



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

REACCIÓN DE FENTON PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES
CONTAMINADOS CON COLORANTES

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y Remedación

Profesora Guía
Master of Science Paola Posligua

Autora
Gina Estefanía Terán Suárez

Año
2015

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Eugenia Paola Posligua Chica
Master of Science
CI: 0919750158

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Gina Estefanía Terán Suárez
CI: 1717158156

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente. A mi familia por su apoyo. Al Ing. Carlos Banchón por guiarme y motivarme, por su tiempo, colaboración y enseñanzas. Al Ing. Javier Álava por compartirme sus conocimientos. Al Ing. Juan Carlos Ocampo por su gran aporte en la investigación. A la Ing. Paola Posligna por su constante asesoramiento en 5 años de preparación. Al Sr. Fernando Muñoz de Aromcolor, S.A.

A Diosito.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis papis, Gina y Franklin, a mi ñaño, Tivito, por ser pilares de mis logros y acompañarme en cada uno de ellos. A cuatro maravillosas personas, que a pesar de no tener la oportunidad de conocer, sé que su anhelo por formar parte de este proceso con su apoyo y amor me hubiesen permitido seguir adelante, tal cual lo hizo toda mi familia. Lo dedico a mis abuelitos Ricardo Alfonso Suárez, M. Enriqueta Bravo, Carlos Eloy Terán y a mi ñaño Franklin Alfonso Terán.

RESUMEN

La problemática ambiental que surge por las descargas de efluentes industriales con colorantes sobre los compartimentos ambientales y la salud humana es persistente y tóxica, por lo cual se buscan procesos de remediación que prevengan la contaminación del recurso hídrico.

En el presente trabajo de titulación se desarrolló un proceso avanzado de oxidación Fenton, donde se evaluó la eficiencia mediante la remoción de los colorantes azoicos textiles amarillo reactivo 160, rojo reactivo 190 y azul reactivo 81 en efluente sintético. Los parámetros de dosis, pH y tiempo de reposo se establecieron mediante un diseño experimental exploratorio y los resultados fueron analizados estadísticamente con ANOVA. Se desarrolló un índice de potencial de oxidación-reducción como parámetro de calidad del procedimiento.

La tecnología Fenton, transforma la materia contaminante en compuestos más simples como ácidos orgánicos y sustancias volátiles, al liberar radicales hidroxilos que oxidan la materia. Las condiciones óptimas del proceso avanzado de oxidación fueron dosis molar 1:3 $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$, pH ácido 3,5, temperatura inicial 40°C, tiempo de mezcla 45 minutos a una velocidad de 300 rpm y con energía solar. Del tratamiento se puede concluir que Fenton remueve DQO, turbidez, absorbancia y color, pues la eficiencia reportada es desde 99,6%, después de 3 horas.

ABSTRACT

Environmental problems posed by the discharge of industrial effluents with coloring on the environmental compartments and human health are persistent and toxic, so that remediation processes to prevent pollution of water resources are sought.

In this paper did an advanced oxidation process Fenton, where efficiency was evaluated by removing the reactive azo dyes textiles yellow 160, red 190 and reactive blue 81 reagent developed synthetic effluent. The dose parameters, pH and downtime were established by exploratory experimental design and the results were statistically analyzed with ANOVA. An index of oxidation-reduction potential as a quality parameter of the process was developed.

This Fenton technology transforms contaminant matter into simpler compounds such as organic acids and volatile substances, by releasing hydroxyl radicals which oxidize matter. Optimal conditions of advanced oxidation process were molar dose 1:3 $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$, pH 3,5, initial temperature 40°C, mixing time 45 minutes at a speed of 300 rpm and solar. In conclusion Fenton removes COD, turbidity, absorbance and color, as the reported efficiency is from 99.6% after 3 hours.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Uso y producción de los principales colorantes empleados en la industria textil	4
1.2. Impactos ambientales y afectaciones en la salud provocados por la contaminación del agua con colorantes de efluentes industriales textiles	6
1.3. Tratamientos usados en aguas residuales industriales de textiles	11
1.4. Reacción Fenton para el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes	12
1.5. Marco Legal nacional para el cumplimiento de descarga de efluentes contaminados	15
2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	16
2.1. Preparación de la muestra sintética de agua residual industrial textil	16
2.2. Cálculo de la dosis de reactivo Fenton	17
2.2.1. Cálculo de la dosis de peróxido de hidrógeno al 30%	17
2.2.2. Determinación de las dosis de sulfato ferroso heptahidratado al 99,5%	18
2.3. Desarrollo del diseño experimental exploratorio (DEE)	20
2.4. Parámetros de caracterización físico-química del agua residual sintética de textil	22
2.5. Remediación del agua bajo el proceso de oxidación avanzada del Reactivo Fenton	24

3. CAPÍTULO III: RESULTADOS	29
4. CAPÍTULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS.....	36
4.1. Efecto Fenton en el potencial de oxidación-reducción.....	36
4.1.1. Dosificación óptima del reactivo Fenton	40
4.1.2. Tiempo óptimo de reposo para el tratamiento con reactivo Fenton .	46
4.2. Procesos alternativos de oxidación	47
4.3. Degradación de colorantes textiles azo y reactivos con el proceso de Fenton	50
5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1. Conclusiones.....	54
5.2. Recomendaciones	55
REFERENCIAS	56
ANEXOS	68

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

A medida que el desarrollo industrial ha evolucionado, la contaminación del ambiente se ha incrementado, sobre todo por el uso de diversos productos de origen químico o biológico como colorantes (García, 2010, p. 4). Estas sustancias al ser empleadas en procesos productivos generan efluentes con elevadas concentraciones de color, figurando un impacto ambiental negativo, para el cual es indispensable el tratamiento residual previo a la descarga en cauces o en el sistema de alcantarillado (Rodríguez, et al., 2006, p. 12; Donato, et al., 2013, p. 23).

En la actualidad existen varios métodos para la remoción de colorantes en las aguas residuales industriales como por ejemplo los mecanismos de coagulación-floculación, ozonización, adsorción, intercambio iónico y oxidación avanzada (Garcés, Hernández, Peñuela, Rodríguez y Salazar, 2012, p. 3; Moreno, Figueroa y Hormanza, 2013, p. 2).

Dentro de los métodos avanzados de oxidación se encuentra la reacción de Fenton, un proceso no fotoquímico que surge a finales del siglo XIX, cuando en 1894, Henry John Horstman Fenton descubre que los iones de hierro en presencia de algunos agentes oxidantes producen una solución capaz de oxidar la materia contaminante de las aguas residuales (Domènech, Jardim y Litter, 2006, pp. 6 y 7; Barbusinski, 2009, p.28). El reactivo Fenton genera una precipitación de los radicales hidroxilos que arrastran consigo a los colorantes (Castellos y Criado, 2005, p.285).

La reacción Fenton ha sido utilizada en otros países como en España para descontaminar el suelo de contaminantes que presentan peligrosidad cancerígena; en el tratamiento de aguas de textiles, por disminuir la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO), color, pH, sólidos suspendidos y compuestos orgánicos clorados (Blanco, 2009, p. 19; Iglesias, Romero y Santos, 2011, p. 90).

Algunos colorantes de uso industrial y en ensayos de laboratorios como: yodo, fenolftaleína, verde de bromocresol, rojo de metilo, cristal violeta, azul de metileno, safranina, etc. forman parte de los residuos líquidos peligrosos (Torres, Juárez y García, 2010, p. 2; Guarín y Mera, 2011, p. 4). Estos residuos pueden ser tratados a través del proceso de Fenton y medios fotoquímicos con radiación UV (Silva, Trujillo, Aguilar e Hincapié, 2012, p. 10).

A nivel nacional, se ha empleado el proceso avanzado de oxidación Fenton para el tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos en Nueva Loja, Sucumbíos y a su vez contaminados con metales pesados como en Zaruma, El Oro (Coello, 2011, p. 23; Villacreces, 2013, p. 65). Sin embargo la aplicación de este método para el tratamiento de aguas residuales industriales en Ecuador no se ha promovido a pesar de ser una técnica altamente efectiva.

ALCANCE

El trabajo de titulación tiene como alcance la remoción de contaminantes (colorantes), químicos y orgánicos, que provocan la coloración del agua residual industrial de textil mediante la implementación de la reacción Fenton a escala de laboratorio.

Se realizará un diseño de experimentos para establecer las concentraciones y dosis adecuadas de los compuestos: fuente de hierro (sulfato ferroso, FeSO_4) y oxidante químico (peróxido de hidrógeno, H_2O_2).

Se cumplirán los límites máximos permisibles establecidos en las normas ambientales nacionales para el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) como el Libro VI de la Calidad Ambiental en el Anexo 1 Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua.

JUSTIFICACIÓN

Los efluentes residuales industriales de textiles se caracterizan por tener la presencia elevada de colorantes, los cuales son descargados a los cauces de ríos o en los alcantarillados, provocando la inestabilidad en los sistemas

ecológicos (Menéndez, 2008, p. 29; Mestanza, 2012, p. 3). La presencia de diversos colorantes en los recursos hídricos, a pesar del impacto visual, disminuyen la difusión de oxígeno y radiación solar, por tanto afectan la interrelación acuática de micro y macroorganismos con los factores ambientales (Almaguer, 2013, pp. 56-59).

Otra problemática existente es la composición o naturaleza química de estos compuestos, pues se los consideran persistentes en el ambiente y altamente peligrosos para la salud al producir cáncer, alergias y mutaciones (Arroyave, Garcés y Mejía, 2012, p. 13; Sulaka y Yatmaz, 2012, pp. 18 y 19).

La aplicación de la reacción Fenton es de importancia científica, ya que se ha demostrado su eficiencia en remoción de contaminantes peligrosos (Patil y Raut, 2014, p. 7), por lo cual permitiría establecer condiciones para la remoción de colorantes; estas sustancias, colorantes, son considerados, sustancias no coloidales muy estables por su tamaño de partícula y no son fácilmente removidos del agua por tratamientos convencionales (Forero, Ortiz y Ríos, 2005, pp. 10 y 11 ; Arévalo, 2011, p. 14).

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un proceso experimental para la remoción de colorantes en aguas residuales mediante una reacción de Fenton

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la calidad físico-química del agua residual contaminada con colorantes antes y después de su tratamiento
- Determinar las concentraciones y dosis óptimas del reactivo de Fenton para la remoción de colorantes de aguas residuales
- Determinar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales industriales a escala de laboratorio mediante los porcentajes de remoción de los contaminantes

1. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Uso y producción de los principales colorantes empleados en la industria textil

Un colorante es un compuesto orgánico aromático, capaz de impartir color al sustrato adherido, debido al grupo químico cromóforo en su molécula, el cual etimológicamente se define como chromo, color, foro, portador (Lokúan, 2012, p. 9). La variabilidad de color es una propiedad dependiente del tipo y la disposición de este grupo funcional que absorbe energía electromagnética en rangos visibles de 400-700 nm (Dos Santos y Maier, 2010, p 17). Por ejemplo, el color azul se encuentra en un rango de 436 a 495 nm., el color amarillo está en el rango de luz visible de 566 a 589 nm y el color rojo en 627 a 700 nm.

El uso de colorantes es abundante en la industria textil, la cual consume 7×10^5 t.año⁻¹ y producidos de 100.000 a 800.000 unidades al año (Garcés y Hernández, 2012, p. 6; Bouasla, 2012, p. 34; Bahmami, Rezaei, Esrafil, Gholami y Jonidi, 2013, p. 29). Se emplean colorantes naturales y sintéticos para el proceso de tintura y estampado de fibras (lana, algodón), hilos y tejidos, de los cuales los sintéticos son la mayoría en el mercado (Daud, Akpan y Hameed, 2012, p. 11). Dentro de este grupo, los colorantes azoicos son ampliamente requeridos por las características técnicas de alta solubilidad, brillo y resistencia al calor, luz, agua y otros disolventes; así son utilizados en un 70% para la industria textil mundial (Blanco, 2009, p. 45). De los colorantes azoicos, los colorantes reactivos son altamente utilizados, debido a su costo y adaptación de color en cualquier celulosa (Jiménez, 2012, p. 23).

Actualmente existe una variedad de tinturas que se aplican en la industria, las cuales se enlistan en la Figura 1 de acuerdo al origen en naturales y sintéticos, a la solubilidad en material colorante y pigmentos, a la aplicación tecnológica en reactivos, tina, directos, dispersos y mordientes y por último según la composición química en grupos ácidos, básicos y cromóforos.

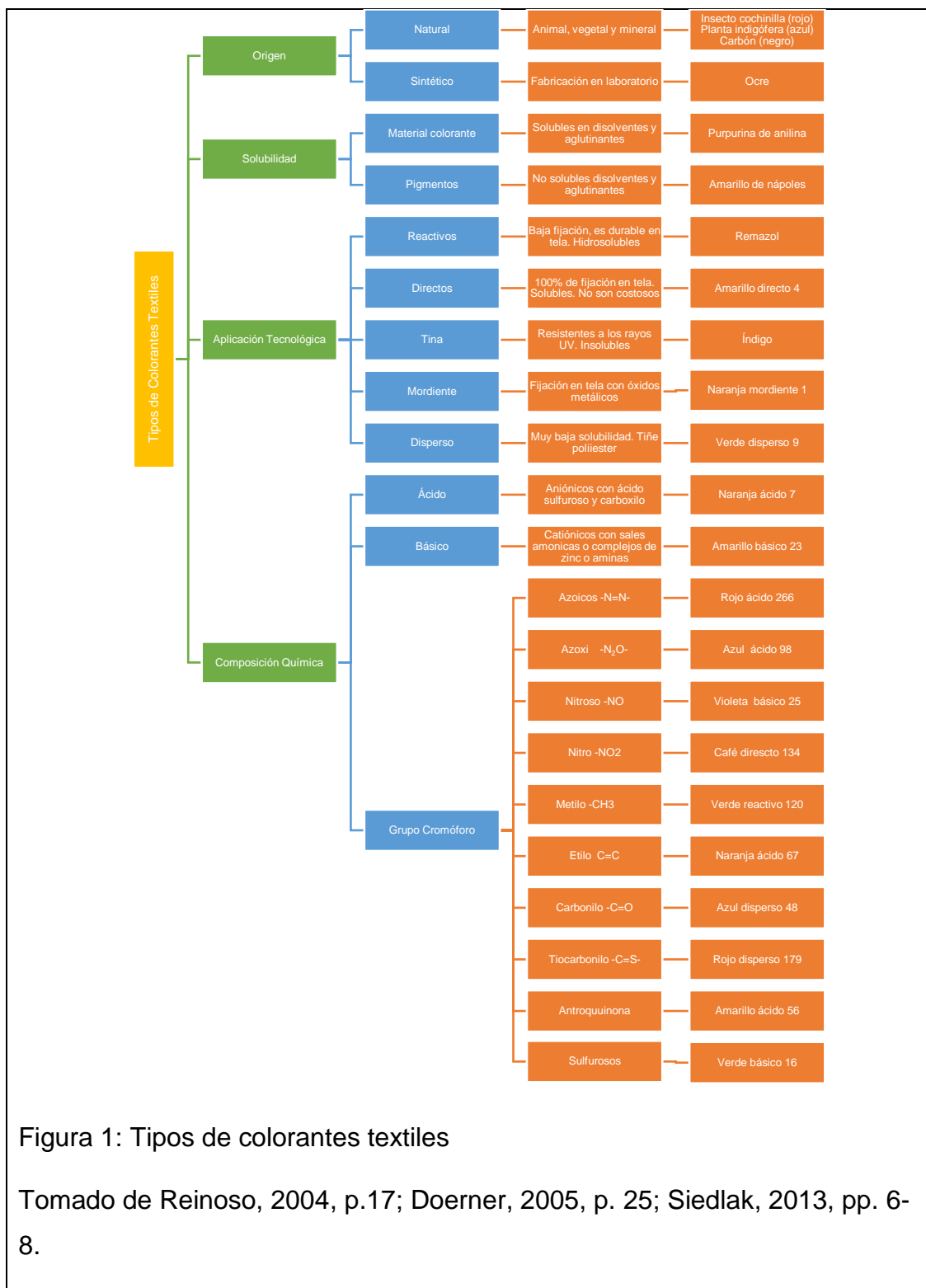
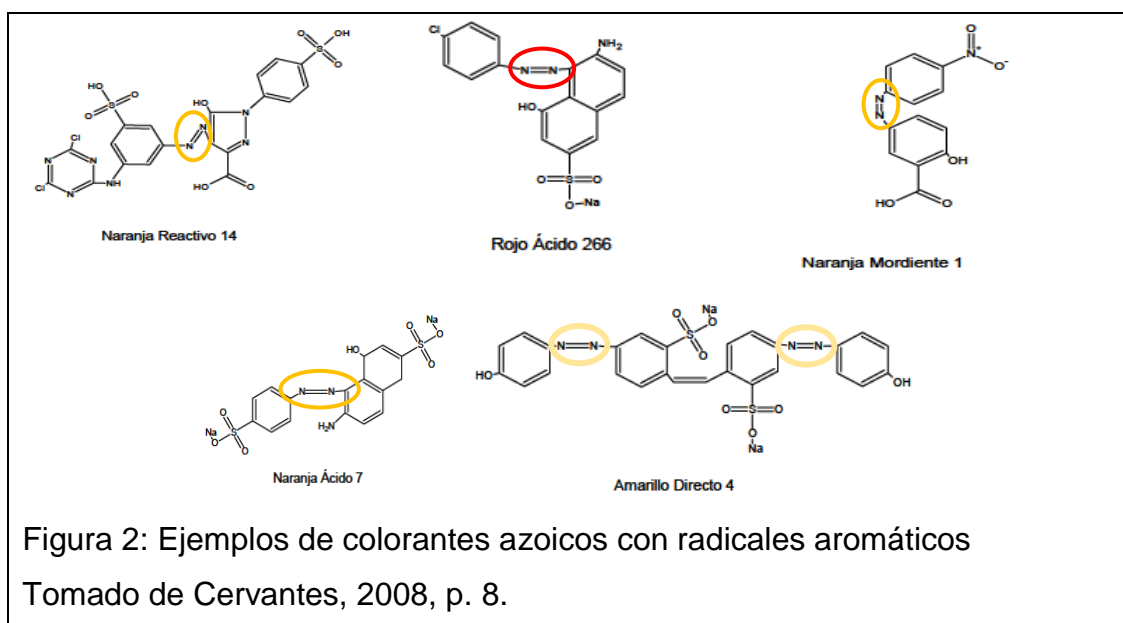


Figura 1: Tipos de colorantes textiles

Tomado de Reinoso, 2004, p.17; Doerner, 2005, p. 25; Siedlak, 2013, pp. 6-8.

Los colorantes azoicos se caracterizan por presentar en la estructura el grupo químico funcional cromóforo, azo -N=N-, es decir, la unión de dos moléculas de nitrógeno a través de enlaces covalentes dobles, junto a este dos radicales de

anillos aromáticos en cada extremo (Ruíz y Garcés, 2012, p. 34). En la Figura 2 se aprecia el grupo cromóforo azo en diferentes colorantes textiles como naranja reactivo 14, rojo ácido 266, naranja mordiente 1, naranja ácido 7 y amarillo directo 4.



Los colorantes azoicos y reactivos, manipulados en la industria, forman parte de las descargas textiles contaminantes que requieren de un estudio y análisis frente a la problemática ambiental que involucra la contaminación del agua con color y la eficiencia de los métodos en el tratamiento de los efluentes.

