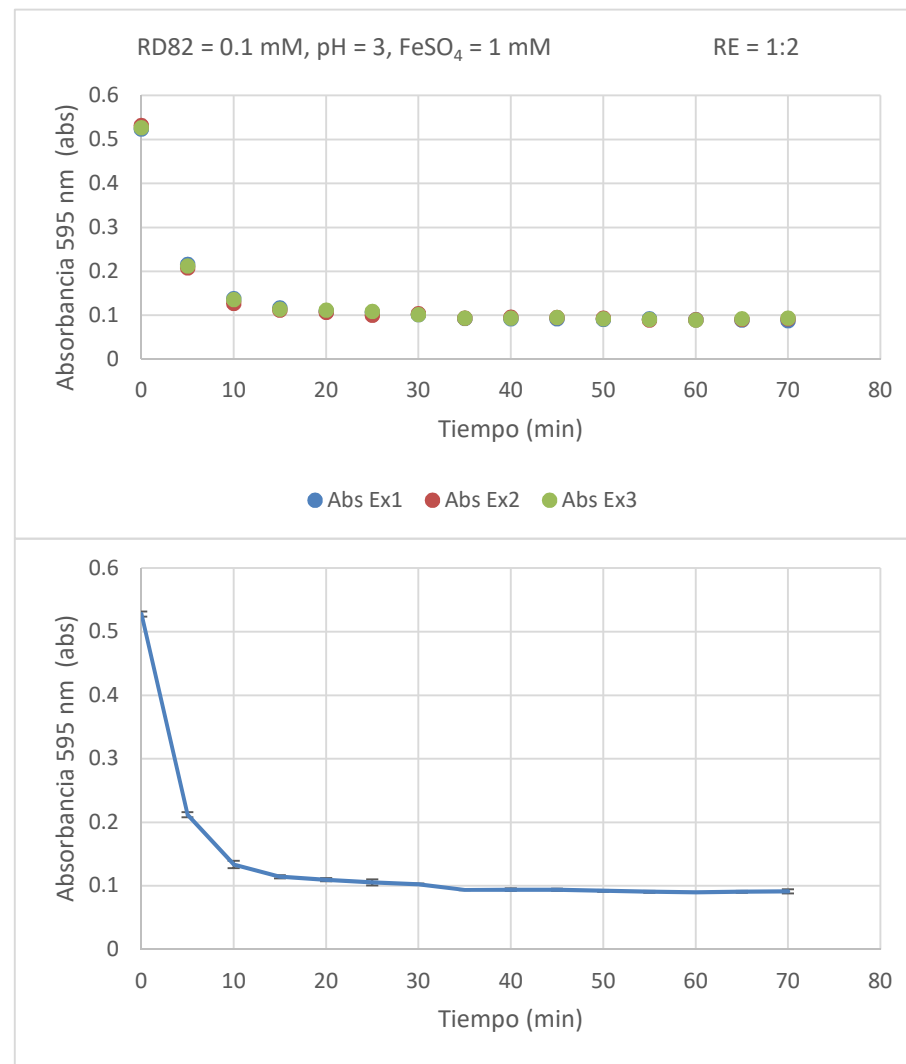


Figura 87 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 1:2

Tabla 54 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO ₄ = 0.5 mM RE = 1:2					
Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.524	0.52	0.518	0.520667	0.0030551
5	0.254	0.237	0.222	0.237667	0.0160104
10	0.212	0.192	0.198	0.200667	0.0102632
15	0.167	0.156	0.136	0.153	0.0157162
20	0.124	0.112	0.108	0.114667	0.0083267
25	0.092	0.086	0.078	0.085333	0.0070238
30	0.079	0.064	0.075	0.072667	0.0077675
35	0.067	0.063	0.072	0.067333	0.0045092
40	0.065	0.062	0.069	0.065333	0.0035119
45	0.064	0.061	0.068	0.064333	0.0035119
50	0.063	0.062	0.067	0.064	0.0026458
55	0.062	0.063	0.068	0.064333	0.0032146
60	0.063	0.061	0.067	0.063667	0.0030551
65	0.061	0.062	0.068	0.063667	0.0037859
70	0.059	0.061	0.062	0.060667	0.0015275
%Remoción	88.7405	88.2692	88.0309		

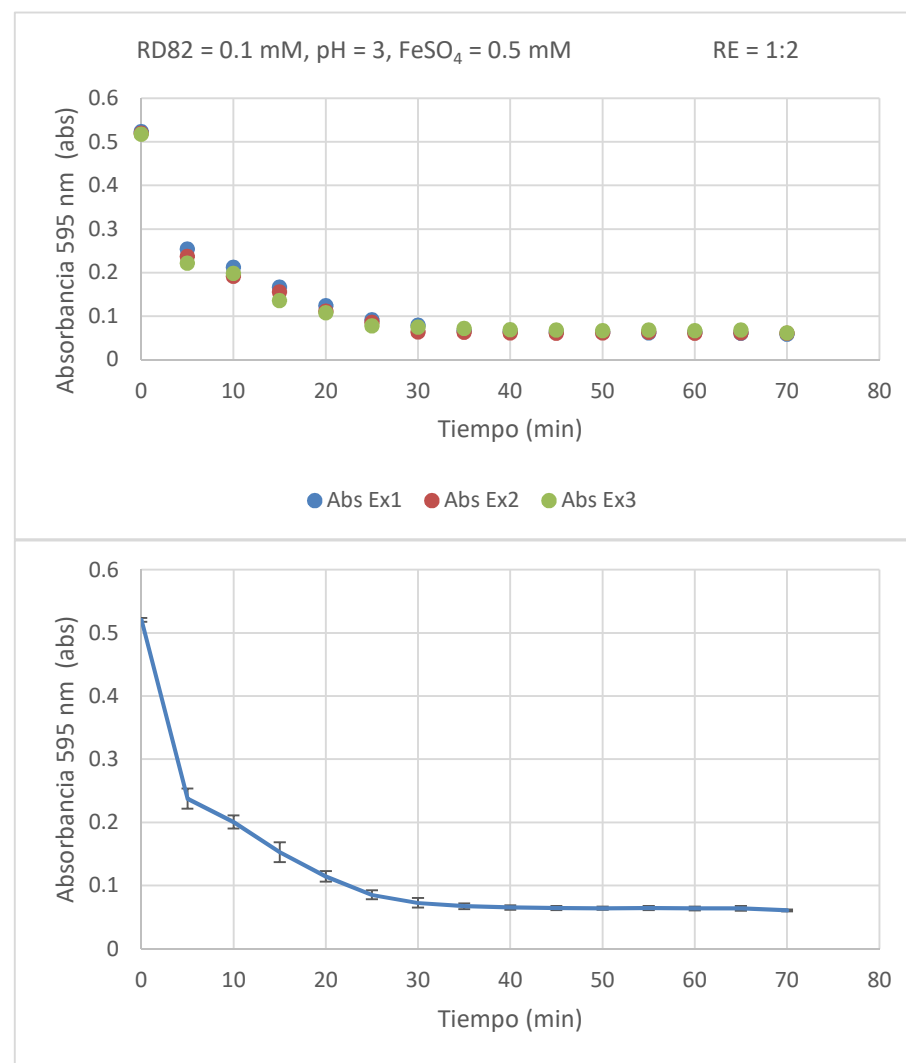


Figura 88 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 1:2

Tabla 55 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 2:1

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.524	0.528	0.532	0.528	0.004
5	0.283	0.28	0.278	0.280333	0.0025166
10	0.222	0.216	0.212	0.216667	0.0050332
15	0.182	0.176	0.175	0.177667	0.0037859
20	0.141	0.138	0.136	0.138333	0.0025166
25	0.115	0.117	0.121	0.117667	0.0030551
30	0.107	0.105	0.11	0.107333	0.0025166
35	0.103	0.101	0.098	0.100667	0.0025166
40	0.097	0.092	0.096	0.095	0.0026458
45	0.097	0.09	0.1	0.095667	0.0051316
50	0.097	0.09	0.098	0.095	0.0043589
55	0.091	0.089	0.091	0.090333	0.0011547
60	0.093	0.091	0.093	0.092333	0.0011547
65	0.09	0.089	0.101	0.093333	0.0066583
70	0.094	0.088	0.096	0.092667	0.0041633
%Remoción	82.0611	83.3333	81.9549		

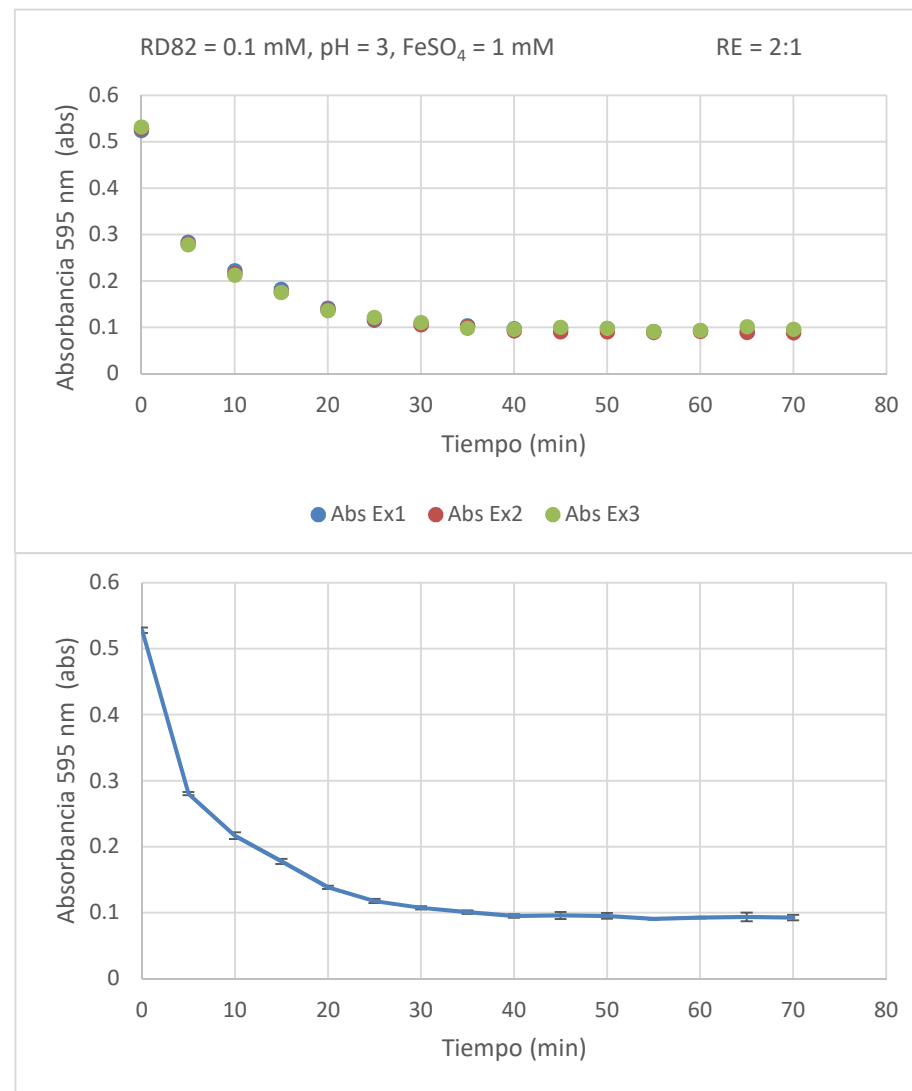


Figura 89 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 2:1

Tabla 56 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 0.5 mM RE = 2:1

Tiempo (min)	Abs Ex1	Abs Ex2	Abs Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.528	0.524	0.516	0.522667	0.0061101
5	0.217	0.214	0.212	0.214333	0.0025166
10	0.128	0.132	0.133	0.131	0.0026458
15	0.092	0.089	0.087	0.089333	0.0025166
20	0.068	0.065	0.064	0.065667	0.0020817
25	0.055	0.052	0.056	0.054333	0.0020817
30	0.042	0.046	0.043	0.043667	0.0020817
35	0.037	0.032	0.035	0.034667	0.0025166
40	0.032	0.029	0.031	0.030667	0.0015275
45	0.027	0.027	0.025	0.026333	0.0011547
50	0.025	0.026	0.024	0.025	0.001
55	0.026	0.025	0.021	0.024	0.0026458
60	0.024	0.026	0.019	0.023	0.0036056
65	0.028	0.024	0.02	0.024	0.004
70	0.026	0.023	0.021	0.023333	0.0025166
%Remoción	95.0758	95.6107	95.9302		

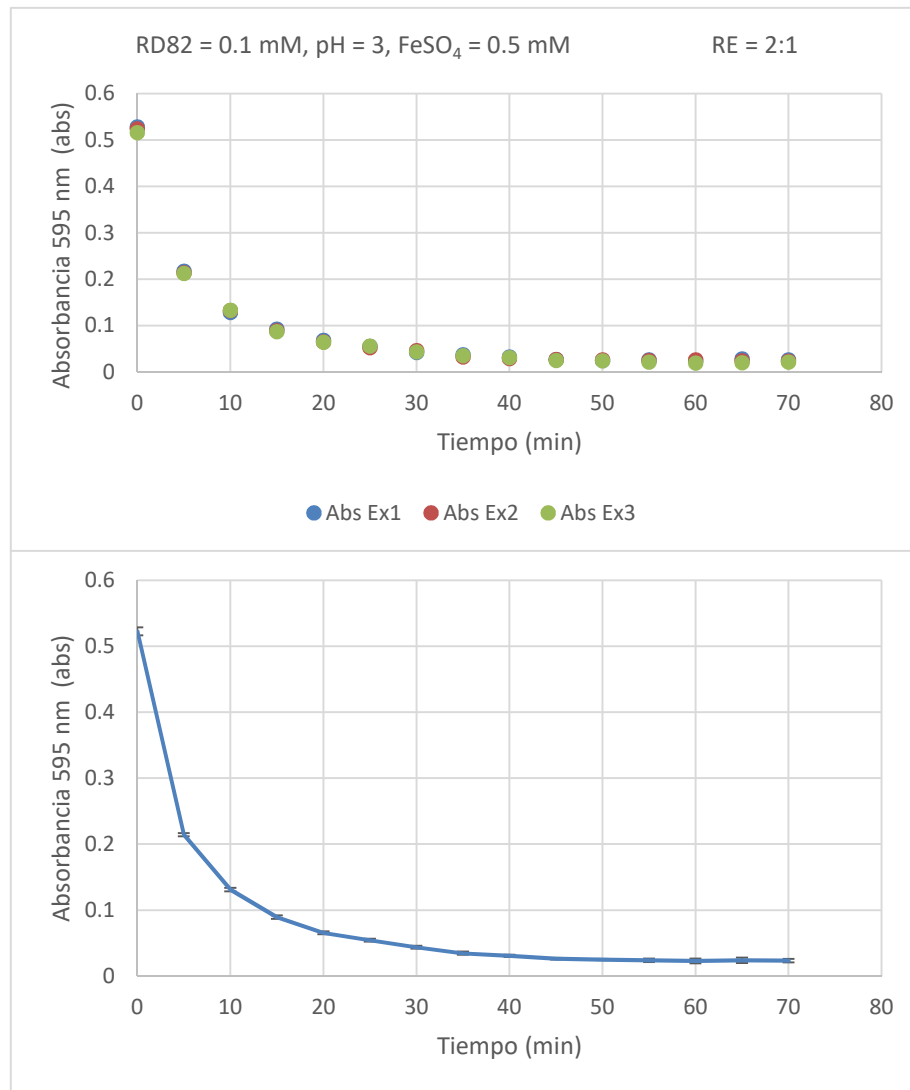


Figura 90 Absorbancias RD82 = 0.1 mM, pH = 3, FeSO₄ = 1 mM RE = 2:1

Anexo E Tablas de Concentración, DQO_t y COT_t para NA52

Tabla 57 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C1

Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.072263	0.071138	0.069371	0.070924	0.0014578
5	0.028243	0.026637	0.026315	0.027065	0.0010329
10	0.018604	0.01764	0.017319	0.017854	0.0006689
15	0.014106	0.013463	0.01282	0.013463	0.0006426
20	0.011535	0.010892	0.011214	0.011214	0.0003213
25	0.009125	0.008322	0.00784	0.008429	0.0006493
30	0.007519	0.006715	0.006394	0.006876	0.0005793
35	0.006555	0.005912	0.005591	0.006019	0.0004908
40	0.005912	0.005269	0.005109	0.00543	0.0004251
45	0.005751	0.005109	0.005269	0.005377	0.0003344
50	0.00543	0.004948	0.004948	0.005109	0.0002783
55	0.005751	0.005269	0.00543	0.005484	0.0002454
60	0.00543	0.005109	0.005269	0.005269	0.0001607
65	0.004788	0.004627	0.004788	0.004734	9.275E-05
70	0.005269	0.005109	0.004948	0.005109	0.0001607

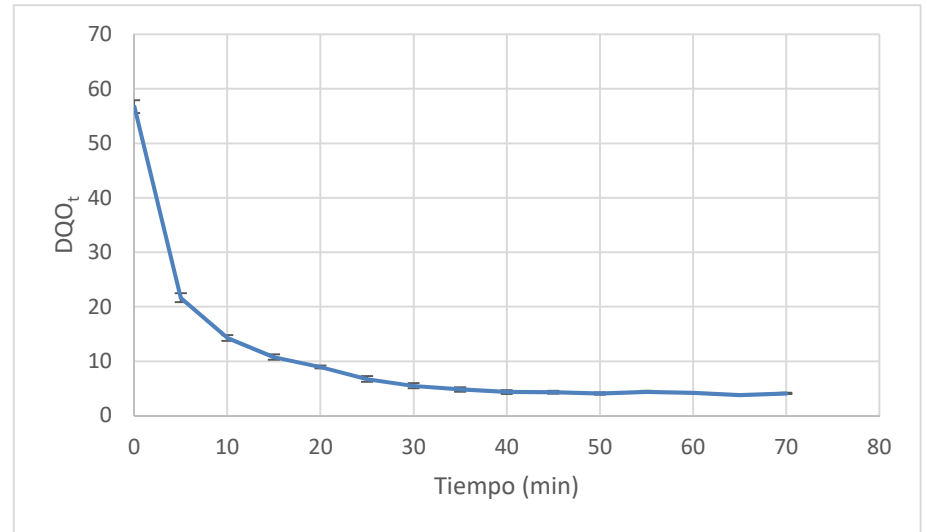


Figura 91 DQOt NA52 ref.: Tabla E2

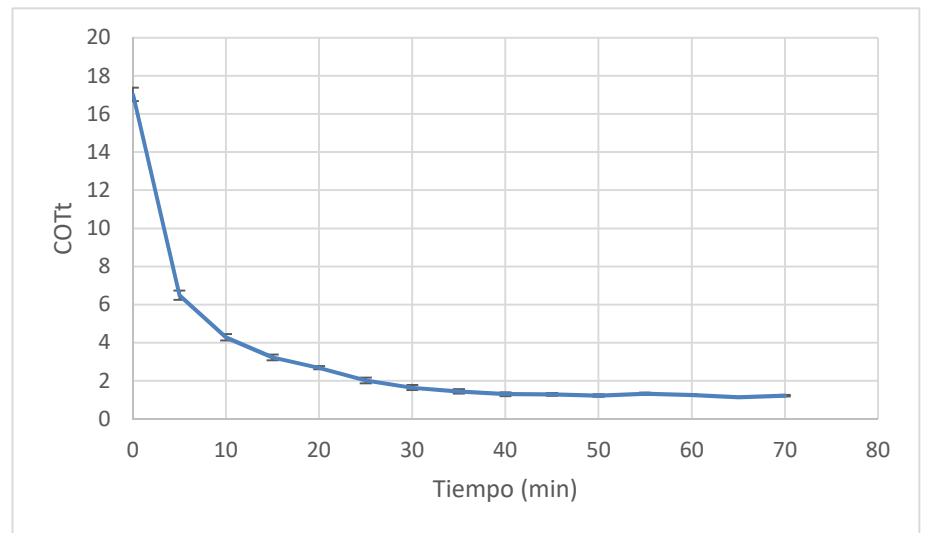


Figura 92 COTt NA52 ref.: Tabla E3

Tabla 58 DQOt NA52 ref.: Tabla C1

Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	57.81027	56.9106	55.49683	56.7392	1.1662009
5	22.59459	21.30934	21.05229	21.6521	0.8262962
10	14.88312	14.11198	13.85493	14.2833	0.5350897
15	11.28444	10.77034	10.25625	10.7703	0.5140975
20	9.22805	8.713953	8.971002	8.971	0.2570488
25	7.300185	6.657563	6.27199	6.74325	0.5194251
30	6.014941	5.372319	5.11527	5.50084	0.4634012
35	5.243795	4.729697	4.472648	4.81538	0.3926485
40	4.729697	4.2156	4.087075	4.34412	0.3400435
45	4.601173	4.087075	4.2156	4.30128	0.2675448
50	4.344124	3.958551	3.958551	4.08708	0.2226108
55	4.601173	4.2156	4.344124	4.38697	0.1963242
60	4.344124	4.087075	4.2156	4.2156	0.1285244
65	3.830027	3.701502	3.830027	3.78719	0.0742036
70	4.2156	4.087075	3.958551	4.08708	0.1285244

Tabla 59 COTt NA52 ref.: Tabla C1

Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	17.34308	17.07318	16.64905	17.02177	0.3498603
5	6.778376	6.392803	6.315688	6.495622	0.2478888
10	4.464937	4.233593	4.156478	4.285003	0.1605269
15	3.385332	3.231103	3.076874	3.231103	0.1542293
20	2.768415	2.614186	2.691301	2.691301	0.0771146
25	2.190055	1.997269	1.881597	2.022974	0.1558275
30	1.804482	1.611696	1.534581	1.650253	0.1390204
35	1.573138	1.418909	1.341795	1.444614	0.1177945
40	1.418909	1.26468	1.226123	1.303237	0.1020131
45	1.380352	1.226123	1.26468	1.290385	0.0802634
50	1.303237	1.187565	1.187565	1.226123	0.0667832
55	1.380352	1.26468	1.303237	1.31609	0.0588973
60	1.303237	1.226123	1.26468	1.26468	0.0385573
65	1.149008	1.110451	1.149008	1.136156	0.0222611
70	1.26468	1.226123	1.187565	1.226123	0.0385573

Tabla 60 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C2					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.06905	0.069692	0.070174	0.069639	0.0005642
5	0.033224	0.033545	0.034027	0.033598	0.0004043
10	0.024869	0.025994	0.026637	0.025833	0.0008945
15	0.015069	0.015551	0.016033	0.015551	0.000482
20	0.007197	0.007519	0.008161	0.007626	0.0004908
25	0.001414	0.002217	0.002538	0.002056	0.0005793
30	-0.0018	-0.0013	-0.0004	-0.00116	0.0007362
35	-0.0036	-0.0028	-0.0021	-0.00282	0.0007244
40	-0.0045	-0.0042	-0.0037	-0.00416	0.0004043
45	-0.0050	-0.0045	-0.0040	-0.00453	0.000482
50	-0.0063	-0.0058	-0.0045	-0.00555	0.0009135
55	-0.0063	-0.0060	-0.0044	-0.00555	0.0010329
60	-0.0068	-0.0055	-0.0050	-0.00576	0.0009135
65	-0.0068	-0.0061	-0.0053	-0.00608	0.0007244
70	-0.0069	-0.0058	-0.0058	-0.00619	0.0006493