1.2. Impactos ambientales y afectaciones en la salud provocados por la contaminación del agua con colorantes de efluentes industriales textiles

La industria textil desempeña como actividades productivas, requirentes del uso de agua, a la generación de vapor, eliminación de impurezas y el acabado, esta última actividad abarca procesos de lavado, tisaje, desencolado, blanqueo, tintura, estampación y acabado (Maldonado y Molina, 2011, p. 17). De estos procesos se puede identificar como principales focos de contaminación con colorantes las actividades de tinción y estampado (Lee, Neefus, Strother y Niyogi, 2009, pp. 24 y 25).

La intensidad de color en el agua residual textil es variable, ya que mínimas cantidades de 10-50 mg.L⁻¹ son fácilmente visibles en agua y las concentraciones residuales de color tienen un valor promedio de 100-500mg.L⁻¹ (González y Escamilla, 2008, p. 18; Eslami, Moradi, Ghanbari y Mehdipour, 2013, pp. 39 y 40). Así también, debido a los metales pesados y compuestos orgánicos, específicamente los colorantes, las descargas son resistentes a la biodegradación, pues se ha demostrado que la relación DBO/DQO para un agua residual de textil tiene un dato de 0.35 (Grekova y Topalova, 2009, pp. 67-69; Sulaka y Yatmaz, 2012, p. 47). En la siguiente tabla se presentan otros parámetros de la calidad de agua en la industria textil considerados en el estudio de Advanced Oxidation Processes for Treatment of Textile and Dye Wastewater realizado en Dhanbad, India.

Tabla 1: Características típicas del agua residual de textiles

Parámetro	Rango contaminante
pH	6.0-10.0
DBO	100-4000 mg.L ⁻¹
DQO	150-50 000 mg.L ⁻¹
Temperatura	35-40 °C
Sólidos suspendidos totales	100-5000 mg.L ⁻¹
Sólidos disueltos totales	1800-6000 mg.L ⁻¹
Sodio	610-2175 mg.L ⁻¹
Nitrógeno	70-80 mg.L ⁻¹

Tomado de Kalra, Mohan, Sinha, y Singh, 2011, p. 271.

A escala mundial, la industria textil ha provocado la contaminación del agua por las descargas de efluentes con proporciones de 200 toneladas diarias, caracterizados por contener elevadas concentraciones de colorantes debido a que del 10 al 15% de estas sustancias no se impregnan fijamente a las fibras (Cui, Li, Zhao y Han, 2014, p. 478); por ejemplo los colorantes reactivos tienen una fijación en la fibra de menos del 70%, aumentando la carga contaminante (Jonnalagadda y Nadupalli, 2014, p. 609). Así también, el Programa de las

Naciones Unidas para el Medio Ambiente estableció que la industria textil moderna es responsable de verter 300-500 millones de toneladas con metales pesados, disolventes, lodos tóxicos y otros residuos en las aguas cada año (Roy, 2013, p. 112).

Una de las causas para esta contaminación se da porque no todas las industrias emplean eficientemente sus recursos, materias primas e insumos, generando efluentes altamente contaminantes y tóxicos (Moreno, et al., 2013, p. 12). Dependiendo del nivel de desarrollo industrial de cada país se tiene distintos grados de contaminación que para América Latina y otros continentes difieren de la composición y aplicación de los colorantes, sumado el consumo excesivo de agua de $70 \times 10^6 \text{ m}^3$ al año (Rao, Senthilkumar; Byrne y Feroz, 2013, pp. 341 y 342).

En Ecuador, de acuerdo a las cifras estadísticas aportadas por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) para el año 2012, pp. 26-34, las empresas han destinado el 34% del agua suministrada para procesos industriales y de estas unidades productivas, el 9% realiza el tratamiento de los efluentes previo a la descarga en el sistema de alcantarillado o hacia los cauces naturales bajo procesos primarios en un 50%, procesos primarios y secundarios con un 20% y la combinación de ambos más procesos terciarios en un 3%. De esta forma el 13% de la industria textil, correspondiente a la industria manufacturera, cuenta con técnicas de purificación para las aguas residuales generadas.

Un escenario de contaminación es el efluente descargado por la industria textil en los afluentes del río Patate en el cantón Pelileo, Ambato, Tungurahua, cauce donde se reportó valores de DQO de 880 mg.L^{-1} y coloración azul intenso (EL TELÉGRAFO, 2009); desde hace dos años existen 44 lavanderías de jeans en las industrias textiles donde se necesita entre 25 y 30 L.s^{-1} de agua para una producción diaria (EL TELÉGRAFO, 2013).

De acuerdo a las características de la carga contaminante de las textiles, los métodos son seleccionados, por ejemplo: elevada concentración de

compuestos no biodegradables se tratan con oxidación química; reducción de metales pesados, a través de precipitación química, coagulación y floculación (Ministerio del Ambiente, 2013, p. 26).

Las descargas contaminantes de la industria textil, por la baja biodegradabilidad de la carga orgánica refractante de los colorantes y la persistencia de estas sustancias, debido al tamaño de partícula con un diámetro de 100 nm, con el cual su tiempo requerido para una profundidad de asentamiento de 0,3 m. es de 230 días, modifican la composición físico-química del agua y alteran a su vez las condiciones naturales del medio acuático y la vida de los organismos que se relacionan a este recurso hídrico (Romero, 2009, p. 229; Soto, et al., 2011, p. 80). En la Tabla 2 se describen ejemplos de los problemas ambientales causados por los colorantes textiles.

Tabla 2: Aspectos ambientales provocados por los efluentes textiles

Factor biótico/abiótico	Aspecto ambiental	Consecuencia
Cauces naturales	Dispersión del colorante	Cambio de color
	Obstaculizar traspaso de rayos solares	Modificación de temperatura, reproducción de organismos y fotosíntesis
	Bioacumulación de metales y macromoléculas orgánicas	Biomagnificación de compuestos
	Exceso de nitrógeno	Disminución de oxígeno. Sobrepoblación de peces. Eutrofización.
Suelo	Disminución y/o pérdida de fertilidad	Suelos no productivos
Animales	Afectación proteínica, lipídica y de colesterol	Mal funcionamiento de los órganos: renales y reproductivos
Vegetales	Reducción de la germinación de las semillas	Retraso en el crecimiento y desarrollo vegetal

Tomado de Alvares, Diaper y Parsons, 2001, pp. 34-39; Mathur, Krishnatrey, Sharma y Sharma, 2003, pp. 12-19; Almeida, Assalin y Rosa, 2004, pp. 20 y 21; Kwon, et al., 2008, pp. 37-40; Rehman, Bhatti y Rehman, 2008, pp. 10-13; Martínez, Olivares, Lozada y Ramírez, 2010, p. 8; Unión Europea, 2011, p. 5; Arroyave, Rodríguez y Barón, 2012, p. 16.

A pesar que la mayoría de colorantes textiles no son directamente tóxicos para el ser humano, debido a que los tintes en el organismo tienen baja solubilidad y son metabolizados y/o excretados rápidamente, el consumo de agua contaminada con tintes causa intoxicación dependiendo del tratamiento de oxidación empleado en la industria textil, pues la oxidación incompleta de colorantes genera aminas aromáticas. (Mencías y Mayero, 2000, pp. 15 y 16; Tinoco, Campos, Sánchez, Salvador, Reyma y Medina, 2010, p. 7). De los colorantes azoicos 3000 están catalogados como cancerígenos, pues al ser descompuestos producen aminas aromáticas responsables de la enfermedad (Grekova y Topaloca, 2009, p. 24). En la Tabla 3 se detallan colorantes considerados como sustancias nocivas y/o tóxicas.

Tabla 3: Efectos toxicológicos de los colorantes azoicos textiles.

Colorante	Composición química	Efecto
Pigmentos metálicos	Iones metálicos de Cr, Hg, Pb, As	Problemas neurológicos, hepáticos y renales
Rojo ácido 85	$C_{35}H_{26}N_4O_{10}S_3 \cdot 2Na$	Cáncer
Café básico 4	$C_{21}H_{24}N_8 \cdot 2 Cl-H$	Cáncer
Azul directo 14	$C_{34}H_{28}N_6O_{14}S_4 \cdot 4Na$	Cáncer
Naranja disperso 1	$C_{18}H_{14}N_4O_2$	Alergias
Indulina	$C_{12}H_{11}N_3$	Cáncer, narcosis, irritabilidad, euforia, descoordinación

Tomado de Serrano y Zárate, 2012, p. 5; Levi Straus & Co, 2014; Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud, 2014.

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado, para el ambiente y la salud, el sector industrial textil purifica las aguas residuales generadas, bajo diversos procesos de tratamiento, seleccionados de acuerdo a la carga contaminante como por ejemplo: la variabilidad de demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), color, sólidos suspendidos, metales, pH, carbono (C), nitrógeno (N) o sales.

1.3. Tratamientos usados en aguas residuales industriales de textiles

En el área industrial textil, se manejan varias técnicas para el tratamiento de los colorantes en las aguas residuales. Entre estas, las más comunes son coagulación-floculación, intercambio iónico, adsorción con carbón activado y métodos biológicos (Moreno, et al., 2013, p. 9). En la Tabla 4 se describen las características de estos tratamientos, físicos, químicos y biológicos para el agua contaminada con colorantes textiles.

Tabla 4: Tratamientos para aguas residuales de industria textil.

Tratamiento	Proceso	Mecanismo	Ventaja	Desventaja
Físico	Coagulación-floculación	Agregación de coagulantes y floculantes para la atracción y desestabilización de partículas en suspensión	Alta eficiencia en la remoción (85-95%)	Sales de hierro costosas Generación de lodos
	Intercambio iónico	Transferencia de iones de un fluido a un sólido por medio de resinas	No hay pérdida de adsorbente. 80-85%	Costo elevado
	Adsorción	Remoción de contaminantes a través de superficies sólidas como carbón activado	Remoción óptima con valores de 90-96%	Tiempo de remoción es prolongado
Químicos	Procesos avanzados de oxidación (PAO)	Procesos que se caracterizan por modificar la composición química de los contaminantes por acción de oxidantes fuertes	Eficiencia superior del 80% en remover: materia orgánica, metales, fenoles, nitrógeno, fósforo y especialmente colorantes	Alto costo de aplicación
Métodos biológicos	Aerobio y anaerobio	Degradación orgánica por microorganismos con liberación de CO ₂ , H ₂ O, nitratos, etc. Ej.: filtros biológicos, lagunas de estabilización y lodos activados.	Económico Mayor eficiencia (35-50%) en condiciones anaerobia por ejemplo <i>Clostridium</i> sp. y <i>Eubacterium</i> sp.	No son eficientes métodos aerobios para colorantes no biodegradables Mayor tiempo (23 días), mayor eficiencia

Tomado de: Barbusiński, 2005, pp. 8-11; López, Moreira, Feijoo y Lema, 2007, pp. 20-25; Benatti y Tavares, 2012, pp. 12-29.

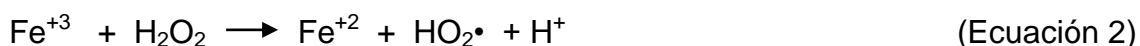
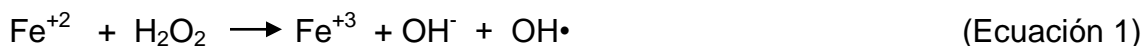
De todos los tratamientos existentes, aquellos que optimizan el proceso de depuración de colorantes, debido a la gran estabilidad de las sustancias

naturales o sintéticas no biodegradables, son los tratamientos avanzados de oxidación como por ejemplo ozonización, oxidación electroquímica, tratamiento con haces de electrones, entre otros.

1.4. Reacción Fenton para el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes

La Reacción de Fenton, como método no fotoquímico es capaz de oxidar materia orgánica, por ejemplo los ácidos tartárico y málico, que en sus inicios, a finales del siglo XIX, fueron los primeros compuestos orgánicos que H.J.H. Fenton logró descomponer (Litter, 2001, pp. 4-5). De forma general el reactivo es capaz de degradar compuestos como alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, PCP, fenoles, fenoles clorados, octacloro-p-dioxina y formaldehído, herbicidas, hexadecano o dieldrin y solventes para limpieza; sin embargo, no es efectivo en compuestos como acetona, ácido acético, ácido oxálico, parafinas y compuestos organoclorados (Domènetch, Jardim y Litter, 2012, pp. 18-19).

La reacción se basa en la formación de radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) por la adición de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) a las sales metálicas de hierro, en disolución por transferencia de electrones (Salas, 2010, p. 3). En las siguientes ecuaciones se observa la reacción correspondiente al reactivo Fenton (Gamarra y Gómez, 2014, p. 15).



Un factor primordial a tomar en cuenta es el agente oxidante, pues este determinará la velocidad de oxidación y por tanto de remoción de los

contaminantes dentro del proceso (Martínez, *et al.*, 2010). Como se puede observar en la Tabla 5, el radical hidroxilo se considera el segundo compuesto con potencial de oxidación más fuerte.

Tabla 5: Agentes oxidantes y potencial de oxidación

Agente Oxidante	E° (V,25°C)
Flúor	3,03
Radical hidroxilo	2,80
Ozono	2,07
Peróxido de Hidrógeno	1,78
Radical Perhidroxilo	1,70
Permanganato de Potasio	1,68
Dióxido de cloro	1,57
Cloro	1,36

Tomado de Doménech, *et al.*, 2006; Muñoz, 2011.

Otros factores que intervienen en la eficacia de la reacción son el potencial de hidrógeno, relación Fe (II)/H₂O₂, temperatura. Para lo cual las condiciones de cada uno son (Sundararaman, Ramamurthi y Partha, 2009, p. 21; Aliaga, 2010, pp. 35-36):

- Potencial de hidrógeno: las condiciones óptimas de este parámetro son ácidas, es decir desde 3, para que la reacción sea rápida,
- Relación Fe II/(H₂O₂): las concentraciones de ambos reactivos es indispensable, se sugiere el exceso de peróxido de hidrógeno, más no de hierro por la posible precipitación.
- Temperatura: es importante para prevenir la descomposición del H₂O₂. Lo recomendable es de 25 a 45°C, pues grados superiores lo transforman en agua y oxígeno.

El proceso de Fenton ha sido modificado para una mayor eficiencia a través de catalizadores como luz, electricidad, sonido; por lo tanto se tienen diversos tipos de tratamientos como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6: Modificaciones del Proceso Fenton

Proceso	Mecanismo	Aplicaciones
Foto-Fenton	Aplicación de rayos UV con formación de CO_2 y H_2O . Se emplean luz solar o artificial de lámparas de mercurio, xenón de arco de alta presión.	Agua residual industrial.
Electro-Fenton	Corriente eléctrica destruye los contaminantes	Lixiviados de vertederos, efluentes de curtiembre y con colorantes
Sono-Fenton	Ondas ultrasonoras con frecuencia de 15 kHz y 10 MHz a través de transductores para generar burbujas, el colapso de estas más vibración produce radicales hidroxilos e hidróxidos	Recomendado en caudales pequeños (concentraciones menores a 1g.L^{-1}) con fenoles, plaguicidas, cianuros, iones metálicos.

Tomado de Ramos y Ramos, 2005, p. 76; Quintero y Cardona, 2009, p. 23; González, et al., 2010, pp. 14 y 15.

Desde hace 5 años, se han realizado estudios sobre el uso de peroxidasas de origen vegetal como enzimas y catalizadores en la reacción de Fenton, por ejemplo las enzimas más comunes provienen de plantas de la familia *Brassicaceae* como el rábano picante y *Asteraceae* como la alcachofa con rendimiento del 96.51% en la degradación oxidativa de contaminantes orgánicos (Ambatkar y Mukundan, 2014, pp. 2).

En México, a nivel industrial, se ha empleado el Reactivo Fenton para remoción del colorante azul índigo en aguas residuales textiles, teniendo eficiencias del 70-99% en DQO, turbidez, SST, ion hierro y masa de lodos (Godínez y Bernal, 2014, pp. 19-22). El proceso de Fenton también es factible en la industria de alimentos, por ejemplo a escala piloto se utilizó la reacción de Fenton para

aguas residuales con colorante Tartrazina con eficiencias de hasta el 99% con ion férrico (Rojas, Giraldo y Trujillo, 2009, p. 18). La aplicación del Reactivo Fenton y luz ultravioleta en el tratamiento de colorante azo, naranja II, de aguas residuales textiles resulta igualmente eficiente con porcentajes próximos a 100 en tiempos de reacción de 60 minutos (Frutos, Manzano y Quiroga, 2012, p. 27). La degradación de colorantes azoicos de efluentes textiles a través de foto Fenton es viable, pues la remoción de sustancias recalcitrantes del agua como rojo ácido 151, naranja ácido 7 y azul ácido 113 se obtuvo del 98% con H_2O_2 y Fe^{+3} (García, Trevilla y Buitrón, 2010, pp. 8 y 9). La descoloración del colorante ácido rojo 88 de las aguas residuales textiles se ha comprobado bajo el proceso de Fenton con lámparas UV y zeolita con 100% de remoción (Ohura, Harada, Shiki, Kawakita y Biswas, 2012, p. 4).

El proceso de Fenton es efectivo para la descontaminación de colorantes debido a los procesos de oxidación que se generan, pues eliminar estas sustancias a través de mecanismos de reducción, producen aminas aromáticas tóxicas. Emplear esta tecnología avanzada de oxidación permitirá reducir la concentración de colorantes, toxicidad del agua y los posibles impactos ambientales que repercuten por la contaminación industrial textil.

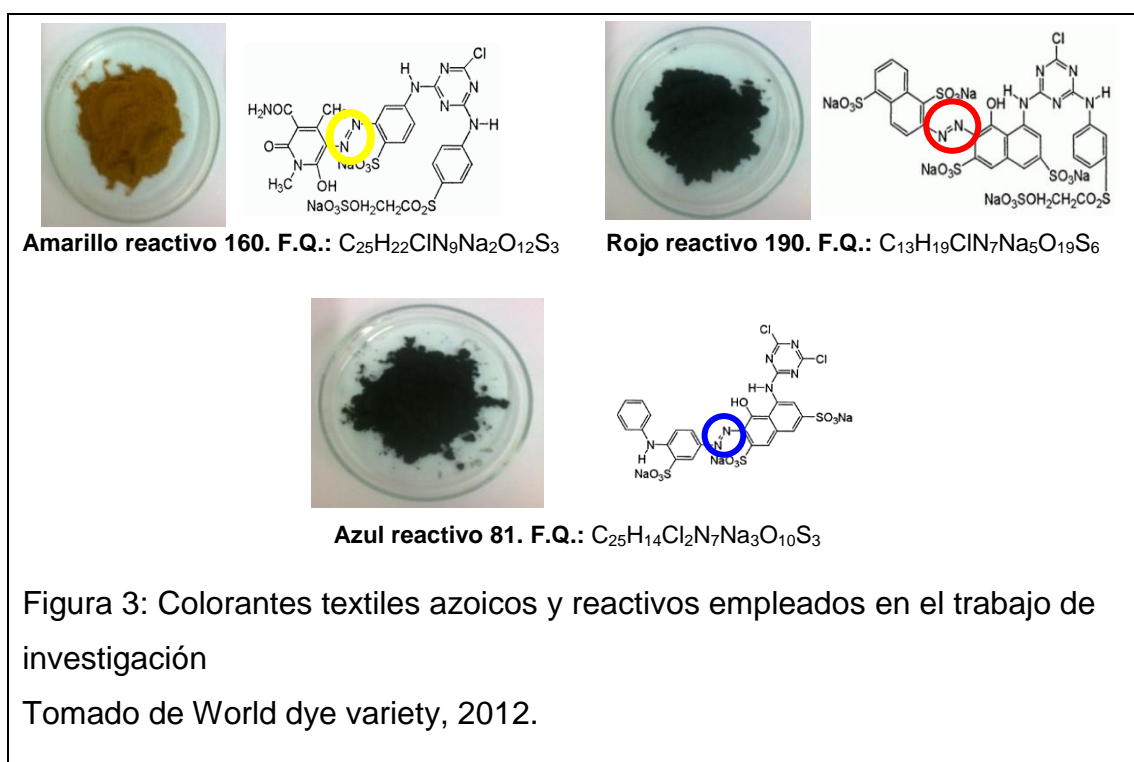
1.5. Marco Legal nacional para el cumplimiento de descarga de efluentes contaminados

La República del Ecuador tiene como normativas ambientales respecto al control y prevención de la contaminación del recurso agua, las siguientes: Constitución del Ecuador 2008, Art. 14 y 411. Ley de Gestión Ambiental, Art. 12. Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, Art.16. Decreto Ejecutivo N°3516 Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente, Art. 41-43 y 92, 95. Acuerdo Ministerial 061 Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria 2015, Art. 209 y 211. Acuerdo Ministerial 026 Registro de Generadores de Desechos Peligrosos (ver anexo 1). Norma Técnica de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes: Recurso Agua, Libro VI, Anexo 1: Tabla 11,12 y 13.