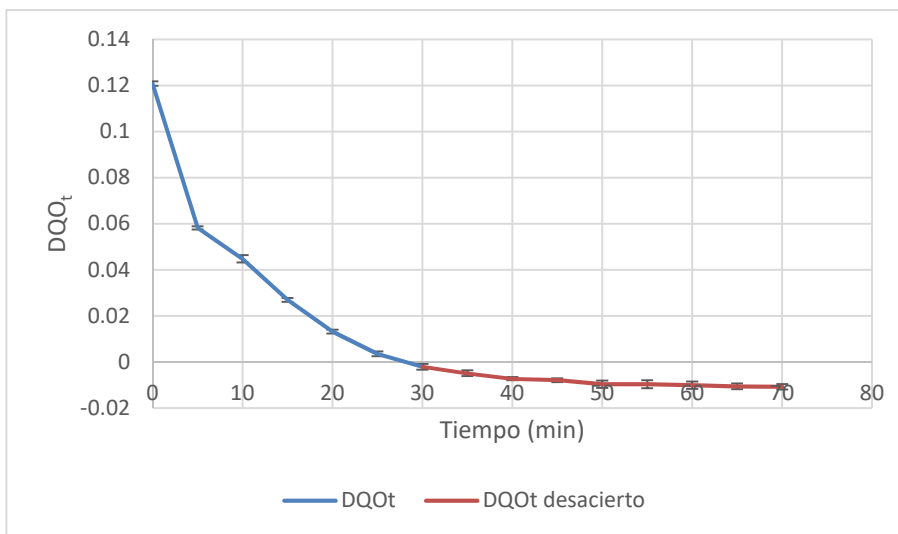


Figura 93 DQOt NA52 ref.: Tabla E5

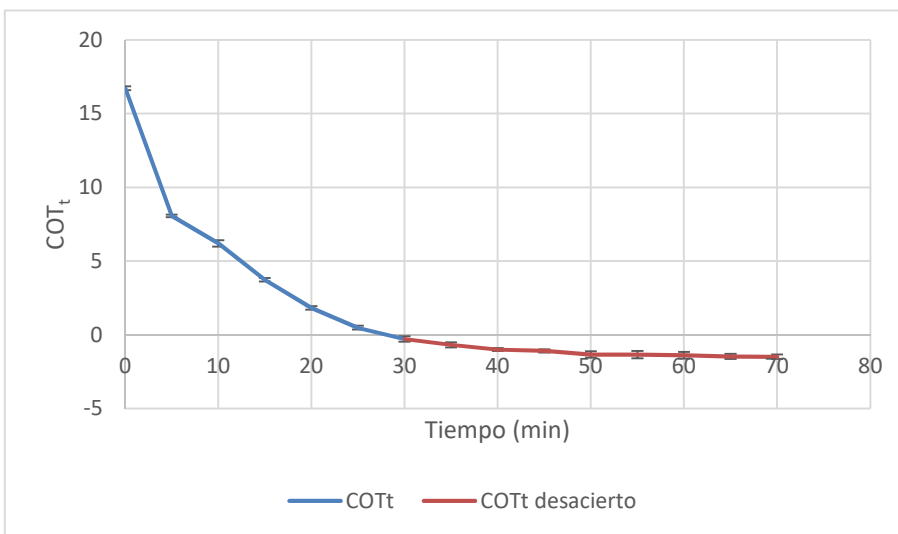


Figura 94 COTt NA52 ref.: Tabla E6

Tabla 61 DQOt NA52 ref.: Tabla C2					
Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.119727	0.120842	0.121677	0.120749	0.0009783
5	0.057607	0.058164	0.059	0.058257	0.000701
10	0.043122	0.045072	0.046186	0.044793	0.001551
15	0.026129	0.026965	0.027801	0.026965	0.0008357
20	0.01248	0.013037	0.014151	0.013223	0.000851
25	0.002451	0.003844	0.004401	0.003566	0.0010044
30	-0.0031	-0.0023	-0.0006	-0.00201	0.0012765
35	-0.0062	-0.0048	-0.0037	-0.00488	0.0012561
40	-0.0079	-0.0073	-0.0065	-0.00721	0.000701
45	-0.0087	-0.0079	-0.0070	-0.00786	0.0008357
50	-0.0109	-0.0101	-0.0079	-0.00962	0.001584
55	-0.0109	-0.0104	-0.0076	-0.00962	0.0017909
60	-0.0118	-0.0095	-0.0087	-0.00999	0.001584
65	-0.0118	-0.0106	-0.0092	-0.01055	0.0012561
70	-0.0120	-0.0101	-0.0101	-0.01073	0.0011258

Tabla 62 COTt NA52 ref.: Tabla C2					
Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	16.57193	16.72616	16.84183	16.71331	0.1354088
5	7.973653	8.050767	8.166439	8.06362	0.0970338
10	5.968672	6.238573	6.392803	6.200016	0.214678
15	3.616676	3.732348	3.84802	3.732348	0.1156719
20	1.727368	1.804482	1.958712	1.830187	0.1177945
25	0.339304	0.532091	0.609206	0.493534	0.1390204
30	-0.43184	-0.31617	-0.08483	-0.27761	0.1766918
35	-0.85597	-0.66319	-0.50896	-0.67604	0.1738646
40	-1.08732	-1.0102	-0.89453	-0.99735	0.0970338
45	-1.20299	-1.08732	-0.97164	-1.08732	0.1156719
50	-1.51145	-1.39577	-1.08732	-1.33151	0.2192462
55	-1.51145	-1.43433	-1.04876	-1.33151	0.2478888
60	-1.62712	-1.31866	-1.20299	-1.38292	0.2192462
65	-1.62712	-1.47289	-1.2801	-1.46004	0.1738646
70	-1.66568	-1.39577	-1.39577	-1.48574	0.1558275

Tabla 63 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C3					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.070656	0.067443	0.068728	0.068943	0.0016172
5	0.023906	0.025512	0.024388	0.024602	0.0008244
10	0.012981	0.013945	0.014427	0.013784	0.0007362
15	0.009768	0.011374	0.012017	0.011053	0.0011585
20	0.007519	0.008804	0.008804	0.008376	0.000742
25	0.006876	0.007679	0.008322	0.007626	0.0007244
30	0.006394	0.006555	0.007197	0.006715	0.0004251
35	0.006555	0.005751	0.006073	0.006126	0.0004043
40	0.005751	0.00543	0.005591	0.005591	0.0001607
45	0.005751	0.00543	0.005751	0.005644	0.0001855
50	0.005912	0.005751	0.00543	0.005698	0.0002454
55	0.005751	0.005109	0.005269	0.005377	0.0003344
60	0.006073	0.005591	0.005751	0.005805	0.0002454
65	0.005751	0.005269	0.00543	0.005484	0.0002454
70	0.005751	0.004948	0.005109	0.005269	0.0004251

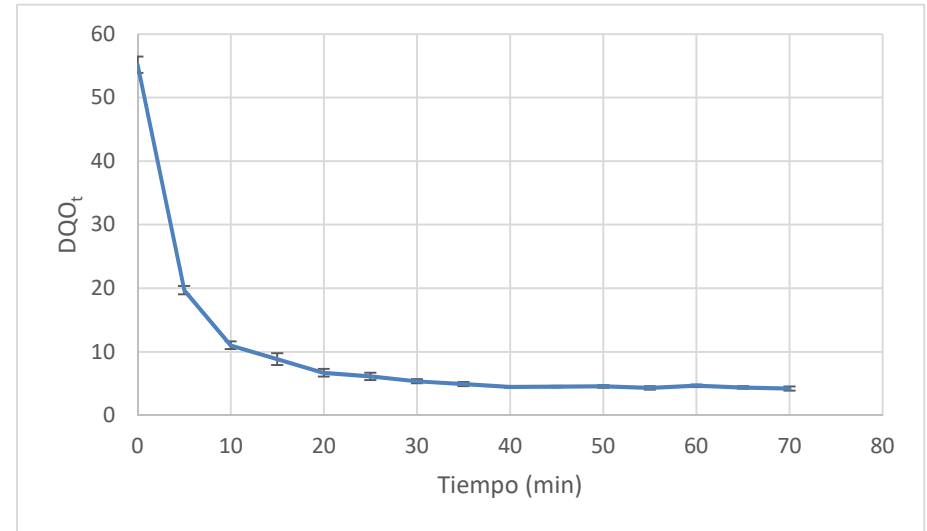


Figura 95 DQOt NA52 ref.: Tabla E8

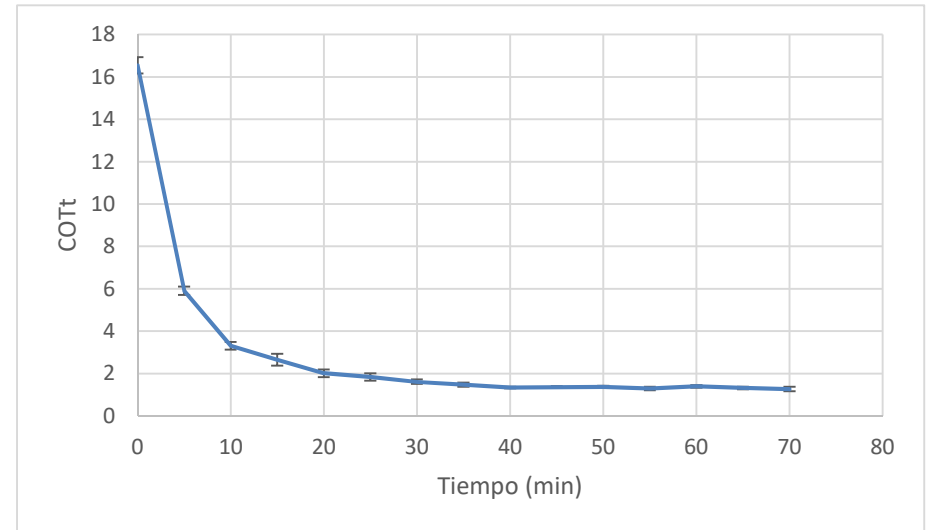


Figura 96 COTt NA52 ref.: Tabla E9

Tabla 64 DQOt NA52 ref.: Tabla C3

Tiempo (min)	DQOt Ex1	DQOt Ex2	DQOt Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	56.52502	53.95453	54.98273	55.1541	1.2937837
5	19.12443	20.40967	19.51	19.68137	0.6595359
10	10.38477	11.15592	11.54149	11.02739	0.5889727
15	7.814282	9.099526	9.613624	8.842477	0.9268025
20	6.014941	7.043136	7.043136	6.700404	0.5936287
25	5.500843	6.143465	6.657563	6.100624	0.5795485
30	5.11527	5.243795	5.757892	5.372319	0.3400435
35	5.243795	4.601173	4.858222	4.901063	0.3234459
40	4.601173	4.344124	4.472648	4.472648	0.1285244
45	4.601173	4.344124	4.601173	4.51549	0.1484072
50	4.729697	4.601173	4.344124	4.558331	0.1963242
55	4.601173	4.087075	4.2156	4.301283	0.2675448
60	4.858222	4.472648	4.601173	4.644014	0.1963242
65	4.601173	4.2156	4.344124	4.386965	0.1963242
70	4.601173	3.958551	4.087075	4.2156	0.3400435

Tabla 65 COTt NA52 ref.: Tabla C3

Tiempo (min)	COTt Ex1	COTt Ex2	COTt Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	16.95751	16.18636	16.49482	16.54623	0.3881351
5	5.737328	6.122901	5.853	5.90441	0.1978608
10	3.115431	3.346775	3.462447	3.308218	0.1766918
15	2.344285	2.729858	2.884087	2.652743	0.2780407
20	1.804482	2.112941	2.112941	2.010121	0.1780886
25	1.650253	1.84304	1.997269	1.830187	0.1738646
30	1.534581	1.573138	1.727368	1.611696	0.1020131
35	1.573138	1.380352	1.457466	1.470319	0.0970338
40	1.380352	1.303237	1.341795	1.341795	0.0385573
45	1.380352	1.303237	1.380352	1.354647	0.0445222
50	1.418909	1.380352	1.303237	1.367499	0.0588973
55	1.380352	1.226123	1.26468	1.290385	0.0802634
60	1.457466	1.341795	1.380352	1.393204	0.0588973
65	1.380352	1.26468	1.303237	1.31609	0.0588973
70	1.380352	1.187565	1.226123	1.26468	0.1020131

Tabla 66 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C4					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.07146	0.072263	0.070978	0.071567	0.0006493
5	0.039007	0.028243	0.028404	0.031885	0.0061687
10	0.028083	0.018604	0.018765	0.021817	0.0054267
15	0.018283	0.011856	0.011696	0.013945	0.0037574
20	0.011535	0.006394	0.00286	0.00693	0.0043624
25	0.006233	0.003181	0.00302	0.004145	0.0018105
30	0.003502	0.001092	0.000932	0.001842	0.0014399
35	0.001253	0.00061	0.000771	0.000878	0.0003344
40	0.0008	-0.0004	-0.0002	7.5E-05	0.0006082
45	0.0000	-0.0007	-0.0005	-0.00041	0.0003344
50	-0.0005	-0.0004	-0.0004	-0.00041	9.275E-05
55	-0.0002	-0.0002	0.0000	-0.00014	9.275E-05
60	0.0001	-0.0005	-0.0005	-0.0003	0.000371
65	-0.0004	-0.0002	-0.0005	-0.00035	0.0001607
70	-0.0004	0.0000	-0.0004	-0.00025	0.0001855

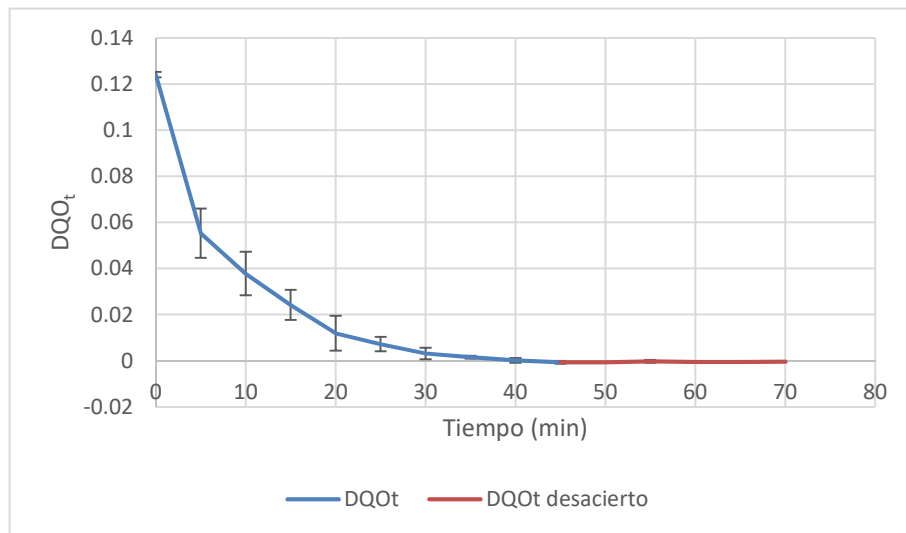


Figura 97 DQOt NA52 ref.: Tabla E11

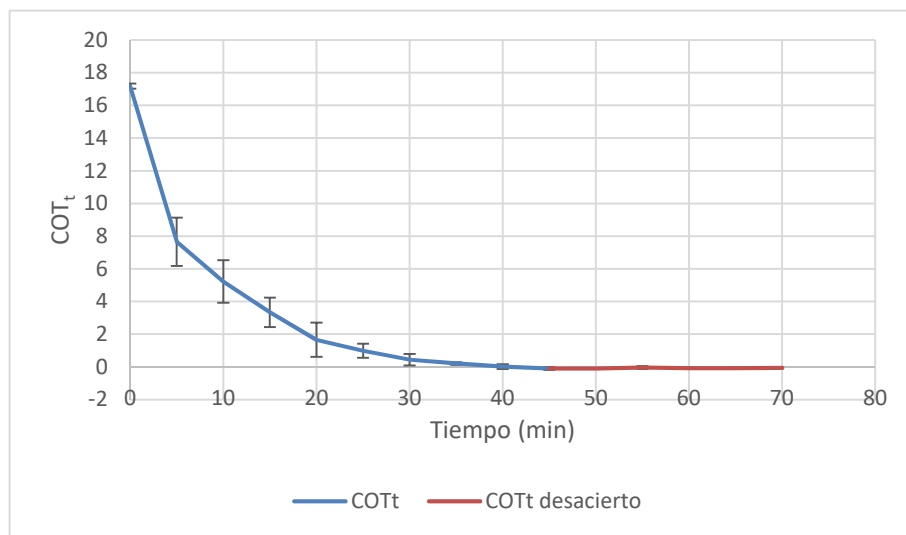


Figura 98 COTt NA52 ref.: Tabla E12

Tabla 67 DQOt NA52 ref.: Tabla C4

Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.123906	0.125299	0.12307	0.124091	0.0011258
5	0.067636	0.048972	0.04925	0.055286	0.0106961
10	0.048693	0.032258	0.032536	0.037829	0.0094096
15	0.031701	0.020558	0.02028	0.024179	0.0065151
20	0.020001	0.011087	0.004958	0.012015	0.0075641
25	0.010808	0.005516	0.005237	0.007187	0.0031393
30	0.006073	0.001894	0.001616	0.003194	0.0024967
35	0.002173	0.001059	0.001337	0.001523	0.0005799
40	0.001337	-0.00061	-0.00033	0.00013	0.0010546
45	-5.6E-05	-0.00117	-0.00089	-0.00071	0.0005799
50	-0.00089	-0.00061	-0.00061	-0.00071	0.0001608
55	-0.00033	-0.00033	-5.6E-05	-0.00024	0.0001608
60	0.000223	-0.00089	-0.00089	-0.00052	0.0006433
65	-0.00061	-0.00033	-0.00089	-0.00061	0.0002786
70	-0.00061	-5.6E-05	-0.00061	-0.00043	0.0003217

Tabla 68 COTt NA52 ref.: Tabla C4

Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	17.15029	17.34308	17.03462	17.176	0.1558275
5	9.361716	6.778376	6.816933	7.652342	1.480487
10	6.739818	4.464937	4.503494	5.236083	1.3024156
15	4.387822	2.84553	2.806972	3.346775	0.9017797
20	2.768415	1.534581	0.68632	1.663105	1.0469808
25	1.496024	0.763435	0.724878	0.994779	0.4345189
30	0.840549	0.26219	0.223632	0.442124	0.3455848
35	0.300747	0.146518	0.185075	0.21078	0.0802634
40	0.185075	-0.08483	-0.04627	0.017993	0.1459756
45	-0.00771	-0.16194	-0.12338	-0.09768	0.0802634
50	-0.12338	-0.08483	-0.08483	-0.09768	0.0222611
55	-0.04627	-0.04627	-0.00771	-0.03342	0.0222611
60	0.030846	-0.12338	-0.12338	-0.07197	0.0890443
65	-0.08483	-0.04627	-0.12338	-0.08483	0.0385573
70	-0.08483	-0.00771	-0.08483	-0.05912	0.0445222

Tabla 69 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C5					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.068728	0.06905	0.070335	0.069371	0.0008501
5	0.036276	0.036597	0.036758	0.036544	0.0002454
10	0.024869	0.025191	0.025673	0.025244	0.0004043
15	0.017961	0.018283	0.018604	0.018283	0.0003213
20	0.012499	0.012981	0.013463	0.012981	0.000482
25	0.009125	0.009929	0.01041	0.009821	0.0006493
30	0.007358	0.00784	0.008161	0.007786	0.0004043
35	0.005751	0.006394	0.007197	0.006448	0.0007244
40	0.004948	0.005591	0.005751	0.00543	0.0004251
45	0.004627	0.005109	0.005269	0.005002	0.0003344
50	0.004145	0.004788	0.005109	0.00468	0.0004908
55	0.004306	0.004466	0.005269	0.00468	0.0005164
60	0.004306	0.004627	0.004948	0.004627	0.0003213
65	0.004306	0.004306	0.005269	0.004627	0.0005565
70	0.004466	0.004466	0.004948	0.004627	0.0002783

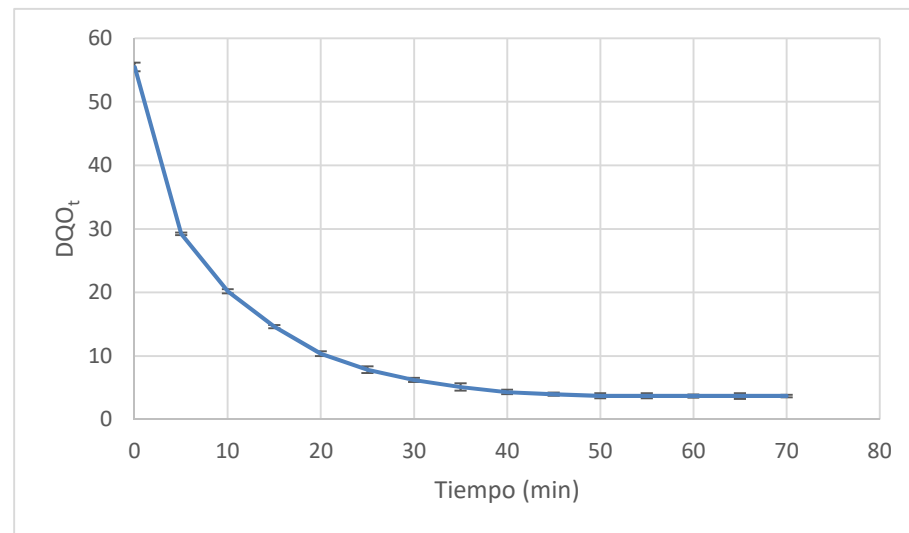


Figura 99 DQOt NA52 ref.: Tabla E14

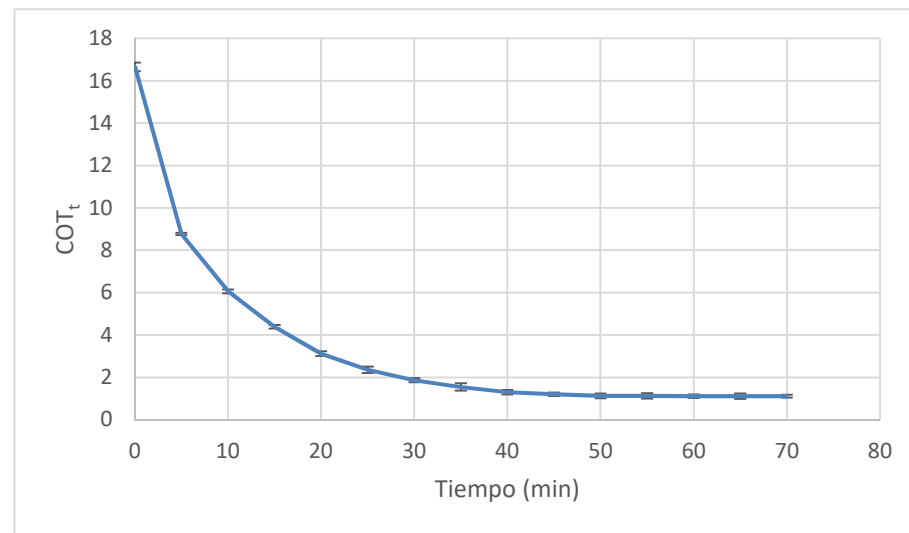


Figura 100 COTt NA52 ref.: Tabla E15

Tabla 70 DQO_t NA52 ref.: Tabla C5

Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	54.98273	55.23978	56.26797	55.49683	0.6800871
5	29.0208	29.27785	29.40638	29.23501	0.1963242
10	19.89557	20.15262	20.5382	20.19546	0.3234459
15	14.36903	14.62607	14.88312	14.62607	0.2570488
20	9.999197	10.38477	10.77034	10.38477	0.3855731
25	7.300185	7.942807	8.32838	7.857124	0.5194251
30	5.886417	6.27199	6.529038	6.229148	0.3234459
35	4.601173	5.11527	5.757892	5.158112	0.5795485
40	3.958551	4.472648	4.601173	4.344124	0.3400435
45	3.701502	4.087075	4.2156	4.001392	0.2675448
50	3.315929	3.830027	4.087075	3.744344	0.3926485
55	3.444453	3.572978	4.2156	3.744344	0.4131481
60	3.444453	3.701502	3.958551	3.701502	0.2570488
65	3.444453	3.444453	4.2156	3.701502	0.4452215
70	3.572978	3.572978	3.958551	3.701502	0.2226108