2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Preparación de la muestra sintética de agua residual industrial textil

El agua de la industria textil se caracteriza por presentar contaminantes orgánicos e inorgánicos. El enfoque de esta investigación se aplica para el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes textiles a escala de laboratorio, por lo tanto, la muestra sintética de agua se elaboró con colorantes azoicos industriales como: amarillo reactivo 160, rojo reactivo 190 y azul reactivo 81; obtenidos en la empresa Aromcolor S.A. de Quito, Ecuador. La estructura química con el grupo azoico (-N=N-) de estos colorantes se presenta en la Figura 3.



Para el presente trabajo de titulación, se preparó una muestra residual de 1 L distribuida en 4 vasos de precipitación de 600 mL, la cual contiene la mezcla de los tres colorantes. La concentración de los colorantes fue constante 1.1 g.L^{-1} para cada uno, es decir, una concentración total de color de 3.3 g.L^{-1} , valor pesado en una balanza analítica (OHAUS, AR2140, Colombia), más 1000 mL

de agua, mezclados manualmente con un agitador de vidrio para homogenizar la muestra sintética, adaptada a diferentes pH como ácido 3.5, neutro 7.0 y básico 9.0 en un potenciómetro, utilizando ácido nítrico concentrado e hidróxido de sodio 2M.

2.2. Cálculo de la dosis de reactivo Fenton

La dosificación de Fenton se reporta como una relación molar de hierro (II) y peróxido de hidrógeno al 30%. Por ejemplo una relación molar 1:5 significa que por cada mol de hierro (II) existen 5 moles de peróxido de hidrógeno al 30% en el medio de tratamiento. A continuación, se presentan los cálculos de transformación para su respectiva dosificación.

2.2.1. Cálculo de la dosis de peróxido de hidrógeno al 30%

La dosis del peróxido de hidrógeno al 30% se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación tomada del método realizado por Rodríguez en 2010 sobre Oxidación Avanzada – Sistema Fenton – En Tratamiento de Efluentes Industriales de Alta Carga Orgánica.

$$H_2O_2 \left[\frac{mL}{L} \right] = \frac{DQO \left[\frac{mgO_2}{L} \right]}{141,2 \frac{mgO_2}{mLH_2O_2}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$H_2O_2 \left[\frac{mL}{L} \right] = \frac{1719 \left[\frac{mgO_2}{L} \right]}{141,2 \frac{mgO_2}{mLH_2O_2}}$$

$$H_2O_2 = 12.174 \left[\frac{mL}{L} \right]$$

Para el cálculo del volumen de peróxido de hidrógeno a adicionar al medio de reacción fue necesario obtener el valor del DQO inicial. Según la caracterización del agua residual sintética el DQO tiene un valor de 1719 mg.L⁻¹. A partir de este dato se aplicó la Ecuación 6, y por tanto la dosis de peróxido de hidrógeno a utilizar en el medio de tratamiento fue de 12,174 mL.L⁻¹. Es decir, por cada litro de agua residual, se adicionaron 12,174 mL de peróxido de hidrógeno al 30%. No obstante, las unidades experimentales en el presente proyecto fueron de 250 mL; por tanto se adicionaron 3,04 mL de peróxido de

hidrógeno al 30% por cada unidad de tratamiento (vaso de precipitación de 250 mL).

2.2.2. Determinación de las dosis de sulfato ferroso heptahidratado al 99,5%

La dosis de sulfato ferroso heptahidratado fue calculada en un rango molar de 1:1 a 1:80 para lo cual, se utilizó la relación Fe^{+2}/H_2O_2 . Es decir, se trabajó con el concepto de que el peróxido de hidrógeno es el reactivo en exceso, mientras que el sulfato ferroso el reactivo limitante. Primero, se obtuvo la relación entre pesos moleculares del sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno. Luego se multiplicó esta relación de pesos moleculares con la relación molar propuesta en el estudio entre 1:1 hasta 1:80 según la Tabla 7. Este cálculo transforma la relación molar en una relación másica. Pero debido a que el peróxido de hidrógeno es líquido, entonces se multiplica esta relación por la densidad del peróxido de hidrógeno al 30% ($1,1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Luego, este factor se multiplica por el volumen de peróxido de hidrógeno calculado en la sección 2.2.1., tomando en cuenta la cuarta parte del peso obtenido, como pauta de la optimización de la dosis final.

Un ejemplo de esta relación es 1:5 moles, con la cual se obtiene una dosis de 1,3672 g, siguiendo cada una de las ecuaciones continuas se tiene la secuencia de cálculo siguiente.

$$\frac{1 \text{ mol } FeSO_4 \cdot 7H_2O}{5 \text{ moles } H_2O_2} * \frac{278,2 \text{ g } FeSO_4 \cdot 7H_2O}{1 \text{ mol } FeSO_4 \cdot 7H_2O} * \frac{1 \text{ mol } H_2O_2}{34 \text{ g } H_2O_2} * \frac{1,1 \text{ g } H_2O_2}{1 \text{ mL } H_2O_2} * \frac{3,04 \text{ mL}}{4} = 1,3672 \text{ g } FeSO_4 \cdot 7H_2O$$

(Ecuación 8)

Tabla 7: Relaciones molares de $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$

Relación molar $\text{Fe(II)}: \text{H}_2\text{O}_2$	Relación de pesos moleculares	Densidad de peróxido de hidrógeno 30%, $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	Dosis de peróxido de hidrógeno 30% (sección 2.2.1), mL	Factor de optimización	Cantidad de sulfato ferroso a adicionar, g
1:1	8,18	1,1	3,04	0,25	6,8360
1:5	8,18	1,1	3,04	0,25	1,3672
1:10	8,18	1,1	3,04	0,25	0,6836
1:15	8,18	1,1	3,04	0,25	0,4557
1:20	8,18	1,1	3,04	0,25	0,3418
1:25	8,18	1,1	3,04	0,25	0,2734
1:30	8,18	1,1	3,04	0,25	0,2279
1:40	8,18	1,1	3,04	0,25	0,1709
1:50	8,18	1,1	3,04	0,25	0,1367
1:60	8,18	1,1	3,04	0,25	0,1139
1:70	8,18	1,1	3,04	0,25	0,0977
1:80	8,18	1,1	3,04	0,25	0,0855

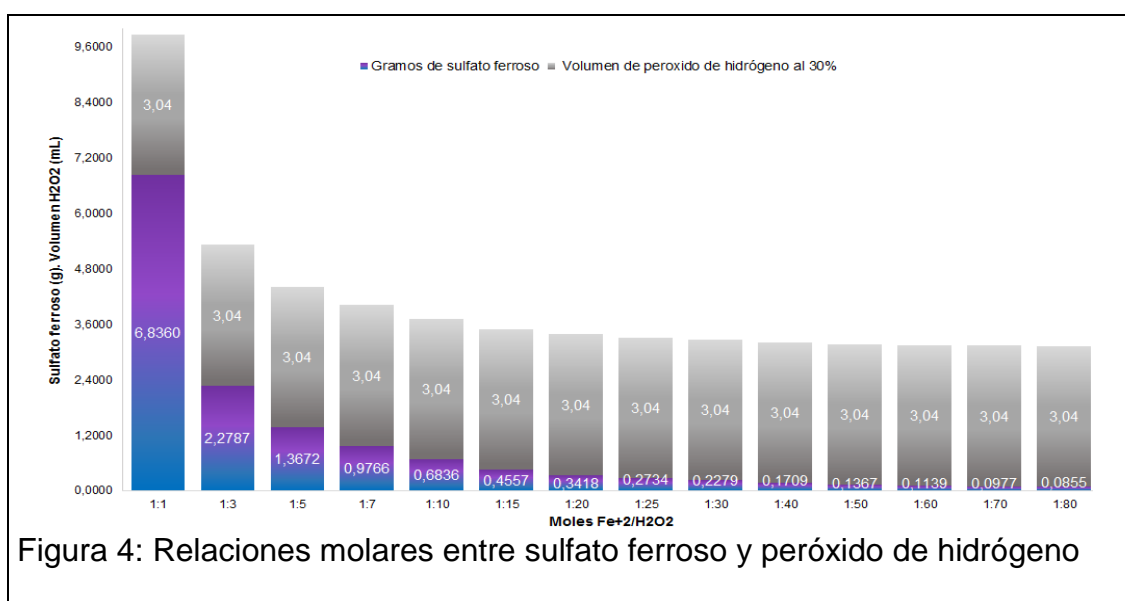
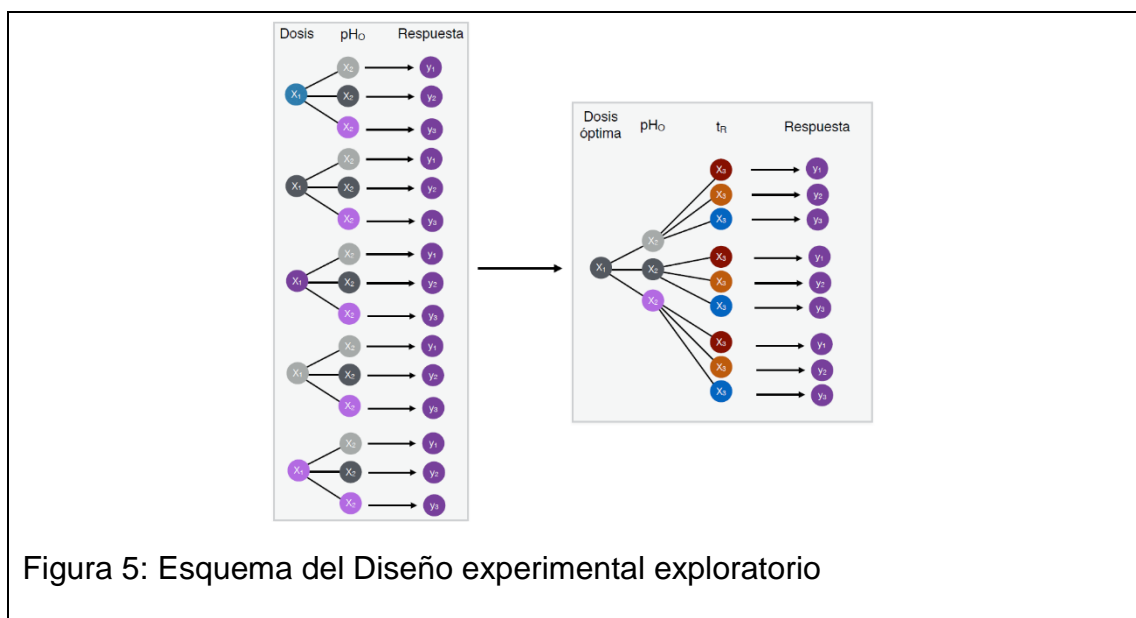


Figura 4: Relaciones molares entre sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno

A través de estos cálculos químicos fue posible la preparación final del agua sintética con colorantes de la industria textil. El siguiente paso fue elaborar un diseño experimental con variables independientes y sus respectivas respuestas.

2.3. Desarrollo del diseño experimental exploratorio (DEE)

En el presente trabajo de titulación se desarrolló un diseño experimental exploratorio (DEE) para determinar la dosis óptima del reactivo Fenton en función del cambio de coloración y cambio de potencial de óxido-reducción (ORP). El DEE se utilizó para la evaluación de la influencia de las variables operacionales (dosis de reactivo Fenton, pH, tiempo) en la remediación mediante oxidación. En la Figura 5, en el primer recuadro de la izquierda, se presenta el DEE en donde X_1 representa la dosis de reactivo Fenton, X_2 el pH inicial y la respuesta representada por y . El recuadro de la derecha, con tres variables, X_1 dosis de reactivo Fenton, X_2 pH inicial, X_3 tiempo de reposo, representa que del primer experimento se seleccionaron los mejores rangos de oxidación para luego optimizar las dosis en otra experimentación.



Tomando en cuenta el primer recuadro de la Figura 5 se experimentaron 12 dosis diferentes de reactivo Fenton (Tabla 8). De estas dosis, se determinaron las más efectivas (Tabla 9), y posteriormente se seleccionaron los rangos más

óptimos. A partir de los resultados más representativos de la primera experimentación, se eligieron tres variables: dosis de reactivo Fenton, pH inicial y tiempo de reposo. Se experimentaron 4 tratamientos con el objetivo de optimizar la dosis de reactivo Fenton (Tabla 9). La respuesta del diseño correspondió al potencial de óxido-reducción (ORP), pH final, turbidez (NTU), color y absorbancia.

Tabla 8: Matriz de las variables independientes y respuestas de los tratamientos con reactivo Fenton

Variables Independientes				Constante	Respuestas			
X1	X2			X3	y1	y2	y3	y4
Dosis	pH inicial			Tiempo de reposo (h)	ORP (mV)	pH final	Turbidez (NTU)	Color (L,a,b)
1:1	3,5	7,0	9,0	24	y_{11}	y_{21}	y_{31}	y_{41}
1:5	3,5	7,0	9,0	24	y_{12}	y_{22}	y_{32}	y_{42}
1:10	3,5	7,0	9,0	24	y_{13}	y_{23}	y_{33}	y_{43}
1:15	3,5	7,0	9,0	24	y_{14}	y_{24}	y_{34}	y_{44}
1:20	3,5	7,0	9,0	24	y_{15}	y_{25}	y_{35}	y_{45}
1:25	3,5	7,0	9,0	24	y_{16}	y_{26}	y_{36}	y_{46}
1:30	3,5	7,0	9,0	24	y_{17}	y_{27}	y_{37}	y_{47}
1:40	3,5	7,0	9,0	24	y_{18}	y_{28}	y_{38}	y_{48}
1:50	3,5	7,0	9,0	24	y_{19}	y_{29}	y_{31}	y_{49}
1:60	3,5	7,0	9,0	24	y_{110}	y_{210}	y_{310}	y_{410}
1:70	3,5	7,0	9,0	24	y_{111}	y_{211}	y_{311}	y_{411}
1:80	3,5	7,0	9,0	24	y_{112}	y_{212}	y_{312}	y_{412}

Se realizaron 12 tratamientos con sus respectivas variables independientes, con los cuales se evaluó un conjunto experimental óptimo acorde a las

respuestas a través de 4 tratamientos, como lo demuestra la Tabla 9. Mediante este diseño fue posible estudiar las variables de forma cuantitativa y reconocer la relación dependiente e independiente de las variables, de tal forma que el proceso de remediación proporcionó óptimos resultados.

Tabla 9: Agrupación experimental óptima del DEE

Variables Independientes				Constante			Respuestas				
X1	X2			X3			y1	y2	y3	y4	y5
Dosis	pH inicial			Tiempo de reposo (h)			ORP (mV)	pH final	Turbidez (NTU)	Color (L,a,b)	Análisis químico
1:a	3,5	7	9	3	6	24	y_{11}	y_{21}	y_{31}	y_{41}	y_{51}
1:b	3,5	7	9	3	6	24	y_{12}	y_{22}	y_{32}	y_{42}	y_{52}
1:c	3,5	7	9	3	6	24	y_{13}	y_{23}	y_{33}	y_{43}	y_{53}
1:d	3,5	7	9	3	6	24	y_{14}	y_{24}	y_{34}	y_{44}	y_{54}

Para realizar el proceso mediante el DEE fue indispensable caracterizar la muestra sintética para conocer la calidad de agua inicial y final.

2.4. Parámetros de caracterización físico-química del agua residual sintética de textil

El efluente residual representa la carga contaminante de la industria textil, con la cual se evaluó los siguientes parámetros de calidad mediante las respectivas técnicas de medición (Villegas, 2007; Romero, 2009):

- **pH:** medido en el potenciómetro a través del método potenciométrico (HANNA instrument, HI 2550, U.S.A) con un electrodo de vidrio para verificar la diferencia de potencial entre dos electrodos sensibles a los iones de hidrógeno.
- **Temperatura:** medida con un termómetro de mercurio de vidrio, bajo el método de termometría en grados Celsius en una escala del 1-100. Se coloca el termómetro dentro de la muestra y se observa por 1 minuto

aproximadamente, el grado de ascenso o descenso del líquido mercurio correspondiente a los grados Celsius.

- ✓ **Potencial de óxido-reducción (ORP):** medido en un potenciómetro (HANNA instrument, HI 2550, U.S.A) por el método de tensión Redox, empleando un electrodo de metal y metales nobles para medir el intercambio de electrones entre las sustancias, equivalente a una tensión eléctrica, es decir la presencia de sustancias oxidantes o reductoras. La medida es expresada en mV. Un valor positivo de ORP, significa la presencia de sustancias con carácter oxidativo y un valor negativo refleja un carácter de reducción. En el siguiente trabajo de titulación se evaluó la calidad del agua tratada a través de la relación entre el ORP del agua tratada y el ORP del agua pura tipo I. Esta relación se la denomina como índice ORP. El cálculo del índice se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{índice de ORP} = \frac{\text{ORP de la muestra tratada}}{\text{ORP del agua ultra-pura tipo I}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

La interpretación del índice ORP indica que un dato igual o cerca de 1, el agua tratada tiene una calidad de agua próxima al agua ultra-pura tipo I.

- **Turbidez:** este parámetro físico se mide a través de un nefelómetro o turbidímetro (HANNA instrument, HI 88713, U.S.A), mediante el cual se puede medir las Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) en una muestra de agua, cuando un haz de luz la atraviesa, midiendo la intensidad de la luz dispersada a 90 grados, esto indica la transparencia del agua y/o la presencia o ausencia de partículas en suspensión.
- **Color:** este parámetro se determinó por el método colorimétrico CIE $L^*a^*b^*$ 1976 establecido por la *Comisión Internationale d'Éclairage*, Comisión Internacional de la Iluminación. Para establecer el color se emplearon coordenadas en tres dimensiones en un Gráfico de color de CIELab (ver anexo 2). Estos puntos corresponden a Luminosidad (eje L) desde el valor 0 (negro), valor 100 (blanco) y valores intermedios

diferentes grises; eje +a color rojo y eje -a verde; por último el eje +b color amarillo y el -b color azul. Mediante el uso de EasyRGB Color calculator de 2014, una técnica programación de color con 10° (1964) como observador, es posible fácilmente reconocer el color de las muestras (ver anexo 3).

- **Demanda Química de Oxígeno:** este parámetro químico se determinó con fotométrica del decrecimiento de la concentración de cromato luego de la oxidación de materia orgánica con dicromato (VII) de potasio, ácido sulfúrico, y sulfato de plata-mercurio (Nanocolor, Macherey-Nagel COD Ref. 985 023 y 985 027). En un tubo de reacción, se agregaron 1 o 2 mL de muestra de agua residual sin filtrar, según el rango de prueba empleado de 1.00-10.00g.L⁻¹ o 2-40mg.L⁻¹, respectivamente. Luego de agitar verticalmente hasta completa disolución, se colocó el tubo de ensayo en el digestor (Nanocolor VARIO compact, Macherey-Nagel, Alemania) a una temperatura de 148 °C durante 2horas o 160 °C durante 30 min, dependiendo del ensayo. Después de esta reacción, el tubo de ensayo se agitó hasta disolución completa y se enfrió hasta temperatura ambiente 20-25°C. El tubo de ensayo se llevó al fotómetro (Macherey-Nagel, Alemania) y se midió a una longitud de onda de 620 nm la concentración de demanda química de oxígeno en mg.L⁻¹.
- **Absorbancia:** medida por el método de espectroscopía ultravioleta visible mediante el uso de un espectrofotómetro UV/Vis (Macherey-Nagel, Alemania). Para esta medición se colocó en un tubo de ensayo de vidrio un volumen de 10 mL de muestra y se programó el espectrofotómetro para la opción *screening* (barrido) a una longitud de onda entre 190 a 1100 nm.

2.5 Remediación del agua bajo el proceso de oxidación avanzada del Reactivo Fenton

La remediación se realizó en un equipo para prueba de jarras (VELP, SCIENTIFIC, JLTG, España) a una velocidad y tiempo de mezcla constantes de 300 rpm y 45 minutos. Se utilizaron volúmenes de agua residual sintética

de 250 mL. Luego de tiempos de reposo entre 3 a 24 horas con exposición solar de aproximadamente 30397.33 lux medido en un luxómetro (SPER SCIENTIFIC, 850007, U.S.A), se filtraron las muestras con una bomba de vacío (Gast Manufacturing, DOA-P704 shown, U.S.A, 2002) y papel filtrante de 0,5 μm (Microclar, Argentina). Luego, se tomaron muestras de 15 mL en tubos de ensayo para su respectiva caracterización. Los tiempos de reposo para la toma de resultados fueron 3, 6 y 24 horas. La temperatura inicial fue de 40 °C, como se observa en la Figura 6.

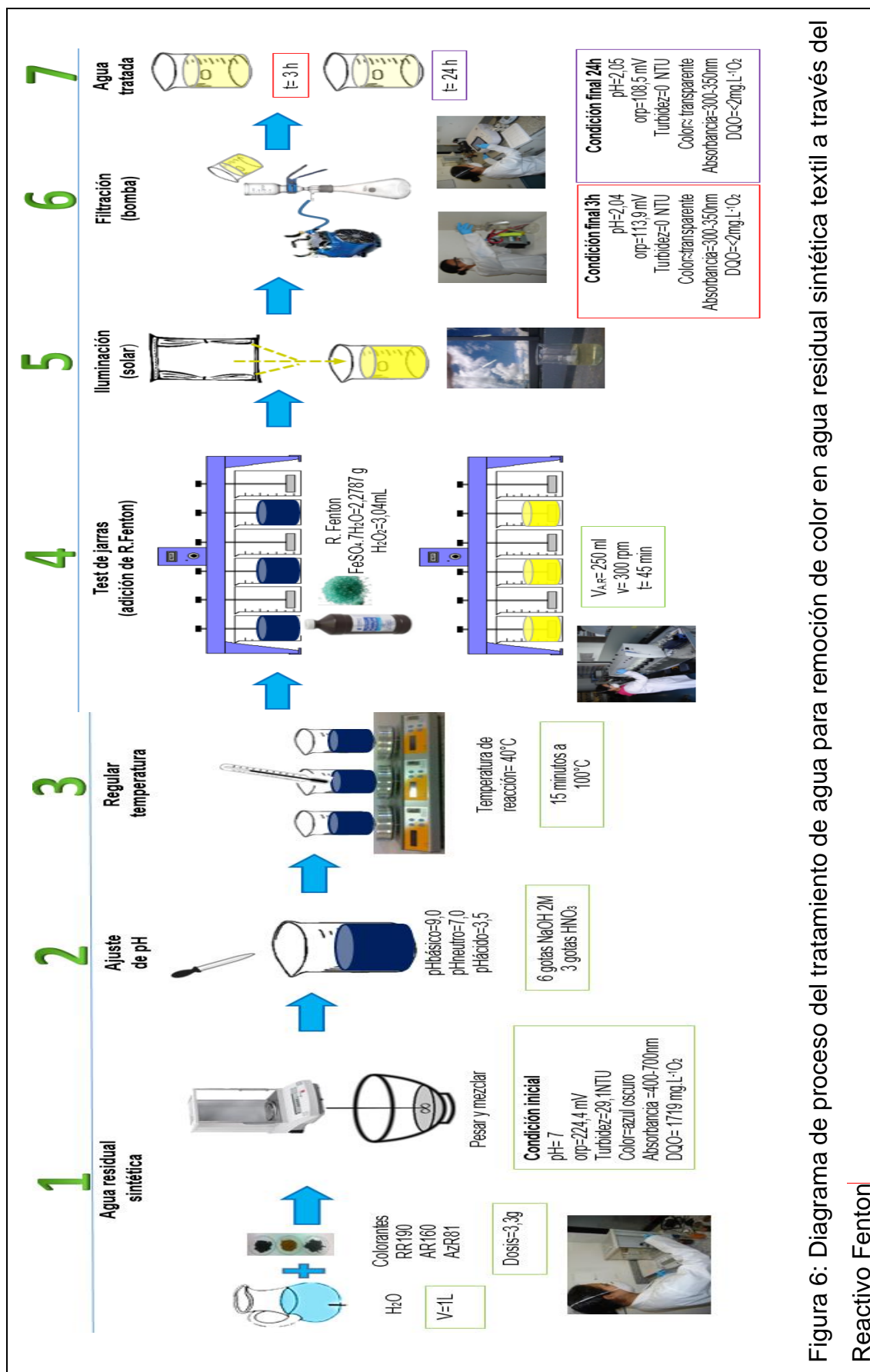


Figura 6: Diagrama de proceso del tratamiento de agua para remoción de color en agua residual sintética textil a través del Reactivo Fenton

En la Tabla 10 se presentan las dosis de los tratamientos utilizados bajo un diseño experimental exploratorio.

Tabla 10: Dosis de sulfato ferroso heptahidratado (Panreac, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 99.5%, España) (ver anexo 4) para 16 tratamientos con Reactivo Fenton

Tratamiento	Relación molar	Cantidad de sulfato ferroso, g	Volumen de peróxido de hidrógeno al 30% mL
1	1:1	6,8360	3,04
2	1:5	1,3672	
3	1:10	0,6836	
4	1:15	0,4557	
5	1:20	0,3418	
6	1:25	0,2734	
7	1:30	0,2279	
8	1:40	0,1709	
9	1:50	0,1367	
10	1:60	0,1139	
11	1:70	0,0977	
12	1:80	0,0855	
Optimización de la Dosis			
1a	1:3	2,2787	3,04
2b	1:5	1,3672	
3c	1:7	0,9766	
4d	1:10	0,6836	

La eficiencia de emplear el Reactivo Fenton en la remoción de colorantes textiles del agua se comprobó a través del porcentaje de remoción de los parámetros indicados anteriormente como turbidez y DQO, por medio de la ecuación siguiente:

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{\text{valor inicial} - \text{valor final}}{\text{valor inicial}} * 100 \quad (\text{Ecuación 10})$$

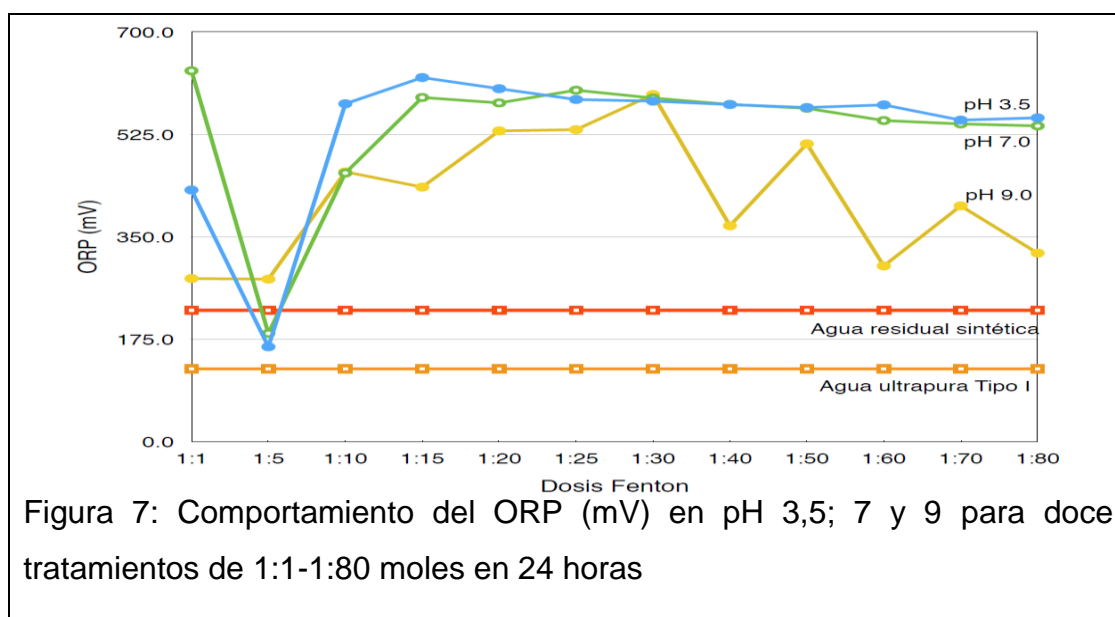
Además, se experimentó tratamientos de oxidación con cloro (Clorox, Hipoclorito de sodio 3,5%, Ecuador) y peróxido de hidrógeno (Fisher Scientific, H₂O₂ 30%, Netherland). Los tratamientos con cloro y peróxido de hidrógeno se desarrollaron bajo las mismas variables y constantes de experimentación; es decir, como a temperatura de 40°C, velocidad de mezcla 300 rpm a 45 minutos en el test de jarras y dosis del H₂O₂ y NaClO de 3,04 mL. Las variables pH se mantuvieron de 3,5; 7,0 y 9,0. La eficiencia de los tres tratamientos se evaluó con la ecuación 9 del porcentaje de remoción en un periodo de muestreo de 3, 6 y 24 horas. Frecuencia de tiempo en la cual se obtuvieron resultados comparativos.

3. CAPÍTULO III: RESULTADOS

Los resultados de la remediación de agua residual contaminada con colorantes reactivos se presentan a continuación.

En la Figura 7 se observan los resultados de óxido-reducción del agua tratada a través del ORP para rangos molares entre 1:1 hasta 1:80 a pH ácido, neutro y básico. Se presenta además el ORP del agua residual sintética y el ORP del agua ultra-pura tipo I, por motivos de comparación. En el capítulo “Análisis de Resultados”, se utilizó la Figura 7 para representar el índice de ORP (Ecuación 9), para comparar el ORP de las muestras tratadas versus el ORP del agua ultra-pura tipo I.

Según los resultados de la Figura 7, se seleccionó el rango entre 1:3 a 1:10 para los experimentos de optimización de las mejores dosis Fenton. Esto es debido a que los valores de ORP obtenidos en este rango se acercan al valor de ORP del agua ultra-pura tipo I.



En la Figura 8 se observa la turbidez del agua tratada en NTU. Este parámetro no se tomará en cuenta para el capítulo de Análisis de Resultados, debido a la alta variabilidad estadística de los datos obtenidos. Es importante mencionar que los colorantes forman una solución, debido a que la turbidez es muy baja y a una turbidez alta se forman partículas coloidales suspendidas. El tamaño de partícula de las moléculas de color es de 100 nm- 3.5 μm o menos y los coloide

poseen un tamaño de partícula de 10-1 nm (Arboleda, 2000, p. 28; Romero, 2009, p 234), razón por la cual el color es material disuelto y no suspendido. Por ende a la turbidez no se tomará como respuesta de análisis.

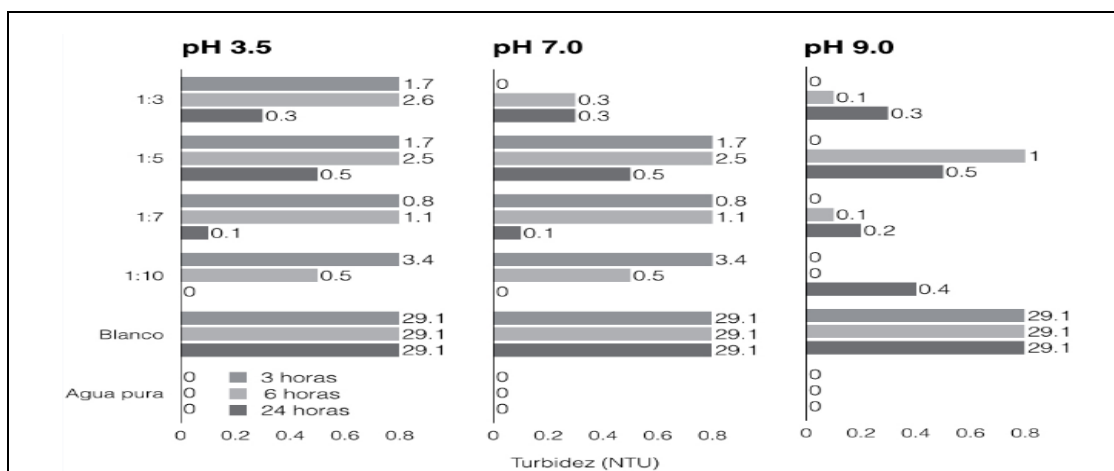


Figura 8: Medidas de turbidez (NTU) de cuatro tratamientos con dosis de Fenton 1:3 a 1:10

a. Tiempos de reposo: 3, 6 y 24 horas. b. Agua pura= agua tipo I. c. Blanco = agua residual sintética.

En la Figura 9 se observan los resultados del cambio del pH inicial del agua residual sintética para el rango entre 1:3 hasta 1:10 debido a que fue el rango que mejores resultados permitió obtener.

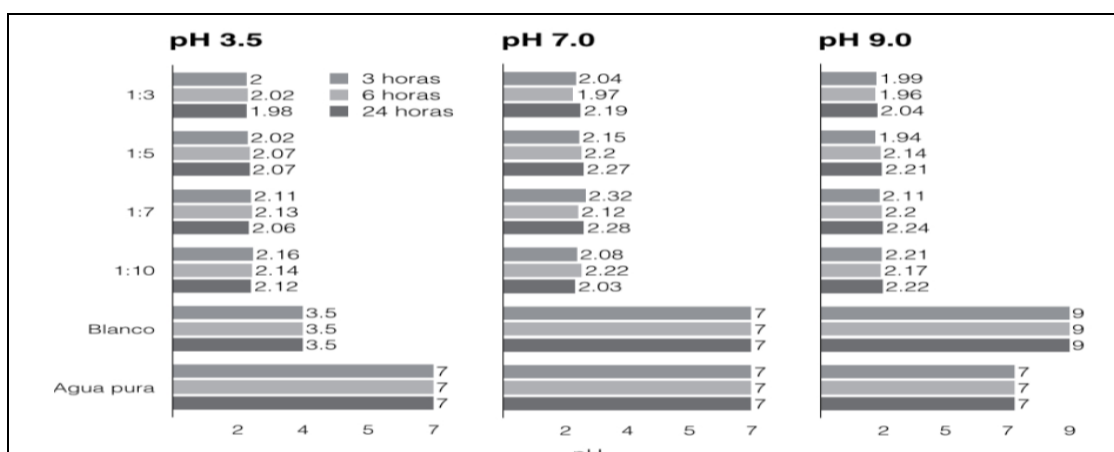


Figura 9: Medidas de pH de cuatro tratamientos con dosis de Fenton entre 1:3 a 1:10

a. Tiempos de reposo: 3, 6 y 24 horas. b. Agua pura= agua tipo I. c. Blanco= agua residual sintética.

En la Figura 10 se observan los resultados de la medida del ORP del agua tratada para el rango de dosis Fenton entre 1:3 hasta 1:10, agua residual sintética y agua tipo I. Se presentan solo resultados en el rango 1:3 a 1:10 debido a que fue el rango que mejores resultados permitió obtener. La Figura 9 muestra las condiciones finales de ORP, esta medida sí representa cambios significativos entre los tratamientos y en efecto se utiliza para efectos de comparación con el agua ultra-pura tipo I.

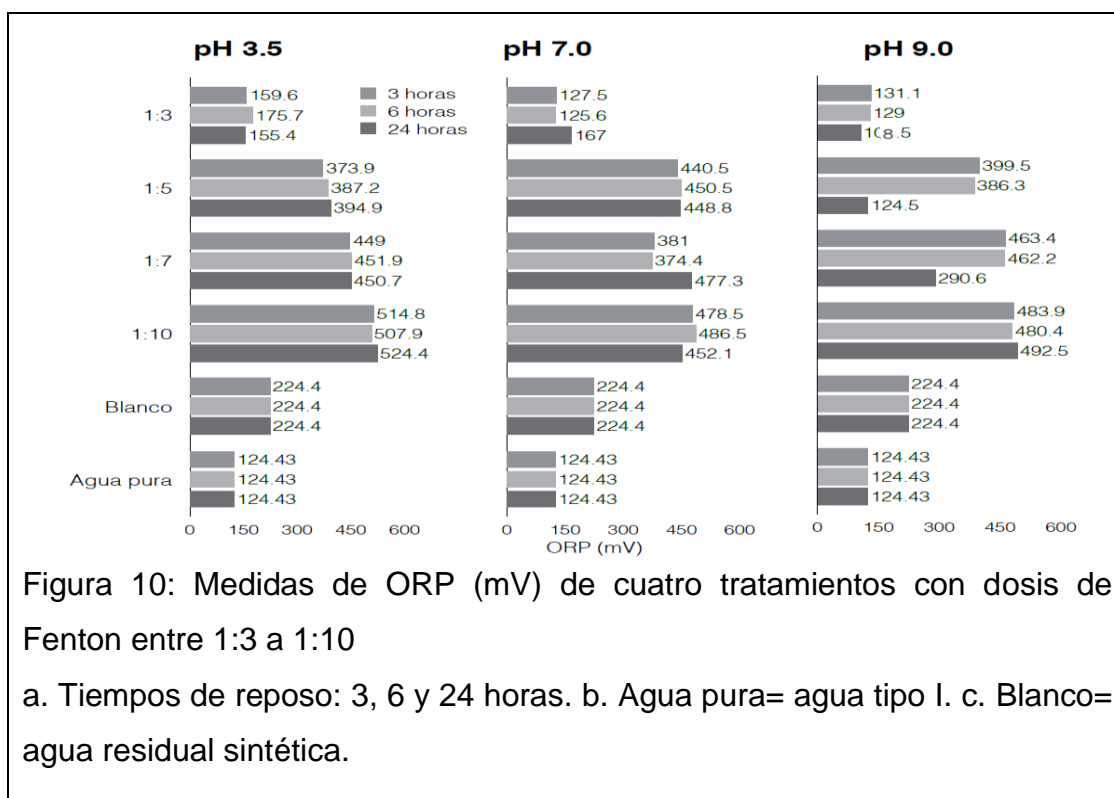


Figura 10: Medidas de ORP (mV) de cuatro tratamientos con dosis de Fenton entre 1:3 a 1:10

a. Tiempos de reposo: 3, 6 y 24 horas. b. Agua pura= agua tipo I. c. Blanco= agua residual sintética.

En la Figura 11 se presenta el valor de ORP en diferentes tratamientos con cloro y peróxidos de hidrógeno así como los tratamientos Fenton a diferentes pH.