Tabla 71 COT_t NA52 ref.: Tabla C5

Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	16.49482	16.57193	16.88039	16.64905	0.2040261
5	8.706241	8.783356	8.821913	8.770504	0.0588973
10	5.968672	6.045787	6.161459	6.058639	0.0970338
15	4.310708	4.387822	4.464937	4.387822	0.0771146
20	2.999759	3.115431	3.231103	3.115431	0.1156719
25	2.190055	2.382842	2.498514	2.357137	0.1558275
30	1.765925	1.881597	1.958712	1.868744	0.0970338
35	1.380352	1.534581	1.727368	1.547434	0.1738646
40	1.187565	1.341795	1.380352	1.303237	0.1020131
45	1.110451	1.226123	1.26468	1.200418	0.0802634
50	0.994779	1.149008	1.226123	1.123303	0.1177945
55	1.033336	1.071893	1.26468	1.123303	0.1239444
60	1.033336	1.110451	1.187565	1.110451	0.0771146
65	1.033336	1.033336	1.26468	1.110451	0.1335665
70	1.071893	1.071893	1.187565	1.110451	0.0667832

Tabla 72 Concentración de colorante NA52 ref.: Tabla C6					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.068728	0.06905	0.070014	0.069264	0.0006689
5	0.024869	0.02503	0.025512	0.025137	0.0003344
10	0.012178	0.012499	0.012981	0.012553	0.0004043
15	0.005269	0.005591	0.006073	0.005644	0.0004043
20	0.001253	0.001574	0.001896	0.001574	0.0003213
25	-0.0005	-0.0002	0.0001	-0.00019	0.0003213
30	-0.0015	-0.0012	-0.0008	-0.00116	0.0003213
35	-0.0031	-0.0026	-0.0020	-0.00255	0.0005642
40	-0.0040	-0.0039	-0.0032	-0.00373	0.0004251
45	-0.0047	-0.0044	-0.0042	-0.00442	0.0002454
50	-0.0047	-0.0045	-0.0044	-0.00453	0.0001607
55	-0.0055	-0.0049	-0.0047	-0.00501	0.0004251
60	-0.0066	-0.0061	-0.0058	-0.00619	0.0004043
65	-0.0065	-0.0058	-0.0055	-0.00592	0.0004908
70	-0.0060	-0.0055	-0.0052	-0.00555	0.0004043

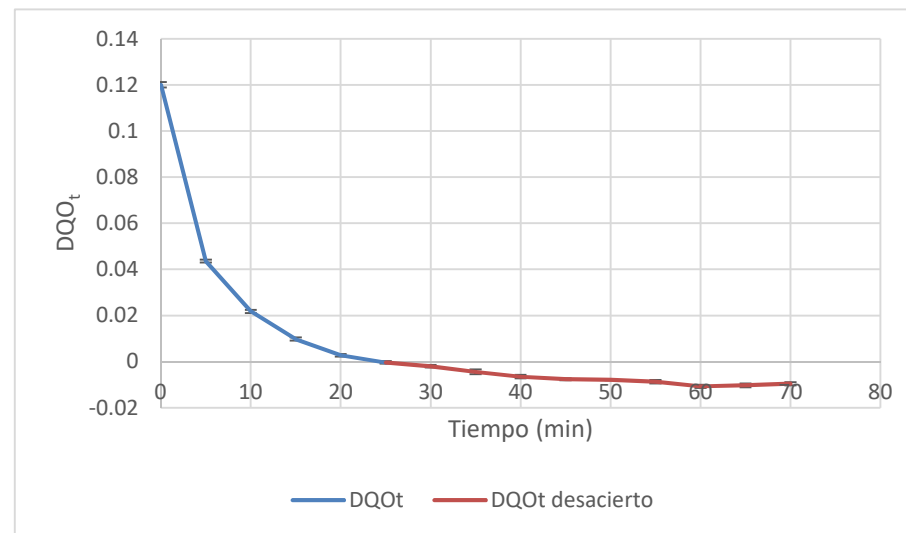


Figura 101 DQOt NA52 ref.: Tabla E17

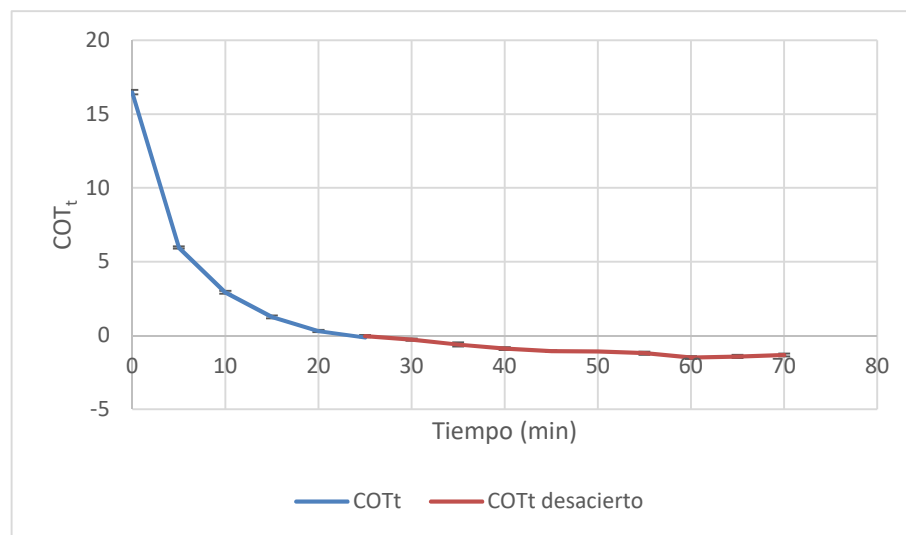


Figura 102 COTt NA52 ref.: Tabla E18

Tabla 73 DQOt NA52 ref.: Tabla C6					
Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.11917	0.119727	0.121399	0.120099	0.0011598
5	0.043122	0.0434	0.044236	0.043586	0.0005799
10	0.021115	0.021672	0.022508	0.021765	0.000701
15	0.009137	0.009694	0.01053	0.009787	0.000701
20	0.002173	0.00273	0.003287	0.00273	0.0005571
25	-0.00089	-0.00033	0.000223	-0.00033	0.0005571
30	-0.00256	-0.00201	-0.00145	-0.00201	0.0005571
35	-0.00535	-0.00451	-0.0034	-0.00442	0.0009783
40	-0.00702	-0.00674	-0.00563	-0.00646	0.000737
45	-0.00813	-0.00758	-0.0073	-0.00767	0.0004255
50	-0.00813	-0.00786	-0.00758	-0.00786	0.0002786
55	-0.00953	-0.00841	-0.00813	-0.00869	0.000737
60	-0.01148	-0.01064	-0.01008	-0.01073	0.000701
65	-0.0112	-0.01008	-0.00953	-0.01027	0.000851
70	-0.01036	-0.00953	-0.00897	-0.00962	0.000701

Tabla 74 COTt NA52 ref.: Tabla C6					
Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	16.49482	16.57193	16.80328	16.62334	0.1605269
5	5.968672	6.007229	6.122901	6.032934	0.0802634
10	2.922644	2.999759	3.115431	3.012611	0.0970338
15	1.26468	1.341795	1.457466	1.354647	0.0970338
20	0.300747	0.377862	0.454976	0.377862	0.0771146
25	-0.12338	-0.04627	0.030846	-0.04627	0.0771146
30	-0.35473	-0.27761	-0.2005	-0.27761	0.0771146
35	-0.7403	-0.62463	-0.4704	-0.61178	0.1354088
40	-0.97164	-0.93309	-0.77886	-0.89453	0.1020131
45	-1.12587	-1.04876	-1.0102	-1.06161	0.0588973
50	-1.12587	-1.08732	-1.04876	-1.08732	0.0385573
55	-1.31866	-1.16443	-1.12587	-1.20299	0.1020131
60	-1.58856	-1.47289	-1.39577	-1.48574	0.0970338
65	-1.55	-1.39577	-1.31866	-1.42148	0.1177945
70	-1.43433	-1.31866	-1.24155	-1.33151	0.0970338

Anexo F Tablas de Concentración, DQO_t y COT_t para RD82

Tabla 75 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D1

Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.100202	0.101571	0.100984	0.10092	0.0006872
5	0.047176	0.047763	0.047371	0.04744	0.0002989
10	0.035044	0.035631	0.03524	0.03531	0.0002989
15	0.027804	0.028587	0.028196	0.0282	0.0003913
20	0.025261	0.026043	0.025848	0.02572	0.0004073
25	0.022326	0.023108	0.022913	0.02278	0.0004073
30	0.019978	0.020565	0.020369	0.0203	0.0002989
35	0.018999	0.019391	0.019782	0.01939	0.0003913
40	0.018021	0.018412	0.017825	0.01809	0.0002989
45	0.016456	0.016847	0.016651	0.01665	0.0001957
50	0.016651	0.016456	0.016651	0.01659	0.000113
55	0.017043	0.016847	0.016456	0.01678	0.0002989
60	0.017434	0.017238	0.017043	0.01724	0.0001957
65	0.017238	0.016847	0.016456	0.01685	0.0003913
70	0.017434	0.016651	0.01626	0.01678	0.0005978

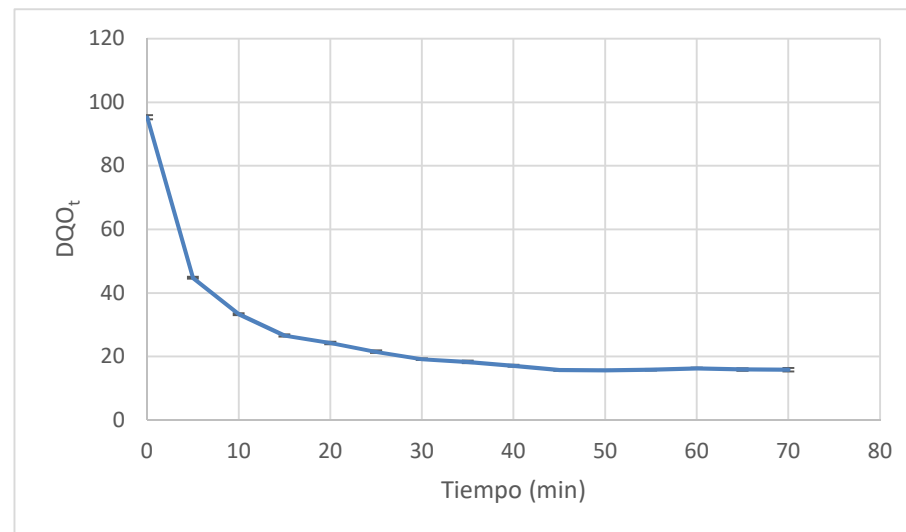


Figura 103 DQO_t RD82 ref.: Tabla F2

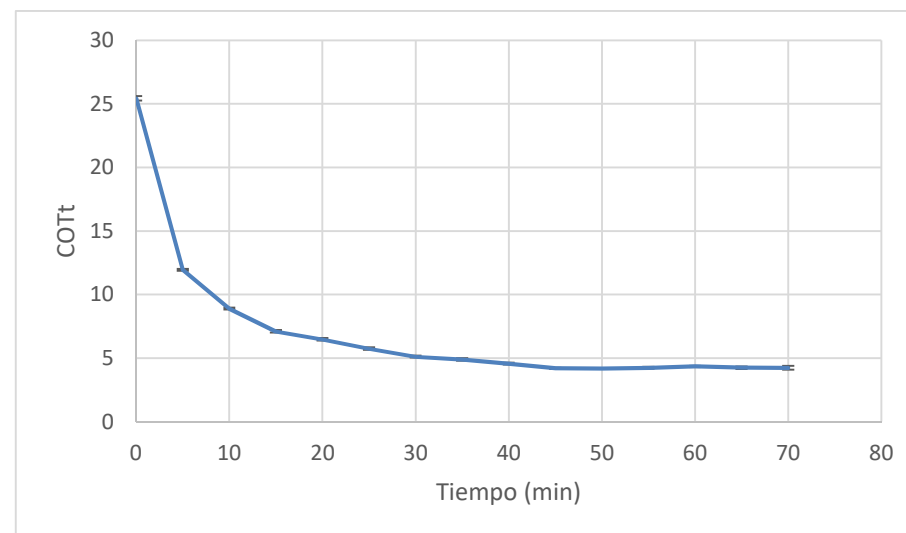


Figura 104 COT_t RD82 ref.: Tabla F3

Tabla 76 DQOt RD82 ref.: Tabla D1

Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	94.59025	95.88323	95.32909	95.2675	0.648682
5	44.5337	45.08784	44.71841	44.78	0.28215
10	33.08165	33.63578	33.26636	33.3279	0.28215
15	26.24736	26.98621	26.61678	26.6168	0.369421
20	23.84613	24.58497	24.40026	24.2771	0.3845056
25	21.07547	21.81431	21.6296	21.5065	0.3845056
30	18.85894	19.41307	19.22836	19.1668	0.28215
35	17.93539	18.30481	18.67423	18.3048	0.369421
40	17.01184	17.38126	16.82713	17.0734	0.28215
45	15.53415	15.90357	15.71886	15.7189	0.1847105
50	15.71886	15.53415	15.71886	15.6573	0.1066427
55	16.08829	15.90357	15.53415	15.842	0.28215
60	16.45771	16.273	16.08829	16.273	0.1847105
65	16.273	15.90357	15.53415	15.9036	0.369421
70	16.45771	15.71886	15.34944	15.842	0.5642999