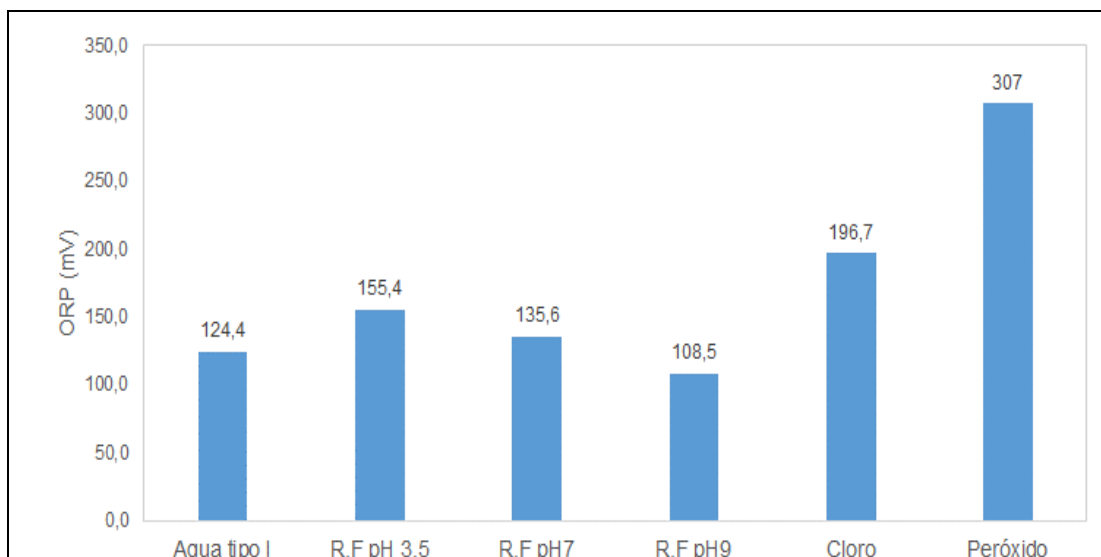


Figura 11: Comportamiento del ORP (mV) en tres tratamientos de oxidación en 24 horas

a. Reactivo Fenton. b. Cloro. c. Peróxido de hidrógeno al 30%.

En la Figura 12 se observa la turbidez final de diferentes tratamientos con cloro y peróxido de hidrógeno, así como los tratamientos Fenton a diferentes pH.

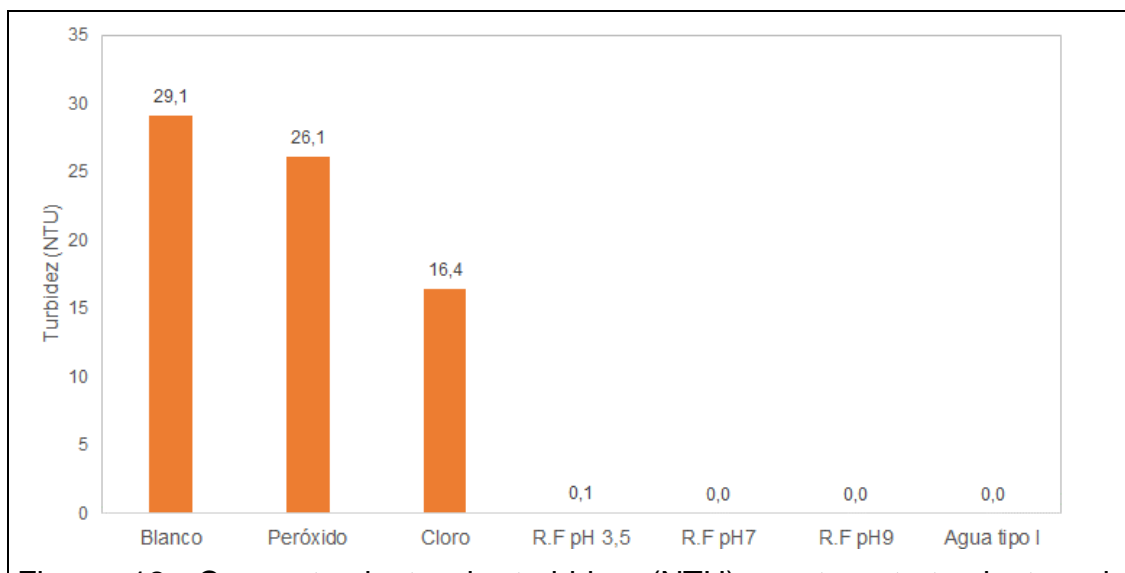
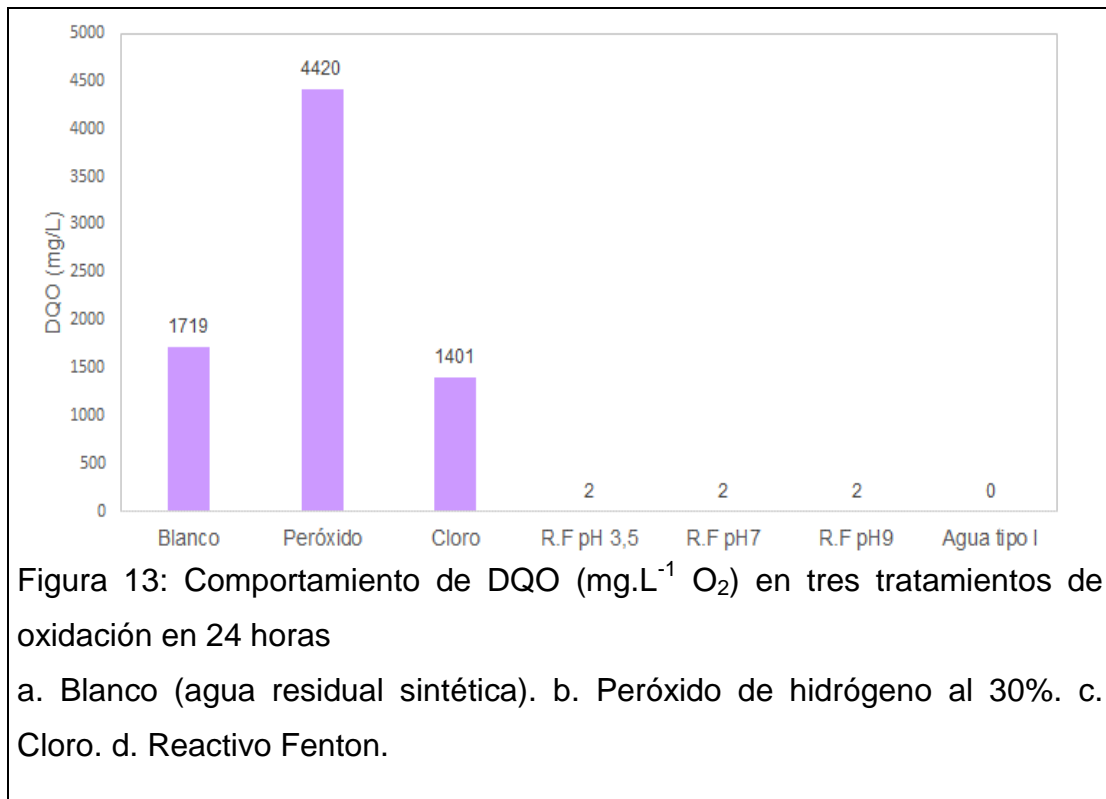


Figura 12: Comportamiento de turbidez (NTU) en tres tratamientos de oxidación en 24 horas

a. Blanco (agua residual sintética). b. Peróxido de hidrógeno al 30%. c. Cloro. d. Reactivo Fenton.

En la Figura 13 se presenta el DQO final de diferentes tratamientos con cloro y peróxido de hidrógeno, así como los tratamientos Fenton a diferentes pH. Esto en comparación con el de DQO de la muestra de agua residual sintética.

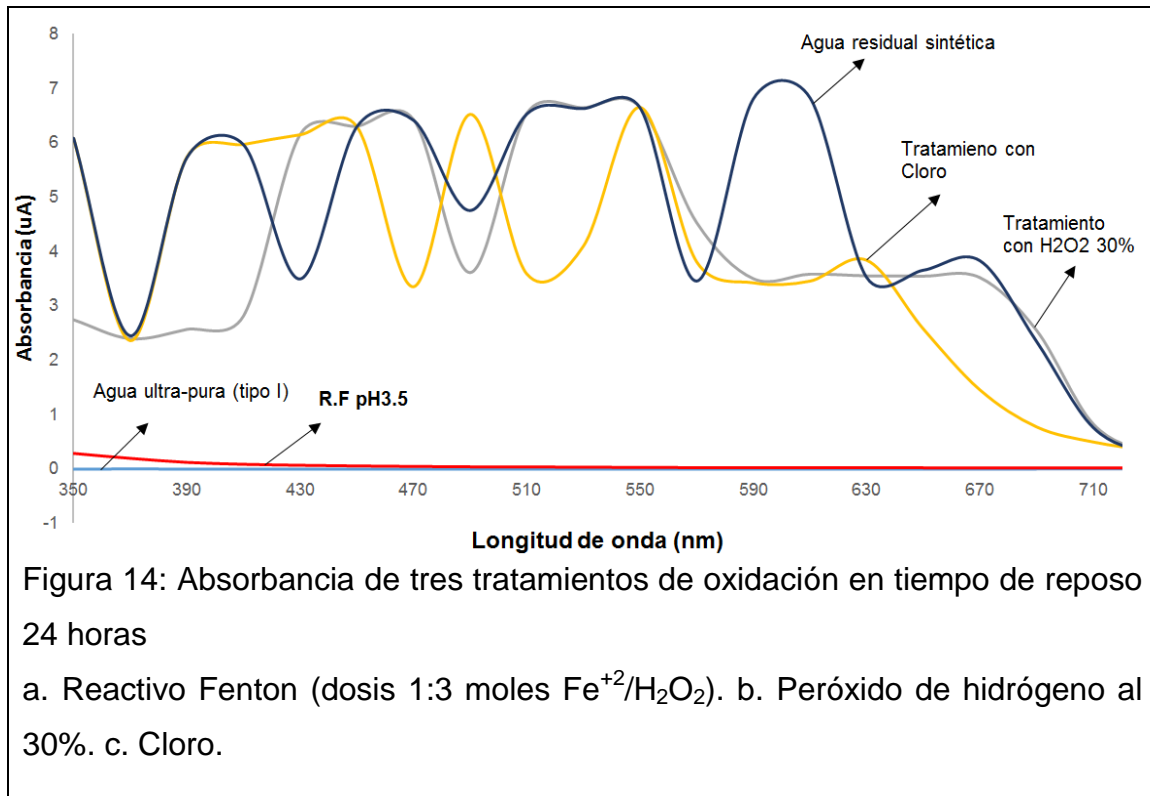


En la Tabla 11 se presentan las escalas de color de los diferentes tratamientos a diferentes pH, así como las escalas de color para el agua pura y el agua contaminada.

Tabla 11: Escalas de color con el software EasyRGB de los tratamientos de oxidación con Reactivo Fenton, Peróxido de hidrogeno 30% y Cloro. A pH 3,5; 7 y 9. Tiempos de reposo para todos los tratamientos: 3, 6 y 24 horas. Agua pura= agua tipo I, Blanco= agua residual sintética

ESCALAS DE COLOR EN LOS TRATAMIENTOS DE AGUA RESIDUAL CON COLOR				REACTIVO FENTON			
				pH 3,5			
				Tiempo	CIE L*a*b	RGB	COLOR
3 horas	L=99,2a=0,6b=3,7	R=255G=252,23B=243,69					
6 horas	L=99,1a=0,7b=3,8	R=255G=251,87B=243,22					
24horas	L=98,2a=0,9b=3,2	R=254,44G=249,19B=241,81					
pH 7,0				pH 9,0			
Tiempo	CIE L*a*b	RGB	COLOR	Tiempo	CIE L*a*b	RGB	COLOR
3 horas	L=99,3a=0,1b=3,2	R=255G=252,87B=244,92		3 horas	L=99,2a=0,3b=4,1	R=255G=252,39B=242,91	
6 horas	L=99,4a=0,3b=3,7	R=255G=252,99B=244,25		6 horas	L=99,4a=0,3b=4,2	R=255G=252,96B=243,29	
24horas	L=99,5a=0,4b=3,5	R=255G=253,24B=244,93		24horas	L=99,4a=0,5b=4,0	R=255G=252,85B=243,68	
H2O2 30%				AGUA PURA			
Tiempo	CIE L*a*b	RGB	COLOR	Tiempo	CIE L*a*b	RGB	COLOR
3 horas	L=0,4a=1,8b=0,4	R=6,59G=0,02B=0,55		3 horas	L=100 a=0,00 b=0,00	R=255 G=255 B=253,09	
6 horas	L=0,4a=1,8b=0,4	R=6,59G=0,02B=0,55		6 horas			
24horas	L=0,4a=1,5b=0,3	R=5,70G=0,27B=0,78		24horas			
CLORO				BLANCO			
Tiempo	CIE L*a*b	RGB	COLOR	Tiempo	CIE L*a*b	RGB	COLOR
3 horas	L=2,2a=13,1b=3,4	R=31,33G=0B=0,32		3 horas	L=0,4 a=0,6 b=0,4	R=6,07 G=0,18 B=0,55	
6 horas	L=2,0a=12,0b=3,2	R=29,72G=0B=0,03		6 horas			
24horas	L=1,5a=8,5b=2,2	R=23,0G=0B=0,48		24horas			

En la Figura 14 se reporta la absorbancia en el espectro UV-VIS de muestras de agua tratada, muestras de agua pura y contaminada. Se reportan análisis UV-VIS de muestras diferentes de reactivo Fenton a un tiempo de reposo de 24 horas y pH ácido.



Los resultados obtenidos en el trabajo experimental con reactivo Fenton para efluentes con colorantes textiles se analizan en el capítulo siguiente.

4. CAPÍTULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se discuten los resultados experimentales obtenidos en la remediación del agua contaminada con la mezcla de colorantes amarillo reactivo 160, rojo reactivo 190 y azul reactivo 81. La presente discusión se basa en los siguientes fenómenos físico-químicos:

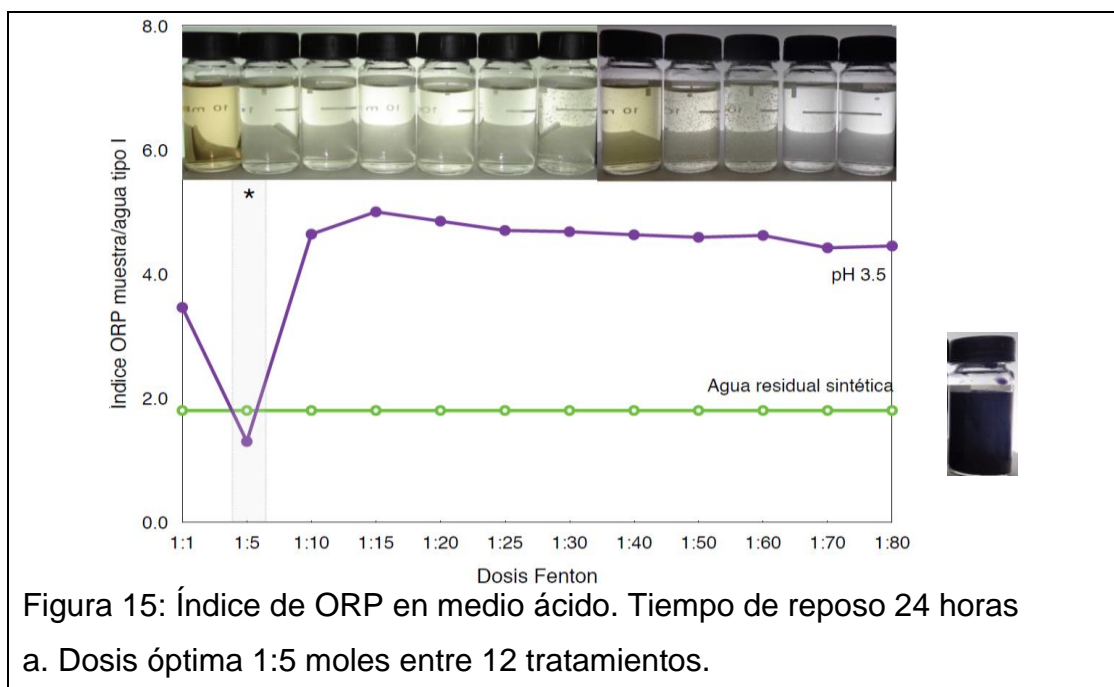
- Cambio del potencial de oxidación-reducción (ORP) del agua residual contaminada en función de la dosis óptima de reactivo Fenton, tiempo y pH.
- Cambio de la demanda química de oxígeno, turbidez en el tratamiento Fenton, así como en diferentes tratamientos como oxidación con cloro y oxidación con peróxido de hidrógeno.
- Barrido espectrofotométrico en el espectro ultravioleta-visible de muestras contaminadas, tratadas en función de agua ultra-pura tipo I.

4.1. Efecto Fenton en el potencial de oxidación-reducción

Como se mencionó anteriormente en el capítulo de Resultados, debido a la alta variabilidad de resultados en la turbidez final en las réplicas de cada tratamiento no se toma en cuenta a la turbidez como variable respuesta para el control estadístico. No obstante, en la presente investigación se evalúa al cambio del potencial de oxidación-reducción (ORP) del agua tratada como uno de los parámetros de calidad del proceso de remediación. En el presente trabajo, la evaluación del cambio del ORP en el proceso de tratamiento se la representa como “índice del potencial de oxidación y reducción” (ver metodología de cálculo en la sección 2.4.). Con los resultados de medición de ORP de las muestras tratadas en función del agua ultra-pura tipo I se calculó al mencionado índice para los diferentes tratamientos a diferentes pH iniciales (Figuras 15, 16 y 17). Con el objetivo de determinar la eficiencia del proceso de remediación, si se divide el ORP del agua tratada en función del ORP del agua tipo I (124,4 mV), mientras el índice se acerque a un valor de 1.0, entonces se determinará la máxima remoción de colorantes. Dado que el ORP del agua residual sintética tuvo un a valor de 224,4 mV, y el ORP del agua pura tipo I

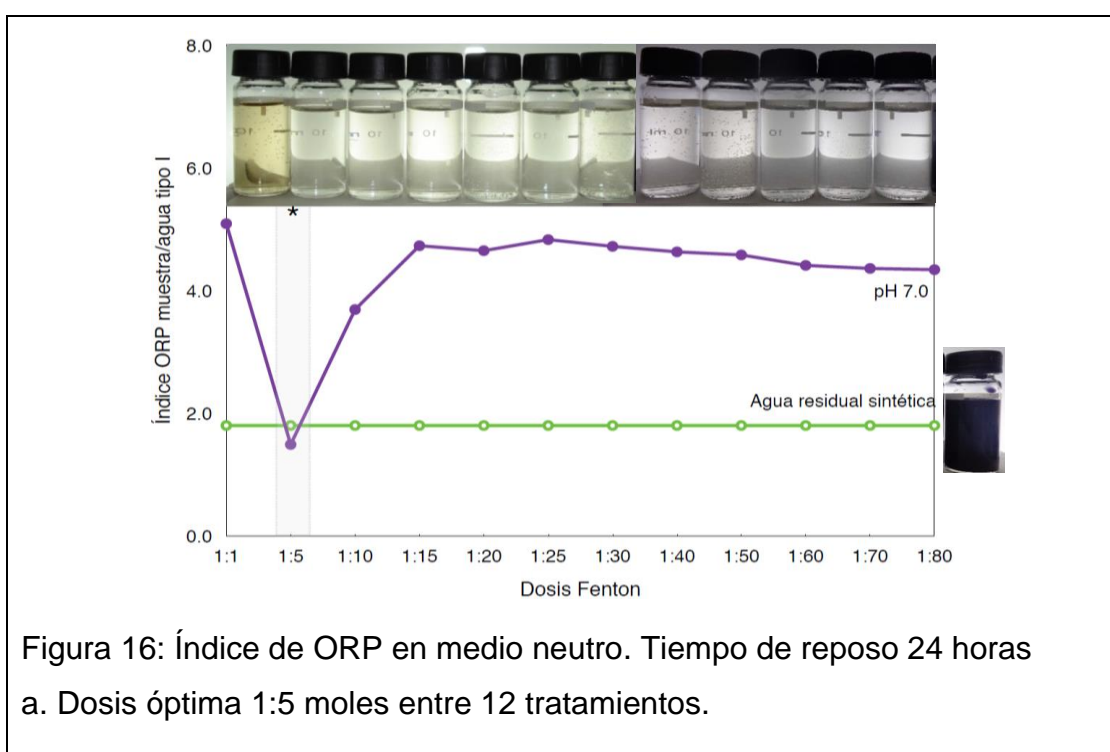
tuvo un valor de 124,4 mV, entonces para lograr la ruptura de los enlaces de las moléculas de colorantes del medio líquido es necesaria una reacción con un potencial de 100 mV.