Tabla 77 COTt RD82 ref.: Tabla D1

Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	25.25079	25.59595	25.44802	25.4316	0.1731651
5	11.88823	12.03616	11.93754	11.954	0.0753197
10	8.831119	8.979044	8.880427	8.89686	0.0753197
15	7.006711	7.203945	7.105328	7.10533	0.0986166
20	6.365703	6.562937	6.513628	6.48076	0.1026434
25	5.626079	5.823312	5.774004	5.74113	0.1026434
30	5.034379	5.182304	5.132995	5.11656	0.0753197
35	4.787837	4.886454	4.985071	4.88645	0.0986166
40	4.541296	4.639912	4.491987	4.55773	0.0753197
45	4.146829	4.245446	4.196138	4.19614	0.0493083
50	4.196138	4.146829	4.196138	4.1797	0.0284682
55	4.294754	4.245446	4.146829	4.22901	0.0753197
60	4.393371	4.344062	4.294754	4.34406	0.0493083
65	4.344062	4.245446	4.146829	4.24545	0.0986166
70	4.393371	4.196138	4.097521	4.22901	0.1506394

Tabla 78 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D2					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.104311	0.103528	0.102745	0.10353	0.0007827
5	0.05148	0.051872	0.049915	0.05109	0.0010354
10	0.040131	0.040718	0.03974	0.0402	0.0004924
15	0.027217	0.027022	0.02663	0.02696	0.0002989
20	0.020956	0.021739	0.020565	0.02109	0.0005978
25	0.013325	0.012934	0.012542	0.01293	0.0003913
30	0.00902	0.009607	0.009412	0.00935	0.0002989
35	0.006672	0.006477	0.006085	0.00641	0.0002989
40	0.005694	0.005498	0.004911	0.00537	0.0004073
45	0.005498	0.005303	0.004716	0.00517	0.0004073
50	0.005303	0.005303	0.004716	0.00511	0.0003389
55	0.004716	0.00452	0.004129	0.00445	0.0002989
60	0.004129	0.004324	0.003933	0.00413	0.0001957
65	0.003542	0.004129	0.003542	0.00374	0.0003389
70	0.002955	0.003542	0.003346	0.00328	0.0002989

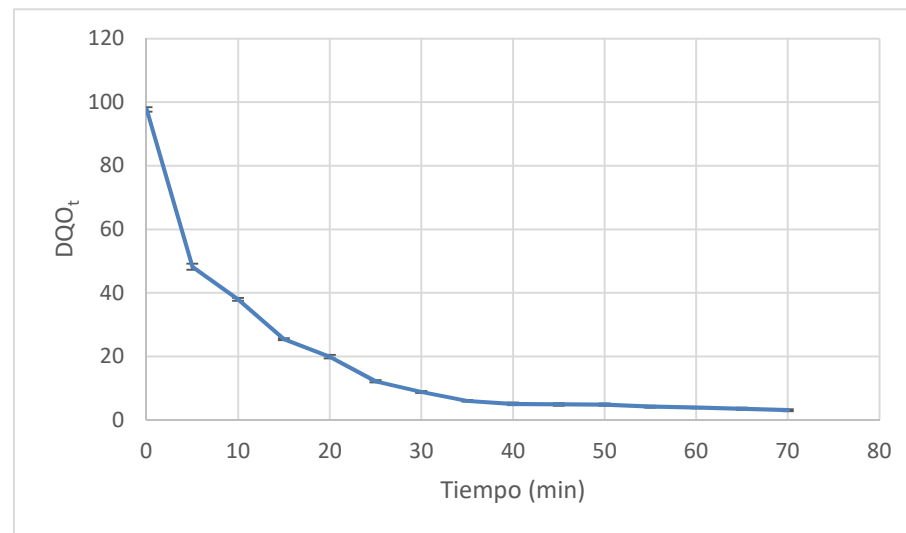


Figura 105 DQOt RD82 ref.: Tabla F5

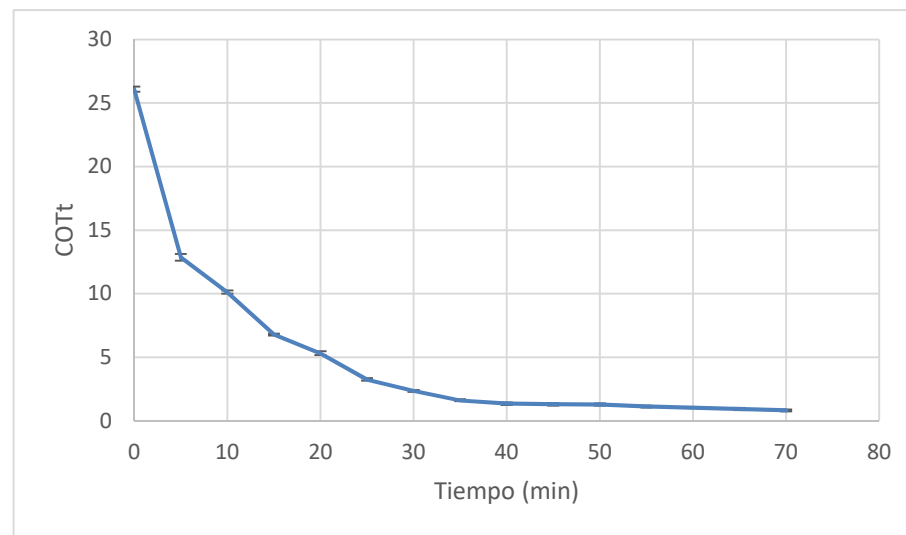


Figura 106 COTt RD82 ref.: Tabla F6

Tabla 79 DQOt RD82 ref.: Tabla D2

Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	98.46917	97.73033	96.99149	97.7303	0.738842
5	48.59734	48.96676	47.11965	48.2279	0.9773961
10	37.88413	38.43826	37.5147	37.9457	0.4648446
15	25.69323	25.50852	25.1391	25.447	0.28215
20	19.7825	20.52134	19.41307	19.9056	0.5642999
25	12.57879	12.20936	11.83994	12.2094	0.369421
30	8.515154	9.069286	8.884575	8.82301	0.28215
35	6.298628	6.113918	5.744497	6.05235	0.28215
40	5.375076	5.190365	4.636234	5.06722	0.3845056
45	5.190365	5.005655	4.451523	4.88251	0.3845056
50	5.005655	5.005655	4.451523	4.82094	0.319928
55	4.451523	4.266813	3.897392	4.20524	0.28215
60	3.897392	4.082102	3.712681	3.89739	0.1847105
65	3.34326	3.897392	3.34326	3.52797	0.319928
70	2.789129	3.34326	3.15855	3.09698	0.28215

Tabla 80 COTt RD82 ref.: Tabla D2

Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	26.28626	26.08903	25.8918	26.089	0.1972333
5	12.97302	13.07163	12.57855	12.8744	0.2609151
10	10.11314	10.26106	10.01452	10.1296	0.1240899
15	6.858786	6.809478	6.710862	6.79304	0.0753197
20	5.28092	5.478154	5.182304	5.31379	0.1506394
25	3.357896	3.25928	3.160663	3.25928	0.0986166
30	2.273113	2.421038	2.37173	2.35529	0.0753197
35	1.681414	1.632105	1.533489	1.61567	0.0753197
40	1.434872	1.385564	1.237639	1.35269	0.1026434
45	1.385564	1.336255	1.18833	1.30338	0.1026434
50	1.336255	1.336255	1.18833	1.28695	0.0854045
55	1.18833	1.139022	1.040405	1.12259	0.0753197
60	1.040405	1.089714	0.991097	1.04041	0.0493083
65	0.89248	1.040405	0.89248	0.94179	0.0854045
70	0.744556	0.89248	0.843172	0.82674	0.0753197

Tabla 81 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D3					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.101963	0.103528	0.10255	0.10268	0.0007908
5	0.041697	0.040131	0.040914	0.04091	0.0007827
10	0.026435	0.024282	0.026043	0.02559	0.0011465
15	0.022326	0.021347	0.021739	0.0218	0.0004924
20	0.020956	0.020369	0.021347	0.02089	0.0004924
25	0.020369	0.018999	0.02076	0.02004	0.0009247
30	0.019391	0.019782	0.019391	0.01952	0.0002259
35	0.01763	0.017825	0.017825	0.01776	0.000113
40	0.017434	0.018217	0.017825	0.01783	0.0003913
45	0.017434	0.018021	0.018021	0.01783	0.0003389
50	0.017238	0.017825	0.017434	0.0175	0.0002989
55	0.017434	0.016847	0.017238	0.01717	0.0002989
60	0.017043	0.017043	0.016847	0.01698	0.000113
65	0.016847	0.017238	0.017434	0.01717	0.0002989
70	0.016651	0.017434	0.017825	0.0173	0.0005978