Con los resultados de medición de ORP a un pH inicial ácido y dosis Fenton entre 1:1 hasta 1:80, a las 24 horas de haber transcurrido la reacción, se obtuvieron índices de oxidación-reducción en el tratamiento del agua contaminada que se presentan en la Figura 15. Se destaca que la dosis óptima que más se acerca a 1,0 fue la dosis Fenton 1:5, la cual obtuvo un índice de 1,3. La dosis 1:1 obtuvo un índice de 3,3, mientras que las dosis entre 1:10 hasta 1:80 obtuvieron índices mayores que 4,0. Por cada mol de hierro (II) y 5 moles de peróxido de hidrógeno, la degradación de moléculas de colorantes permitió que el ORP del agua tratada llegue a un valor de 162,2 mV; es decir, a una diferencia de 37,8 mV del agua pura. Fotografías en la parte superior de la Figura 15 también evidencian los cambios de coloración en las muestras. Dentro de los parámetros que permitió evaluar la remoción de colorantes se presenta un barrido en el espectro ultravioleta-visible en la sección 2.4.

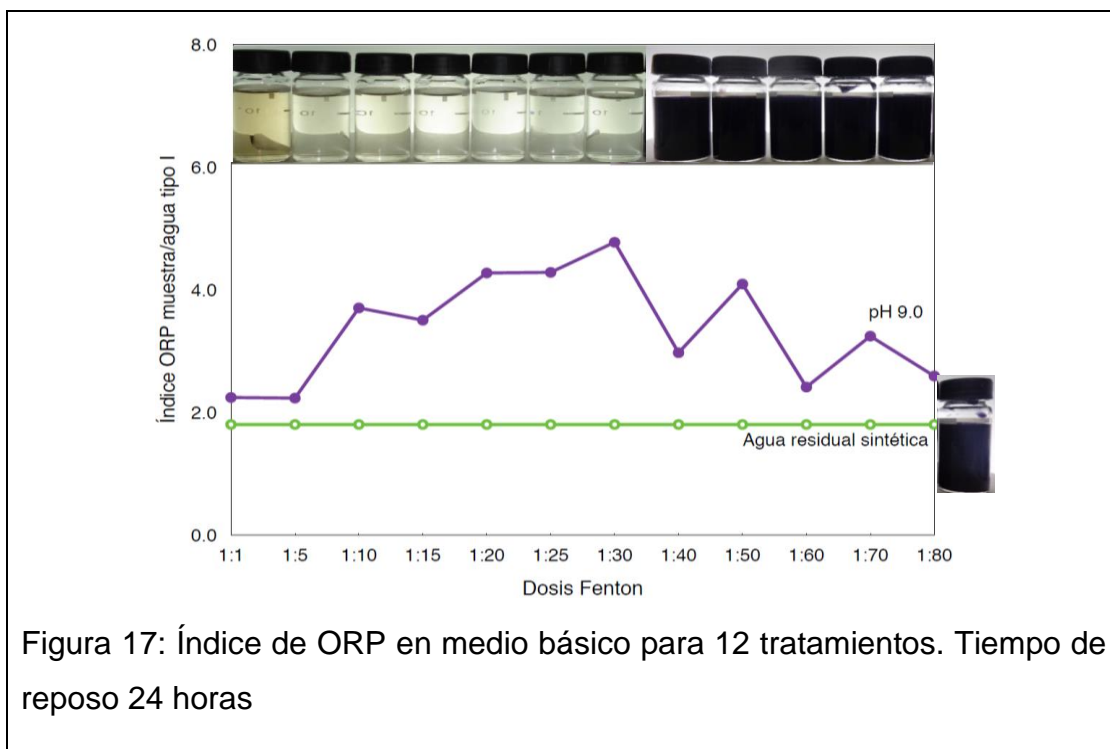


Resultados de medición de ORP, a pH inicial neutro y dosis Fenton entre 1:1 hasta 1:80, después de 24 horas de haber transcurrido la reacción, permitieron

calcular los índices de oxidación en el tratamiento del agua contaminada (Figura 16). Se destaca que la dosis que más se acerca a 1,0 fue nuevamente la dosis Fenton 1:5, la cual obtuvo un índice de 1,5. La dosis de 1:1 obtuvo un índice de 5,1, mientras que las dosis entre 1:10 hasta 1:80 obtuvieron índices mayores que 3,7. Por cada mol de hierro (II) y 5 moles de peróxido de hidrógeno, la reducción de moléculas de colorantes permitió que el ORP del agua tratada llegue a un valor de 185 mV; es decir, a una diferencia de 60,6 mV del ORP del agua pura. Así mismo, fotografías en la parte superior de la Figura 16 también evidencian los cambios de coloración en las muestras.



En este tercer experimento, transcurridas 24 horas del proceso, el tratamiento a un pH inicial básico y dosis Fenton entre 1:1 hasta 1:80 permitió calcular índices de oxidación (Figura 17). Se destaca que las dosis que más se acercan a 1,0 fueron las dosis Fenton 1:1 y 1:5, las cuales obtuvieron un índice de 2,2 respectivamente. Para los tratamientos más efectivos a pH básico, cada mol de hierro (II) y entre 1 a 5 moles de peróxidos de hidrógeno, la reducción de moléculas de colorantes permitió que el ORP del agua tratada llegue a un valor de 277,8 mV; es decir, a una diferencia de 153,4 mV del ORP del agua pura. Así mismo, fotografías en la parte superior de la Figura 17 también evidencian los cambios de coloración en las muestras.



Según los índices del potencial de óxido-reducción (Figuras 15, 16 y 17) obtenidos de experimentos a diferentes pH, diferentes dosis Fenton, se demuestra que las mejores condiciones para remover la mezcla de colorantes amarillo reactivo 160, rojo reactivo 190 y azul reactivo 81 fue la relación molar 1:5 $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$ a un pH entre ácido (3,5) a neutro (7,0). Sin embargo, la menor diferencia en ORP entre la muestra tratada y el agua ultra-pura tipo I fue con el tratamiento a pH ácido. Según fotografías adjuntas en las Figuras 15, 16 y 17, el ORP evidenció una correlación directa con la decoloración de las muestras tratadas (un análisis del cambio del color de las muestras se presenta en la sección 4.5.).

Los resultados experimentales, en efecto, concuerdan con lo publicado en la literatura científica. Es decir, a pH ácido se obtienen los mejores rendimientos en la remoción de colorantes (Osorio, Torres y Sánchez, 2010, p. 50). La protonización del medio facilita la ruptura de enlaces covalentes de las moléculas de colorantes. Daud, et al. (2012) experimentó la reacción Fenton a un pH aproximado a 3,5 y obtuvo eficiencia de 99% de decoloración; pero a pH inferiores a 3,5, la velocidad de reacción en el proceso de Fenton disminuyó, pues el peróxido de hidrógeno se estabiliza debido a la adición de un protón y así se forma el ion oxonio (H_3O_2^+) (Ecuación 9). Además los radicales hidroxilos

en condiciones extremadamente ácidas, captan electrones y forman agua (Ecuación 10). Por lo tanto el poder oxidativo disminuye. La formación del ion férrico a partir del ion ferroso a condiciones extremadamente ácidas ($\text{pH} < 2$), forma iones complejos hidratados como el ion $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{+2}]$ y el ion $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}]$ (Surana, Mehta, Pamecha y Kabra, 2011, p. 108). Estos nuevos iones, no favorecen al proceso, pues reaccionan lentamente con el peróxido de hidrógeno (Hilal, 2011, p. 266); la estabilidad del ion complejo aumenta si el medio es suficientemente ácido (Chang, 2010, p. 750). En los resultados de Bousla, et al. (2012) se demuestra que a pH neutros y básicos, la generación de radicales hidroxilos disminuye por la formación de iones de hierro, los cuales precipitan como hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_3$, como se observa en la ecuación 11.



En los trabajos de Sigh (2014) y Punzi, Mattiasson y Jonstrup (2012) se indican que la reacción Fenton tiene como desventaja una alta producción de lodos con altas concentraciones de hierro. Sin embargo, según los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo de titulación (Figuras 15, 16 y 17) se observa que no existe la presencia de lodos en el agua después del tratamiento. Al no existir la presencia de precipitados, ni de sólidos suspendidos, se sugiere que la mezcla de colorantes amarillo reactivo 160, rojo reactivo 190 y azul reactivo 81 sufrió una constante oxidación hasta formar presumiblemente CO_2 , N_2 y H_2O en estado gaseoso (Figura 25).

De acuerdo a lo antes expuesto, se concluye que la mejor dosis Fenton para la remoción de colorantes es la relación molar $1:5 \text{ Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$ a un pH 3,5. De esta experimentación y primera conclusión, se planteó un segundo diseño experimental exploratorio (sección 2.3.) para obtener la dosis óptima en un rango entre 1:3 a 1:10.

4.1.1. Dosificación óptima del reactivo Fenton

Young-O, et al., (2004) señala que al añadir el reactivo Fenton, el ORP incrementa a un máximo de 640 mV y tras transcurrir 100 minutos del proceso,

el ORP disminuye debido a un agotamiento del reactivo, debido a la carencia de sal de hierro y peróxido de hidrógeno. Por lo cual, se puede definir que la dosis molar es un parámetro de optimización en el proceso Fenton.

El primer diseño exploratorio permitió evaluar la dosis molar $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$ entre un rango de 1:1 a 1:80. Y como conclusión se obtuvo que la mejor relación molar fue 1:5, por lo que posteriormente se experimentaron relaciones molares cercanas a esta dosis para optimizar el proceso. Las dosis fueron 1:3, 1:5, 1:7 y 1:10, según el diseño experimental exploratorio (sección 2.3.). Todas las mediciones se las realizaron 24 horas después de la reacción. Los resultados de la segunda experimentación con dosis Fenton a pH 3,5 se presentan en la Figura 9 de la sección de Resultados. De estos valores, mediante Estadística Inferencial, se evalúa en la siguiente sección de optimización (i) si existe diferencia estadísticamente significativa entre dosis Fenton en un rango 1:3 a 1:10 mediante análisis de varianza, y (ii) cuál de las dosis es la que tiene mayor cercanía al ORP del agua pura (124,4 mV).

En la Tabla 12 se presenta el análisis de varianza (analysis of variance, ANOVA), la cual indica en efecto que sí hay diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,001$) al utilizar dosis entre 1:3 hasta 1:10. Y Según la Figura 18, la relación molar 1:3 $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$ es la que genera un ORP de 163,6 mV a pH 3,5, es decir un ORP cercano al agua pura tipo I.

Tabla 12: Análisis de varianza para ORP con ANOVA. Medio ácido pH 3,5

	1:3	1:5	1:7	1:10	Blanco
3 horas	159,6	373,9	449,0	514,8	224,40
6 horas	175,7	387,2	451,9	507,9	224,40
24 horas	155,4	394,9	450,7	524,4	224,40
Promedios	163,6	385,3	450,5	515,7	224,40

Análisis de varianza de ORP

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
1:3	3	490,7	163,5666667	114,8233
1:5	3	1156	385,3333333	112,8633
1:7	3	1351,6	450,5333333	2,123333
1:10	3	1547,1	515,7	68,67
Blanco	3	673,2	224,4	0

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	267968,1693	4	66992,04233	1122,22	3,24956E-13	3,478049691
Dentro de los grupos	596,96	10	59,696			
Total	268565,1293	14				

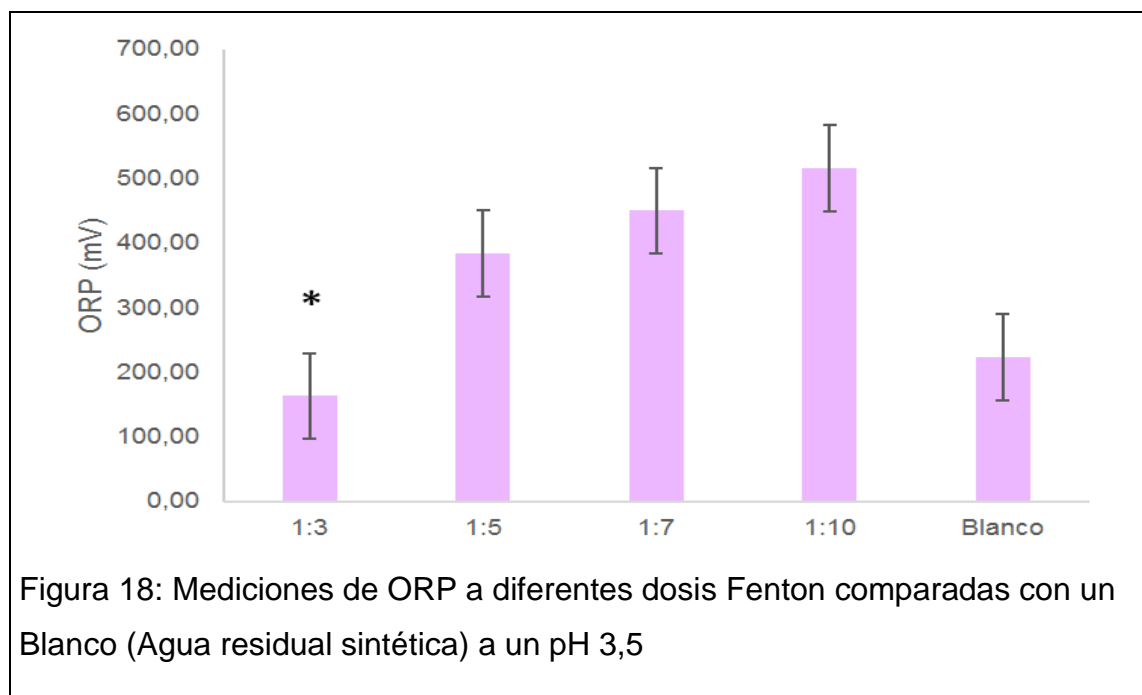


Figura 18: Mediciones de ORP a diferentes dosis Fenton comparadas con un Blanco (Agua residual sintética) a un pH 3,5

En la Tabla 13 se presenta el ANOVA para los tratamientos a pH neutro. En la tabla se indica en efecto que sí existe diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,001$) al utilizar dosis entre 1:3 hasta 1:10. Y según la Figura 19, la relación molar de 1:3 $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$ genera un ORP de 140,03 mV a pH 7,0, es decir un ORP también cercano al agua tipo I.

Tabla 13: Análisis de varianza para ORP con ANOVA. Medio neutro pH 7

	1:3	1:5	1:7	1:10	Blanco
3 horas	127,5	440,5	381,0	478,5	224,4
6 horas	125,6	450,5	374,4	486,5	224,4
24 horas	167,0	448,8	477,3	452,1	224,4
Promedios	140,03	446,6	410,9	472,4	224,4

Análisis de varianza de ORP				
RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
1:3	3	420,1	140,0333333	546,3033
1:5	3	1339,8	446,6	28,63
1:7	3	1232,7	410,9	3317,61
1:10	3	1417,1	472,3666667	324,0533
Blanco	3	673,2	224,4	0

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	261764,5027	4	65441,12567	77,59946	1,73084E-07	3,478049691
Dentro de los grupos	8433,193333	10	843,3193333			
Total	270197,696	14				

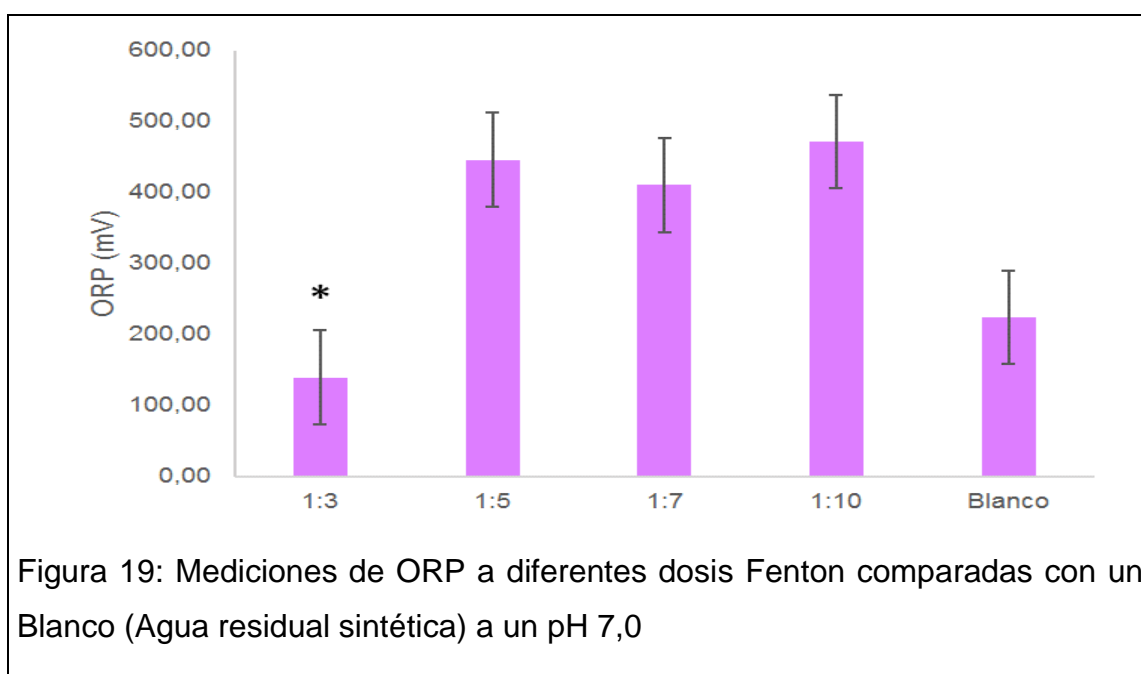


Figura 19: Mediciones de ORP a diferentes dosis Fenton comparadas con un Blanco (Agua residual sintética) a un pH 7,0

En la Tabla 14 se presenta el ANOVA para los tratamientos a pH básico. En la tabla se indica en efecto que sí existe diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) al utilizar dosis entre 1:3 hasta 1:10. Y según la Figura 20, la relación molar 1:3 $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$ genera un ORP de 122,8 mV a pH 9,0, es decir un ORP también cercano al agua pura tipo I.

Tabla 14: Análisis de varianza para ORP con ANOVA. Medio básico pH 9

	1:3	1:5	1:7	1:10	Blanco
3 horas	131,1	399,5	463,4	483,9	224,4
6 horas	129,0	386,3	462,2	480,4	224,4
24 horas	108,5	124,5	290,6	492,5	224,4
Promedios	122,8	303,4	405,4	485,6	224,4

Análisis de varianza de ORP

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
1:3	3	368,6	122,8666667	155,9033
1:5	3	910,3	303,4333333	24056,41
1:7	3	1216,2	405,4	9884,64
1:10	3	1456,8	485,6	38,77
Blanco	3	673,2	224,4	0

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	246936,3227	4	61734,08067	9,042444	0,00234377	3,478049691
Dentro de los grupos	68271,45333	10	6827,145333			
Total	315207,776	14				

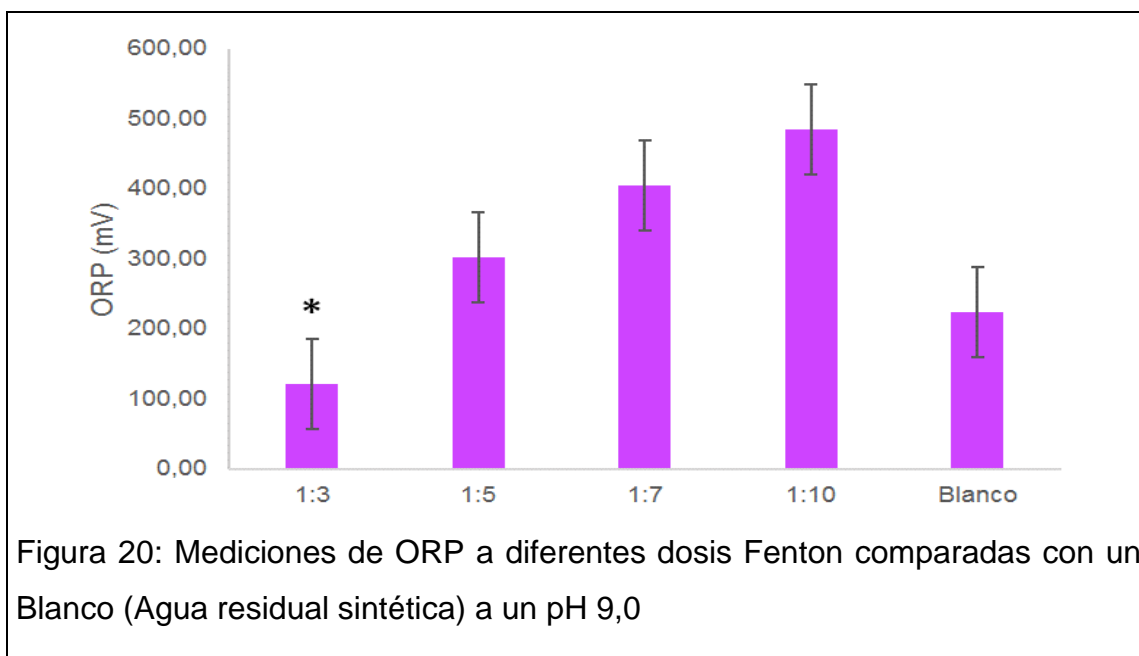


Figura 20: Mediciones de ORP a diferentes dosis Fenton comparadas con un Blanco (Agua residual sintética) a un pH 9,0

El análisis estadístico permite comprobar que en efecto la selección de rangos entre 1:3 hasta 1:10 fue estadísticamente significativa y que la dosis 1:3 fue la dosis que menor ORP generó en los tratamientos, incluso a pH básico. Es importante recalcar la estequiometría que domina la relación molar de los reactivos (Rodríguez, et al., 2010). Según Bahmani, et al., (2013) altas concentraciones de H_2O_2 producen que el peróxido de hidrógeno se descomponga y forme perhidróxilo (HO_2^{\cdot}) y finalmente agua y oxígeno (Ecuación 12, 13), y como resultado una pobre remoción de la contaminación. Respecto a la dosis de hierro, un exceso de la dosis de este compuesto

provoca el atrapamiento de los radicales hidroxilos, durante la oxidación y al mismo tiempo genera la precipitación del hierro como hidróxido férrico (Ecuación 14). (Sohrabia, Khavarana, Shariatib y Shariatic, 2014, p. 3):



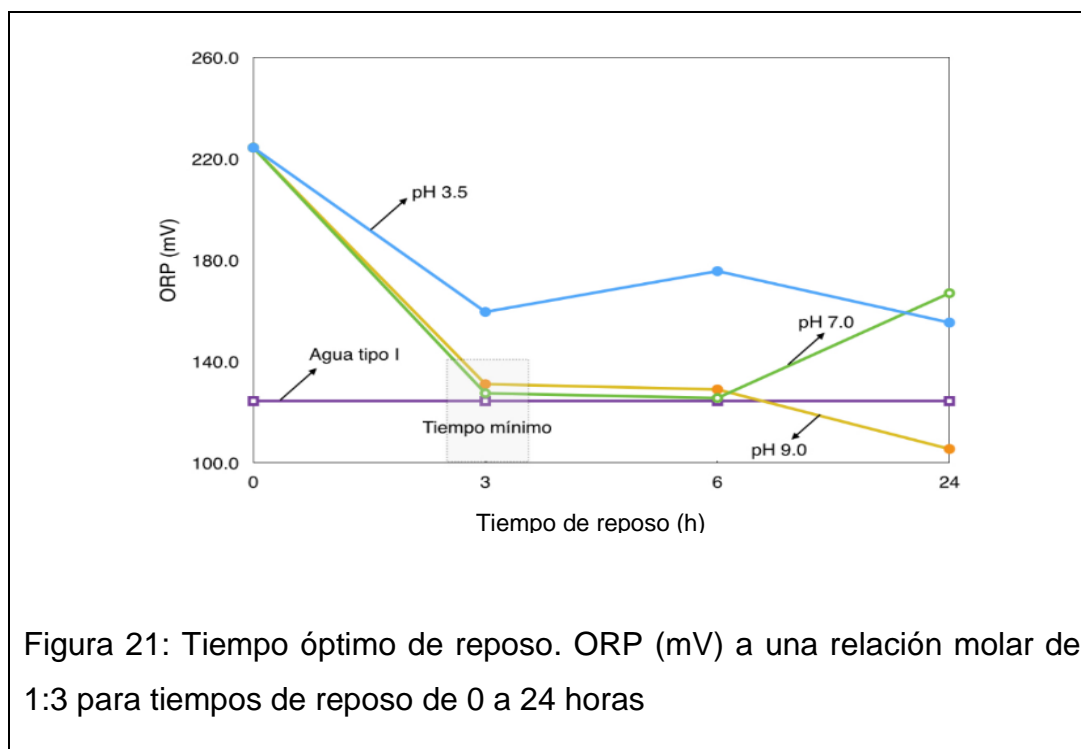
En todos los tratamientos el pH final fue entre 1,9 a 2,3 luego de 24 horas de reposo (Figura 9). Esta acidez se debe a la protonización que genera el ion hierro en el agua. El fenómeno de protonización es conocido para iones como hierro (III) y aluminio (III) en tratamientos mediante coagulación-floculación: el ion hierro (III) y aluminio (III) al disolverse en agua genera hidrólisis de moléculas de agua debido a la formación de iones complejos; el efecto de la hidrólisis es la intensa liberación de iones hidrógeno, generando altos niveles de acidez (Chang, 2010, pp. 749-751). Aunque en la bibliografía no se halla suficiente información sobre el pH final del proceso Fenton, no obstante, autores han determinado la presencia de ácidos orgánicos. Esta información justifica las condiciones finales de acidez, tal y como lo expresan Rahman, Hasnat y Sawada (2009). En dicha investigación los productos finales de oxidación fueron complejos de hierro, CO_2 , H_2O , HNO_2 y HNO_3 , alcanzando el 100% de degradación a pH ácido de 3,1 (García, et al., 2010, p. 3). La bibliografía también reporta la evolución de los productos de degradación de colorantes en el proceso; se determinó que en los primeros 15 minutos de la reacción existe la presencia de estructuras aromáticas como ácido ftálmico, acético, succínico, maleico y oxálico; además en el transcurso de 60 minutos, se discute sobre la desaparición de los ácidos carboxílicos debido a reacciones de descarboxilación, pues los ácidos carboxílicos de cadenas cortas tienen baja reactividad con los radicales hidroxilos. En la mayoría de los artículos se reporta eficiencias por encima del 70% a un pH inicial de 3,0 (Ebrahiem, Mohammednoor y Ahmed, 2013, p. 4; Patel y Patel, 2013, pp. 90 y 91; Sahunin, Kaewboran y Hunsom, 2006).

4.1.2. Tiempo óptimo de reposo para el tratamiento con reactivo Fenton

En el presente trabajo de titulación se evaluó el tiempo óptimo de reposo (tiempo después de haber transcurrido la reacción de oxidación-reducción per se). Los tiempos de reposo considerados en este trabajo fueron de 3, 6 y 24 horas, periodos en los cuales se tomaron muestras para ser evaluadas y determinar un tiempo mínimo óptimo en el proceso avanzado de oxidación Fenton.

En la Figura 21 se presentan los valores del potencial de oxidación-reducción para diferentes pH y tiempos de reposo. Como se mencionó en la sección anterior, el pH óptimo fue el de 3,5 y la dosis molar de 1:3 moles de $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$, por tanto el tiempo mínimo de reposo se tomará en base a este pH y dosis. Se observa en la Figura 21 que a las 3 horas el ORP fue de 159,6 mV en relación al ORP del agua ultra-pura tipo I de 124,4 mV. En el trabajo de Gamarra y Gómez (2014) se empleó un tiempo mínimo de reposo hasta 10 horas, a un pH entre 2 a 4,5 y un ORP aproximado de 550 mV. En la misma Figura 21, también se observa que en el tiempo total de 24 horas, los resultados mejoran en escenarios ácidos y básicos, en especial el tratamiento con pH básico de 9,0, pues se asemeja a las condiciones del agua ultra-pura tipo I, ya que presenta un ORP de 108,5 mV, menor al ORP del agua ultra-pura tipo 1 de 124,4 mV.

Por lo tanto, en función del valor mínimo de ORP obtenido en este experimento de optimización, a las condiciones ya elegidas de pH y dosis molar, el tiempo a considerar como tiempo de reposo en el proceso Fenton fue de **3 horas**.



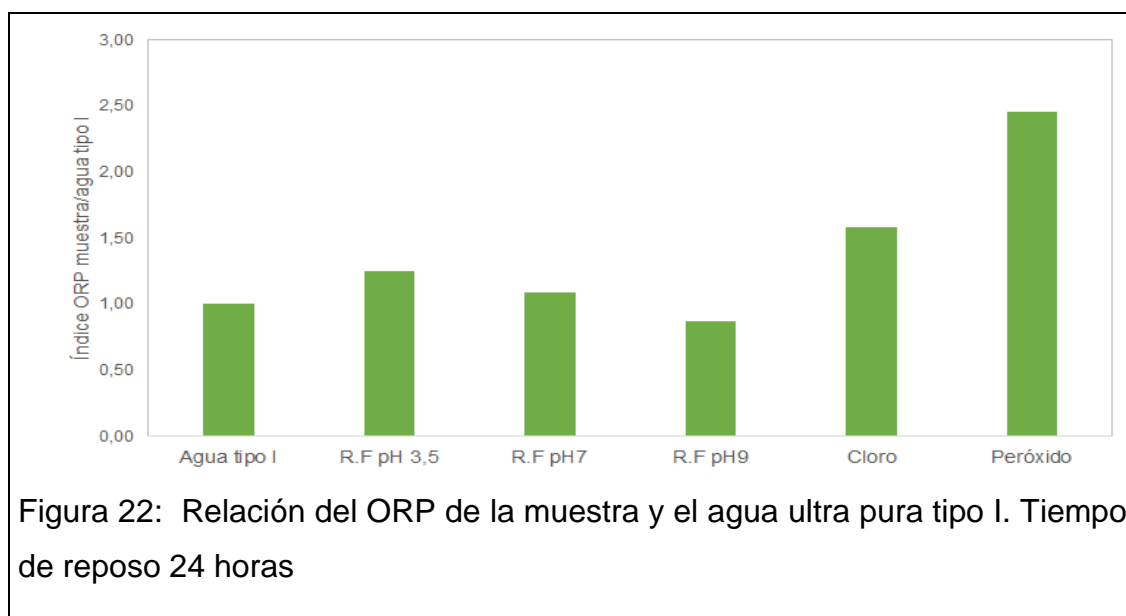
4.2. Procesos alternativos de oxidación

Se realizó un estudio comparativo entre Fenton y otros procesos de oxidación con el propósito de evaluar eficiencia de remoción de contaminantes. En la Figura 22 se presentan valores del índice de ORP para comparar entre tres tratamientos de oxidación con reactivo Fenton, oxidación con hipoclorito de sodio (cloro comercial) y peróxido de hidrógeno al 30% a un tiempo de reposo de 24 horas. Fácilmente se aprecia que el reactivo Fenton en cualquier condición de pH, presenta índices cercanos al agua ultra-pura tipo I (1), mientras que el cloro y el peróxido de hidrógeno superan el índice ORP del agua ultra-pura con valores de 1,58 y 2,46 respectivamente. Castells, García, López y Solivia (2012) explican que el peróxido de hidrógeno a pesar de ser un agente oxidante ampliamente utilizado en el tratamiento de efluentes, trabaja eficientemente a través de catalizadores como el Fe^{+2} , pues favorece la generación de radicales hidroxilos, con un poder oxidante de 2800 mV, mientras que el peróxido posee solamente 1780 mV de poder oxidante. Así, Fenton a través de agentes oxidantes correspondientes a los radicales

hidroxilos que poseen un poder oxidante de 2800 mV oxida la materia orgánica aromática de colorantes (Ugsha y Llerena, 2013, p. 26).

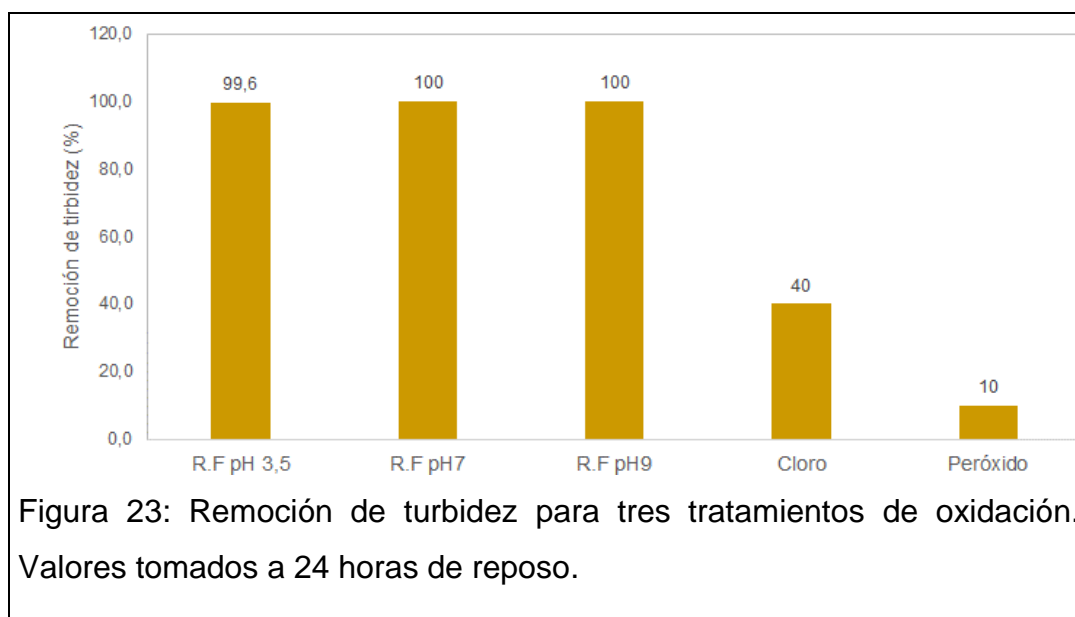
Mayoritariamente, los estudios de diversos autores revelan que Fenton es eficiente en condiciones ácidas (Ali, Ga-Allah y Badwy, 2013). Según la bibliografía, se indica que a pH entre 2 a 3 se alcanzó niveles de degradación de hasta 85% de colorantes azoicos, por mayor y rápida generación de radicales hidroxilos, a las 24 horas de tratamiento (Kos, Michalska, Żyła y Perkowski, 2012, p. 31).

Cabe tomar en cuenta que la luz ultravioleta es uno de los factores que influyen en la velocidad de reacción. La energía ultravioleta incrementa el número de protones en el medio y por ende el número de radicales hidroxilos que oxidan la materia e incrementan la degradación. El proceso requiere del aporte de energía UV para acelerar el proceso, debido a que la radiación UV solar o artificial, permite una serie de reacciones de Redox, para eliminar los contaminantes orgánicos y/o transformarlos a compuestos menos tóxicos y a un pH ácido de 4,5 (Khandelwal y Ameta, 2013, p. 1282).

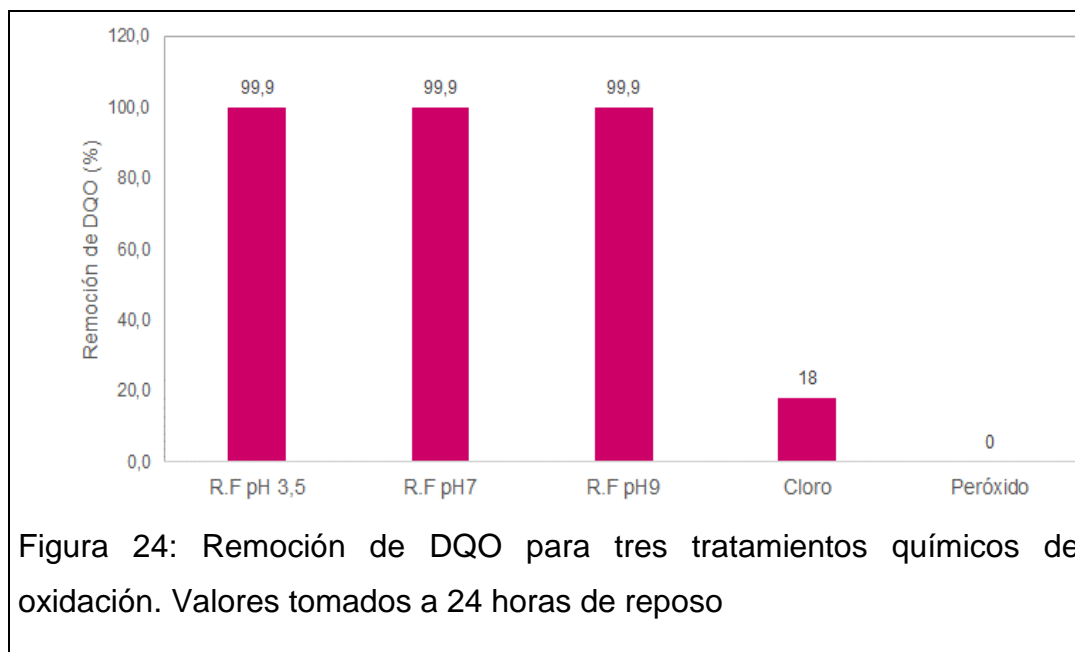


En la Figura 23 se observa que el reactivo Fenton a diferencia de dos tratamientos de oxidación (cloro y peróxido), remueve entre un 99,6 a 100% de la turbidez final en 24 horas; en cambio el tratamiento con cloro corresponde solamente al 40% de remoción y en el tratamiento con peróxido se obtuvo una

remoción del 10% de la turbidez. Según Godínez y Bernal (2014) oxidaciones Fenton remueven el 99,1% de turbidez, a pH 4 en un tiempo de 18000 segundos (5 horas), con alta producción de lodos; sin embargo, en los resultados experimentales de la presente investigación no se evidencia la presencia de lodos debido a que la dosis aplicada actúa completamente en la oxidación de colorantes.