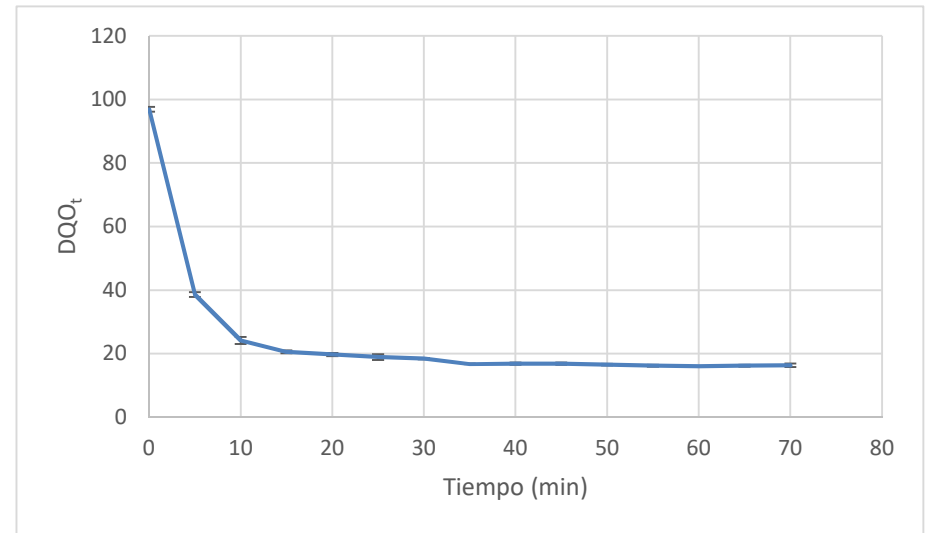


Figura 107 DQOt RD82 ref.: Tabla F8

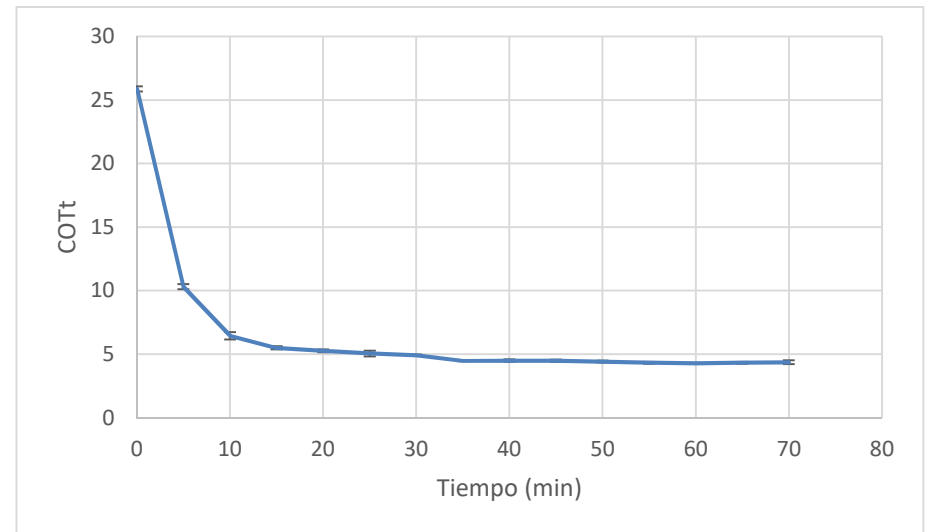


Figura 108 COTt RD82 ref.: Tabla F9

Tabla 82 DQOt RD82 ref.: Tabla D3

Tiempo (min)	DQOt Ex1	DQOt Ex2	DQOt Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	96.25265	97.73033	96.80678	96.92992	0.7464986
5	39.36181	37.88413	38.62297	38.62297	0.738842
10	24.95439	22.92257	24.58497	24.15398	1.0823048
15	21.07547	20.15192	20.52134	20.58291	0.4648446
20	19.7825	19.22836	20.15192	19.72093	0.4648446
25	19.22836	17.93539	19.59779	18.92051	0.8729078
30	18.30481	18.67423	18.30481	18.42795	0.2132853
35	16.64242	16.82713	16.82713	16.76556	0.1066427
40	16.45771	17.19655	16.82713	16.82713	0.369421
45	16.45771	17.01184	17.01184	16.82713	0.319928
50	16.273	16.82713	16.45771	16.51928	0.28215
55	16.45771	15.90357	16.273	16.21143	0.28215
60	16.08829	16.08829	15.90357	16.02672	0.1066427
65	15.90357	16.273	16.45771	16.21143	0.28215
70	15.71886	16.45771	16.82713	16.33457	0.5642999

Tabla 83 COTt RD82 ref.: Tabla D3

Tiempo (min)	COTt Ex1	COTt Ex2	COTt Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	25.69456	26.08903	25.84249	25.87536	0.1992772
5	10.5076	10.11314	10.31037	10.31037	0.1972333
10	6.661553	6.119162	6.562937	6.447884	0.2889204
15	5.626079	5.379537	5.478154	5.49459	0.1240899
20	5.28092	5.132995	5.379537	5.264484	0.1240899
25	5.132995	4.787837	5.231612	5.050815	0.233022
30	4.886454	4.985071	4.886454	4.919326	0.0569363
35	4.442679	4.491987	4.491987	4.475551	0.0284682
40	4.393371	4.590604	4.491987	4.491987	0.0986166
45	4.393371	4.541296	4.541296	4.491987	0.0854045
50	4.344062	4.491987	4.393371	4.409807	0.0753197
55	4.393371	4.245446	4.344062	4.327626	0.0753197
60	4.294754	4.294754	4.245446	4.278318	0.0284682
65	4.245446	4.344062	4.393371	4.327626	0.0753197
70	4.196138	4.393371	4.491987	4.360499	0.1506394

Tabla 84 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D4					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.101963	0.10118	0.100789	0.10131	0.0005978
5	0.049132	0.045806	0.042871	0.04594	0.0031327
10	0.040914	0.037001	0.038175	0.0387	0.0020082
15	0.032109	0.029957	0.026043	0.02937	0.0030752
20	0.023695	0.021347	0.020565	0.02187	0.0016293
25	0.017434	0.01626	0.014695	0.01613	0.0013743
30	0.01489	0.011955	0.014108	0.01365	0.0015198
35	0.012542	0.01176	0.013521	0.01261	0.0008823
40	0.012151	0.011564	0.012934	0.01222	0.0006872
45	0.011955	0.011368	0.012738	0.01202	0.0006872
50	0.01176	0.011564	0.012542	0.01196	0.0005177
55	0.011564	0.01176	0.012738	0.01202	0.000629
60	0.01176	0.011368	0.012542	0.01189	0.0005978
65	0.011368	0.011564	0.012738	0.01189	0.0007408
70	0.010977	0.011368	0.011564	0.0113	0.0002989

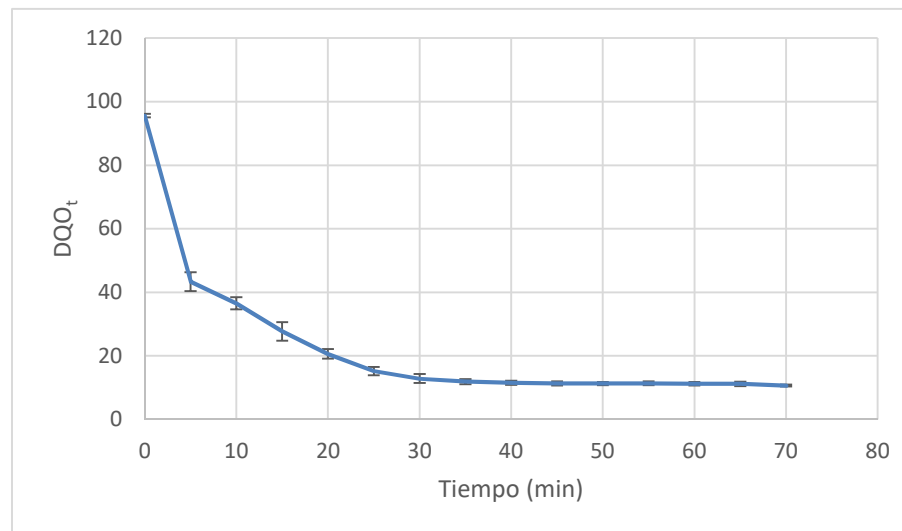


Figura 109 DQOt RD82 ref.: Tabla F11

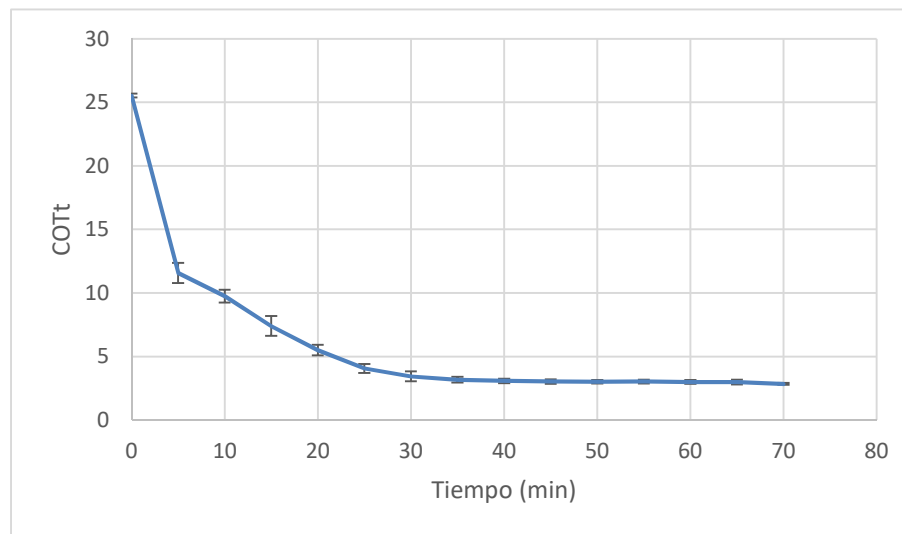


Figura 110 COTt RD82 ref.: Tabla F12

Tabla 85 DQOt RD82 ref.: Tabla D4

Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	96.25265	95.5138	95.14438	95.63694	0.5642999
5	46.38081	43.24073	40.47007	43.36387	2.9572916
10	38.62297	34.92876	36.03702	36.52958	1.8957214
15	30.31099	28.27918	24.58497	27.72505	2.9029535
20	22.36844	20.15192	19.41307	20.64448	1.5380223
25	16.45771	15.34944	13.87176	15.2263	1.297364
30	14.05647	11.28581	13.31763	12.88664	1.4347303
35	11.83994	11.1011	12.7635	11.90151	0.8329058
40	11.47052	10.91639	12.20936	11.53209	0.648682
45	11.28581	10.73168	12.02465	11.34738	0.648682
50	11.1011	10.91639	11.83994	11.28581	0.4886981
55	10.91639	11.1011	12.02465	11.34738	0.5937612
60	11.1011	10.73168	11.83994	11.22424	0.5642999
65	10.73168	10.91639	12.02465	11.22424	0.6993027
70	10.36226	10.73168	10.91639	10.67011	0.28215

Tabla 86 COTt RD82 ref.: Tabla D4

Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	25.69456	25.49733	25.39871	25.5302	0.1506394
5	12.38132	11.54308	10.80345	11.57595	0.7894465
10	10.31037	9.324202	9.620052	9.751541	0.5060612
15	8.091494	7.549103	6.562937	7.401178	0.774941
20	5.971237	5.379537	5.182304	5.511026	0.4105738
25	4.393371	4.097521	3.703054	4.064649	0.3463302
30	3.752363	3.012738	3.555129	3.440077	0.383
35	3.160663	2.96343	3.407204	3.177099	0.2223435
40	3.062046	2.914121	3.25928	3.078482	0.1731651
45	3.012738	2.864813	3.209971	3.029174	0.1731651
50	2.96343	2.914121	3.160663	3.012738	0.1304575
55	2.914121	2.96343	3.209971	3.029174	0.1585041
60	2.96343	2.864813	3.160663	2.996302	0.1506394
65	2.864813	2.914121	3.209971	2.996302	0.1866783
70	2.766196	2.864813	2.914121	2.848377	0.0753197

Tabla 87 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D5					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.101963	0.102745	0.103528	0.102745	0.0007827
5	0.054807	0.05422	0.053828	0.054285	0.0004924
10	0.042871	0.041697	0.040914	0.041827	0.0009848
15	0.035044	0.03387	0.033674	0.034196	0.0007408
20	0.027022	0.026435	0.026043	0.0265	0.0004924
25	0.021934	0.022326	0.023108	0.022456	0.0005978
30	0.020369	0.019978	0.020956	0.020434	0.0004924
35	0.019586	0.019195	0.018608	0.01913	0.0004924
40	0.018412	0.017434	0.018217	0.018021	0.0005177
45	0.018412	0.017043	0.018999	0.018151	0.0010041
50	0.018412	0.017043	0.018608	0.018021	0.0008529
55	0.017238	0.016847	0.017238	0.017108	0.0002259
60	0.01763	0.017238	0.01763	0.017499	0.0002259
65	0.017043	0.016847	0.019195	0.017695	0.0013028
70	0.017825	0.016651	0.018217	0.017564	0.0008146

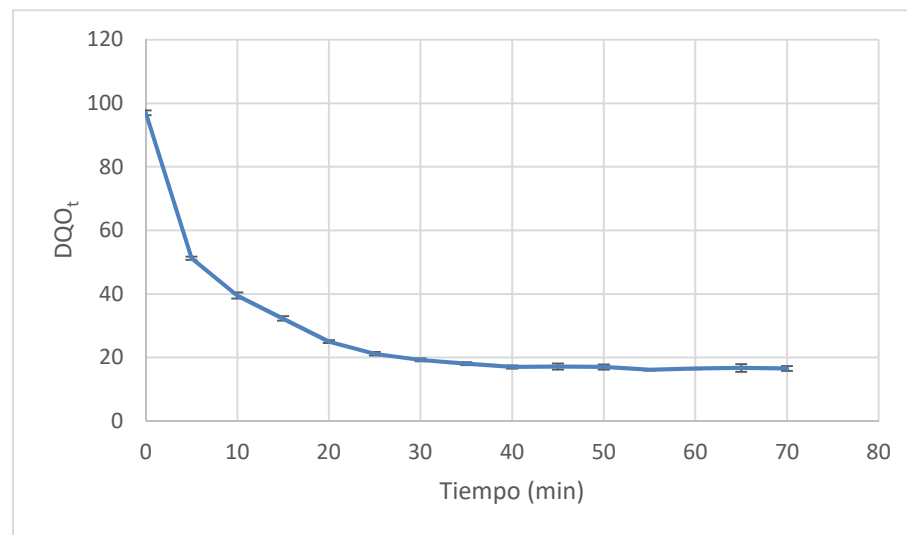


Figura 111 DQOt RD82 ref.: Tabla F14

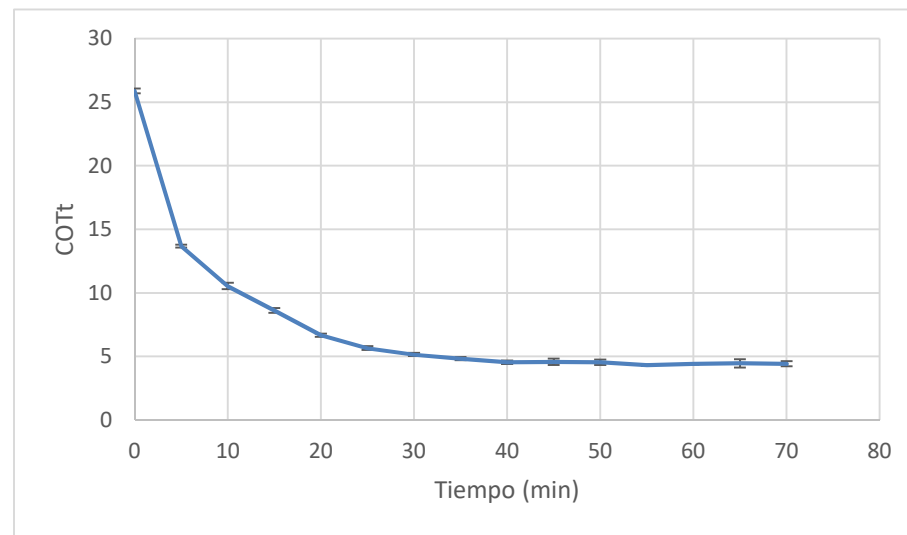


Figura 112 COTt RD82 ref.: Tabla F15

Tabla 88 DQOt RD82 ref.: Tabla D5					
Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	96.25265	96.99149	97.73033	96.99149	0.738842
5	51.73741	51.18328	50.81386	51.24485	0.4648446
10	40.47007	39.36181	38.62297	39.48495	0.9296892
15	33.08165	31.97339	31.78868	32.28124	0.6993027
20	25.50852	24.95439	24.58497	25.01596	0.4648446
25	20.70605	21.07547	21.81431	21.19861	0.5642999
30	19.22836	18.85894	19.7825	19.28993	0.4648446
35	18.48952	18.1201	17.56597	18.05853	0.4648446
40	17.38126	16.45771	17.19655	17.01184	0.4886981
45	17.38126	16.08829	17.93539	17.13498	0.9478607
50	17.38126	16.08829	17.56597	17.01184	0.8051344
55	16.273	15.90357	16.273	16.14986	0.2132853
60	16.64242	16.273	16.64242	16.51928	0.2132853
65	16.08829	15.90357	18.1201	16.70399	1.2298632
70	16.82713	15.71886	17.19655	16.58085	0.7690112

Tabla 89 COTt RD82 ref.: Tabla D5					
Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	25.69456	25.8918	26.08903	25.8918	0.1972333
5	13.81126	13.66333	13.56472	13.67977	0.1240899
10	10.80345	10.5076	10.31037	10.54047	0.2481797
15	8.831119	8.535269	8.485961	8.61745	0.1866783
20	6.809478	6.661553	6.562937	6.677989	0.1240899
25	5.527462	5.626079	5.823312	5.658951	0.1506394
30	5.132995	5.034379	5.28092	5.149432	0.1240899
35	4.935762	4.837146	4.689221	4.820709	0.1240899
40	4.639912	4.393371	4.590604	4.541296	0.1304575
45	4.639912	4.294754	4.787837	4.574168	0.2530306
50	4.639912	4.294754	4.689221	4.541296	0.21493
55	4.344062	4.245446	4.344062	4.31119	0.0569363
60	4.442679	4.344062	4.442679	4.409807	0.0569363
65	4.294754	4.245446	4.837146	4.459115	0.3283109
70	4.491987	4.196138	4.590604	4.426243	0.2052869

Tabla 90 Concentración de colorante RD82 ref.: Tabla D6					
Tiempo (min)	Conc. Molar Ex1	Conc. Molar Ex2	Conc. Molar Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	0.102745	0.101963	0.100397	0.101702	0.0011956
5	0.041893	0.041305	0.040914	0.041371	0.0004924
10	0.024478	0.025261	0.025456	0.025065	0.0005177
15	0.017434	0.016847	0.016456	0.016912	0.0004924
20	0.012738	0.012151	0.011955	0.012281	0.0004073
25	0.010194	0.009607	0.01039	0.010064	0.0004073
30	0.007651	0.008433	0.007846	0.007977	0.0004073
35	0.006672	0.005694	0.006281	0.006216	0.0004924
40	0.005694	0.005107	0.005498	0.005433	0.0002989
45	0.004716	0.004716	0.004324	0.004585	0.0002259
50	0.004324	0.00452	0.004129	0.004324	0.0001957
55	0.00452	0.004324	0.003542	0.004129	0.0005177
60	0.004129	0.00452	0.00315	0.003933	0.0007055
65	0.004911	0.004129	0.003346	0.004129	0.0007827
70	0.00452	0.003933	0.003542	0.003998	0.0004924

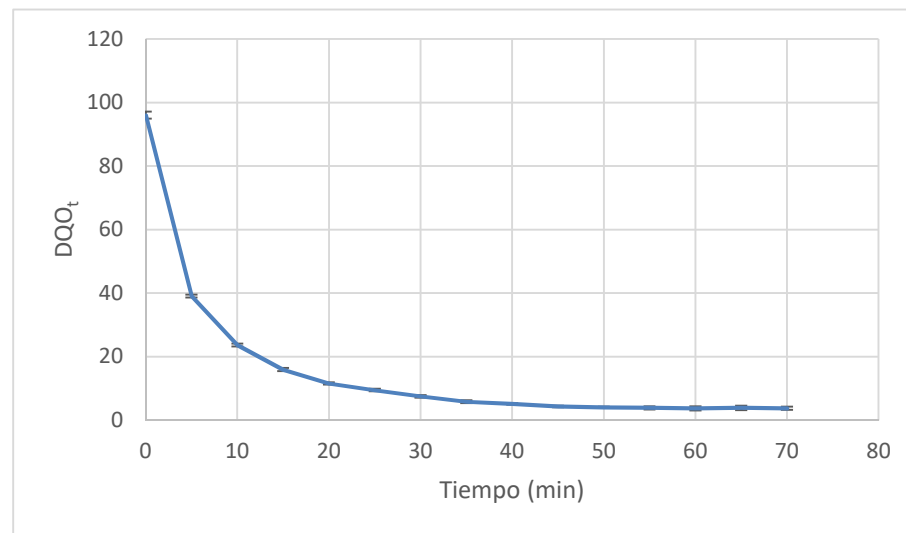


Figura 113 DQOt RD82 ref.: Tabla F17

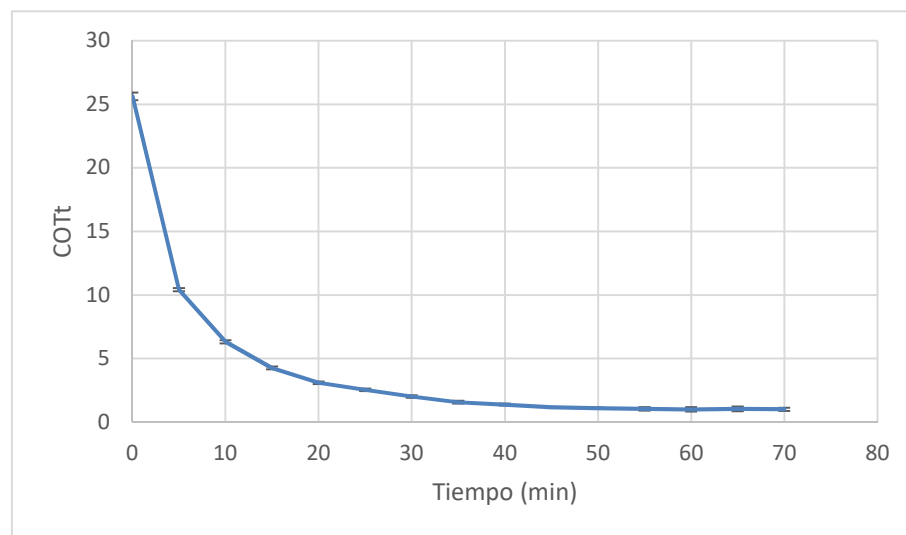


Figura 114 COTt RD82 ref.: Tabla F18

Tabla 91 DQOt RD82 ref.: Tabla D6

Tiempo (min)	DQO _t Ex1	DQO _t Ex2	DQO _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	96.99149	96.25265	94.77496	96.00637	1.1285999
5	39.54652	38.99239	38.62297	39.05396	0.4648446
10	23.10728	23.84613	24.03084	23.66142	0.4886981
15	16.45771	15.90357	15.53415	15.96515	0.4648446
20	12.02465	11.47052	11.28581	11.59366	0.3845056
25	9.623418	9.069286	9.808128	9.500277	0.3845056
30	7.222181	7.961023	7.406891	7.530032	0.3845056
35	6.298628	5.375076	5.929207	5.867637	0.4648446
40	5.375076	4.820944	5.190365	5.128795	0.28215
45	4.451523	4.451523	4.082102	4.328383	0.2132853
50	4.082102	4.266813	3.897392	4.082102	0.1847105
55	4.266813	4.082102	3.34326	3.897392	0.4886981
60	3.897392	4.266813	2.973839	3.712681	0.6659832
65	4.636234	3.897392	3.15855	3.897392	0.738842
70	4.266813	3.712681	3.34326	3.774251	0.4648446

Tabla 92 COTt RD82 ref.: Tabla D6

Tiempo (min)	COT _t Ex1	COT _t Ex2	COT _t Ex3	Promedio	Desviación estándar
0	25.8918	25.69456	25.3001	25.62882	0.3012788
5	10.55691	10.40899	10.31037	10.42542	0.1240899
10	6.16847	6.365703	6.415012	6.316395	0.1304575
15	4.393371	4.245446	4.146829	4.261882	0.1240899
20	3.209971	3.062046	3.012738	3.094919	0.1026434
25	2.568963	2.421038	2.618271	2.536091	0.1026434
30	1.927955	2.125188	1.977263	2.010136	0.1026434
35	1.681414	1.434872	1.582797	1.566361	0.1240899
40	1.434872	1.286947	1.385564	1.369128	0.0753197
45	1.18833	1.18833	1.089714	1.155458	0.0569363
50	1.089714	1.139022	1.040405	1.089714	0.0493083
55	1.139022	1.089714	0.89248	1.040405	0.1304575
60	1.040405	1.139022	0.793864	0.991097	0.1777837
65	1.237639	1.040405	0.843172	1.040405	0.1972333
70	1.139022	0.991097	0.89248	1.007533	0.1240899