En la Figura 24 se observa el porcentaje de remoción del DQO mediante el reactivo Fenton, cloro y peróxido a 24 horas. La demanda química de oxígeno del agua residual sintética fue de 1719 mg.L^{-1} . Según la Figura 24, un 99,9% de remoción de la demanda química de oxígeno se obtuvo en el tratamiento con reactivo Fenton a pH ácido, neutro y básico, en comparación al tratamiento con cloro (18% de remoción) y peróxido (0% de remoción). Es decir, el proceso Fenton removió casi cinco veces más materia orgánica que el proceso con cloro. En el trabajo de Rodríguez y Geissler (2011) se reportó un 75% de remoción del DQO. En otros estudios se reportaron remociones de DQO hasta un 50% a pH 3-3,5 durante 48 horas (Ertugay y Malkoc, 2013, p. 27; Kos, Michlaska y Perkowski, 2010, p. 34). Patel y Patel (2013) obtuvieron un 74,24% de remoción de DQO en 2 horas.



Según los resultados experimentales del presente trabajo, la demanda química de oxígeno medida a 3 y 24 horas no cambió en este periodo de tiempo; es decir, se mantuvo en $2 \text{ mg.L}^{-1} \text{ O}_2$ a dosis molar 1:3. Este valor de DQO final del agua tratada sí cumple con el límite máximo permisible de la normativa ambiental nacional vigente del Libro VI Anexo I Tabla 11,12 y 13, 2002, pp. 26,27 y 30-33 para descargas industriales en agua dulce, agua marina y alcantarillada, con valores de 250, 250 y $500 \text{ mg.L}^{-1} \text{ O}_2$, respectivamente.

En conclusión, según lo evaluado en esta sección el proceso Fenton fue altamente eficiente en la remoción de turbidez y DQO de las muestras contaminadas a diferentes pH. No obstante, a continuación se presentará un análisis en función de la remoción del color medida a través de barridos ultravioleta y medidas de color en un espectrofotómetro UV-VIS.

4.3. Degradación de colorantes textiles azo y reactivos con el proceso de Fenton

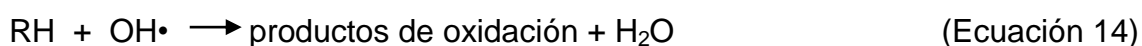
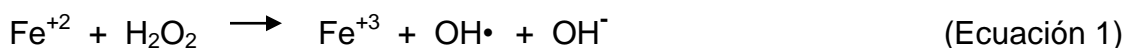
Los colorantes azo, al ser considerados sustancias recalcitrantes, alteran la calidad del agua transformándola en no-biodegradable, debido a que la relación DBO_5/DQO aporta valores menores de 0,40 (Salas, 2010); esto quiere decir que el contenido orgánico es persistente, por lo cual un tratamiento biológico no es lo más recomendable. En el presente trabajo no se evaluó esta relación

DBO₅/DQO, ya que la carga contaminante al ser sintética, se conoce que no hay la presencia de microorganismos que contribuyan a un valor significativo de DBO₅. No obstante, la evaluación de la remoción de colorantes se la realizó a través de la medición de la absorbancia en un espectro ultravioleta-visible entre 350 - 710 nm. En la Figura 14 se observa que el agua residual sintética da respuestas a longitudes de onda inicial entre 350-710 nm, con picos en prácticamente todo el rango medido. Este comportamiento evidencia la presencia de moléculas orgánicas que responden a la energía que sus enlaces covalentes absorben. El agua pura tipo I en cambio no da respuesta alguna de absorbancia debido a la ausencia de contaminantes que absorban energía en el rango medido. Sin embargo, en el agua tratada a un pH inicial de 3,5 y dosis molar Fenton óptima de 1:3, prácticamente se eliminan picos que presenta la muestra contaminada (Figura 14). De esta manera se evidencia la degradación de las moléculas de colorantes amarillo reactivo 160, rojo reactivo 190 y azul reactivo 81 en un rango de longitud de onda entre 350-710 nm. Como se manifestó anteriormente, debido a que no hubo la formación de lodos en el sistema, se sugiere la oxidación completa de las moléculas orgánicas. En la bibliografía se reporta una remoción de color del 97% y una longitud de onda de 435 nm a un pH de 3,5 (Kos, Zylla, Michalska y Perwowski, 2011, p. 578). Castro y Durán (2013) reportaron la comparación del proceso de Foto-Fenton y H₂O₂/UV, en el cual Fenton tiene menor absorbancia en una longitud de onda de 380-600 nm y con peróxido llega a la misma longitud de onda con picos mayores de absorbancia. Por otra parte, según la Figura 14, los tratamientos con hipoclorito sódico y peróxido de hidrógeno no permitieron reducir los niveles de contaminación y por tanto presentan picos de absorbancia similares al agua residual.

El color es una propiedad física relacionada con la absorbancia, pues ésta es la cantidad de energía (luz de longitud de onda) que traspasa o es absorbida por una muestra (Marín y Romero, 2009). Por tanto a manera de comprobar las condiciones operacionales antes estudiadas en la Tabla 10, sección 2.2., se presentan las mediciones del color de las muestras contaminadas, tratadas y del agua pura tipo I. El agua residual sintética prácticamente presenta un color negro-azulado y después del tratamiento a diferentes pH, dosis molares, se

obtuvo la transparencia (tomando al agua ultra-pura tipo I como referencia) para la dosis 1:3 a un pH 3,5. La influencia de la dosis molar en todos los tratamientos fue indispensable, ya que esto evidencia la influencia del cálculo estequiométrico en la relación entre el ion Fe^{+2} y H_2O_2 . Además, el pH ácido permitió el mayor porcentaje de remoción de color, tal cual se obtuvo en otros trabajos científicos (Neamtu, Yediler, Siminiceanu y Kettrup, 2003). También a pH básico se obtuvo remoción del color, pero debido a la formación de hidróxidos de hierro con alta capacidad absorbente, a niveles de 80% de remoción del color (Sundararaman, et.al., 2009)

Según los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo de titulación y las referencias bibliográficas a pH ácido, como reactivo limitante, el ion ferroso descompone el peróxido de hidrógeno en radicales hidroxilos, al mismo instante en que el ion ferroso se oxida a ion férrico (Ecuación 1). La función de los radicales liberados es atacar por oxidación a los compuestos orgánicos, generando uno o más radicales orgánicos y moléculas de agua (Ecuación 14). (Meriç, Lofrano y Belgiorno, 2005, p. 8; Benatti y Tavares, 2012, pp. 16 y 17).



Durante el proceso el ion ferroso es regenerado, al momento en que el ion férrico liberado oxida a los radicales orgánicos ($\text{R}\cdot$) (Ecuación 15) y el ion férrico se reduce a Fe^{+2} ; el nuevo ion ferroso reduce a los radicales (R^-) (Ecuación 16), por lo tanto el ion Fe II se oxida en ion Fe III (Ecuación 17). La oxidación del ion ferroso también puede darse por acción de los radicales hidroxilos, este paso no es beneficioso, pues el objetivo es oxidar la materia orgánica (Litter, 2001).



En la Figura 25 se observa los **posibles** compuestos intermediarios de la reacción de Fenton en los colorantes amarillo reactivo 160, rojo reactivo 190 y

azul reactivo 81, donde se aprecia que el grupo cromóforo azo (-N=N-) es destruido y reemplazado por hidrógenos de los radicales hidroxilos, es decir el enlace de nitrógeno se separa, el colorante se oxida y forma compuestos orgánicos y/o inorgánicos. Esta vía se basa en las ecuaciones 1 y 14 en el mecanismo de reacción sugerido por Gamarra y Gómez (2014, p. 26). Es decir, se puede argumentar que la materia orgánica se ha transformado en moléculas orgánicas más simples y sin presencia del grupo azoico por la oxidación y fraccionamiento del enlace covalente azo.

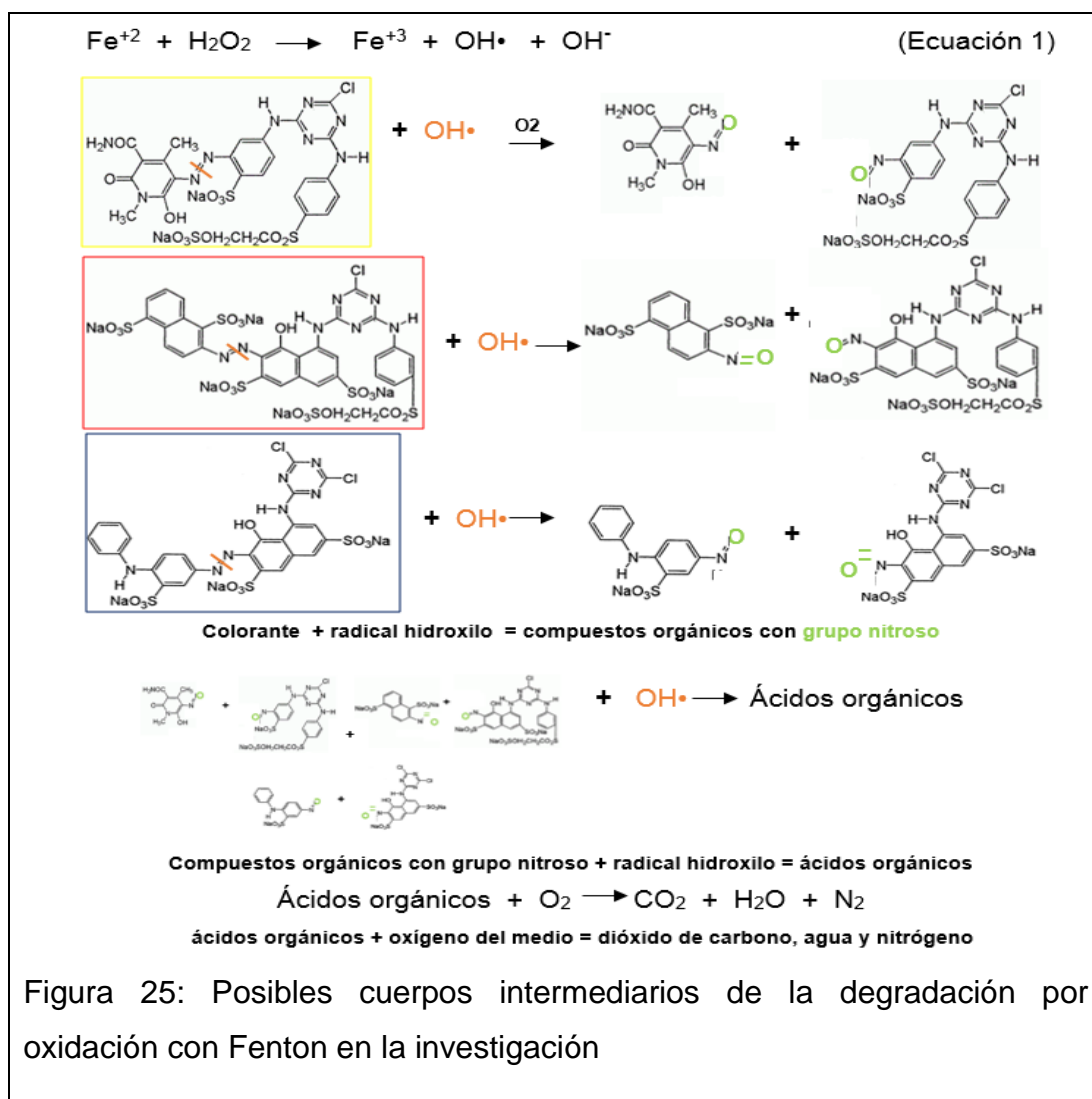


Figura 25: Posibles cuerpos intermediarios de la degradación por oxidación con Fenton en la investigación

De esta manera se puede definir que el agua tratada cumple con los límites máximos permisibles del Libro VI Anexo I Tabla 12 y 13, 2002, pp. 30-33 para descargas industriales en agua dulce y agua marina, con unidades de color inapreciables, para ambos casos.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del presente trabajo, reacción de Fenton para efluentes industriales contaminados con colorantes, se detallan a continuación.

5.1. Conclusiones

El proceso experimental óptimo para el tratamiento de aguas con reactivo Fenton en la degradación de color a escala de laboratorio fue a relación molar 1:3 de $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$ (2,2787 g de sal de hierro y 3,04 mL de peróxido de hidrógeno al 30%), a pH ácido 3,5 durante 3 horas como tiempo mínimo de reposo del sistema, temperatura inicial de 40°C, tiempo de mezcla 45 minutos, velocidad de mezclado 300 rpm y con iluminación natural por 3 horas. Las dosis molares de reactivo Fenton, pH óptimo y tiempo mínimo de operación fueron evaluadas en función de un índice del potencial de oxidación-reducción, el cual relaciona la medida de ORP del agua tratada con la medida del ORP del agua ultra-pura tipo I. Este índice es un aporte del presente trabajo de titulación, y no ha sido reportado hasta la fecha en alguna referencia bibliográfica. Se destaca, por lo tanto, la influencia de los factores operacionales antes mencionados en la óptima remoción de colorantes del agua.

La calidad físico-química del agua contaminada con colorantes (amarillo reactivo 160, rojo reactivo 190 y azul reactivo 81 a una concentración de 3,3 g.L^{-1}) excedía los límites máximos permisibles de la normativa ambiental nacional (ver Figura 6), sin embargo tras el tratamiento con reacción Fenton, el parámetro de color fue removido, mejorando la calidad físico-química del agua residual, ya que la bibliografía reporta una actividad catalítica y poder oxidante de 100% de eficiencia en la decoloración del efluente, remoción de DQO, turbidez, absorbancia y color.

La concentración y dosis óptima del PAO Fenton para remover los colorantes estudiados (amarillo reactivo 160, rojo reactivo 190 y azul reactivo 81) fue de 0,7496 g.mL^{-1} y 0,7496g, respectivamente. Ni altas ni bajas concentraciones de sulfato ferroso fueron efectivas, siendo importante la experimentación exploratoria de las dosis óptimas. Así mismo, ni altas ni bajas concentraciones

de peróxido de hidrógeno generaron remociones importantes de contaminación.

Se lograron eficiencias de remoción de demanda química de oxígeno, turbidez y color por encima del 99,6%. El proceso Fenton comparado con los tratamientos de oxidación con hipoclorito sódico y peróxido de hidrógeno, posee casi cinco veces mayor eficiencia en la degradación de colorantes, debido al poder oxidante de 2,8 V de los radicales hidroxilos. La descontaminación y decoloración prácticamente completa del agua residual, indica que la mezcla de colorantes ha sido degradada moléculas más simples volátiles.

En conclusión, el proceso Fenton estudiado en el presente trabajo de titulación es factible para el tratamiento de aguas con altas cargas contaminantes no biodegradables, por la acción oxidativa del reactivo Fenton a condiciones ácidas y de dosificación específica. Se destaca la ausencia de lodos, pues es gran ventaja como aplicación industrial y cuidado del medio ambiente.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio sobre el tratamiento de los compuestos intermediarios del proceso, correspondientes a los complejos de hierro, para evitar concentraciones de hierro remanentes en el sistema, aporte de coloración amarillenta y la toxicidad en el agua tratada. Se recomienda el estudio de procesos de fitorremediación para la remoción de remanentes de hierro en el sistema.

Respecto a la atribución de iluminación natural en el proceso, se recomienda ampliar el estudio, empleando fuentes artificiales de energía ultravioleta, de tal forma que el factor de energía sea constante y remueva rápidamente los colorantes, es decir, en menos de 3 horas.

Se recomienda utilizar el presente proceso para otras fuentes de contaminación o tipos de colorantes. De esta manera, sería un gran aporte que el proceso Fenton y las condiciones aquí determinadas se proyecten para efluentes industriales no textiles.

REFERENCIAS

- Ali, M., Ga-Allah, T. y Badawy, M. (2013). *Heterogeneous Fenton process using Steel industrywastes for methyl orange degradation*. Cairo, Egypto: Springer. Applied Water Science.
- Ali, Y. y Ameta, A. (2013). *Degradation and decolouration of amaranth dye by photo-fenton and by fenton reagents: a comparative study*. Udaipur, India: International Journal Chemycal Sciences.
- Aliaga, S. (2010). *Aplicación del Proceso Fenton y Coagulación - Flocculación Para la Regeneración De Aguas Depuradas*. Recuperado el 23 de noviembre de 2014 de <http://invenio2.unizar.es/record/5122/files/TAZ-PFC-2010-193.pdf>
- Almaguer, J. (2013). *Contaminación de agua por colorantes y propuesta de remediación*. Recuperado el 29 de julio de 2014 de <http://www.cucei.udg.mx/noticia/contaminacion-de-agua-por-colorantes-y-propuesta-de-remediacion>.
- Ambatkar, M. y Mukundan, U. (2014). *Enzymatic decolourisation of Methyl Orange and Bismarck Brown using crude peroxidase from *Armoracia rusticana**. Mumbai, India: Springer, Applied Water Science.
- Arévalo, P. (2011). *Estudio para la reducción de colorantes de las aguas residuales de la industria textil a través de procesos electroquímicos*. Recuperado el 30 de julio de 2014 de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1508/13/UPS-CT002191.pdf>.
- Arroyave, J., Garcés, L. y Mejía, J. (2012). *Empleo del reactivo de Fenton para la degradación del colorante Tartrazina*. Antioquia, Colombia: LASALLISTA de Investigación.
- Arroyave, J., Rodríguez, E., Barón, C. y Moreno, C. (2012). *Degradación y mineralización del colorante rojo punzó empleando el reactivo de Fenton*. Antioquia, Colombia: LASALLISTA de Investigación.
- Asamblea Nacional. (2008). *Constitución del Ecuador de 2008*. Título II Derechos, Capítulo segundo Derechos del buen vivir, Art. 14. Título VII Régimen del Buen Vivir, Capítulo segundo Biodiversidad y recursos naturales. Sección sexta Agua, Art. 411. Ecuador.

- Asamblea Nacional. (1999). *Ley de Gestión Ambiental*. Ley No. 37. Registro Oficial 245 de 30 de Julio de 1999. Título II del Régimen de la Gestión Ambiental. Capítulo IV De la Participación de las Instituciones del Estado. Art. 12. Ecuador.
- Asamblea Nacional. (1999). *Ley de Prevención y Control Ambiental*. Capítulo VI. Ley de Prevención y Control Ambiental de Aguas. Art. 16. Ecuador.
- Bahmani, P., Rezaei, R., Esrafil, A., Gholami, M. y Jonidi, A. (2013). *Evaluation of Fenton oxidation process coupled with biological treatment for the removal of reactive black 5 from aqueous solution*. Tehran, Iran: Journal of Environmental Health Science and Engineering.
- Barbusinski, K. (2009). *Henry John Horstman Fenton- Short Biography and Brief History of Fenton Reagent Discovery*. Recuperado el 28 de julio, 2014.
[http://tchie.uni.opole.pl/freeCDEM/CDEM09/Barbusinski_CDEM09\(1-2\).pdf](http://tchie.uni.opole.pl/freeCDEM/CDEM09/Barbusinski_CDEM09(1-2).pdf)
- Benatti, C. y Tavares, C. (2012). *Fentons Process for the Treatment of Mixed Waste Chemicals*. Maringá, Brasil: Environmental Sciences.
- Blanco, J. (2009). *Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto-Fenton*. Recuperado el 28 de julio, 2014 de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/8325/1/01.pdf>.
- Bouasla, C., Ismail, F. y Samar, M. (2012). *Effects of operator parameters, anions and cations on the degradation of AY99 in an aqueous solution using Fenton's reagent. Optimization and kinetics study*. Annaba, Argelia: Springer, International Journal of Industrial Chemistry.
- Castells, X., García, J., López, M. y Soliva, M. (2012). *Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos: Reciclaje de residuos industriales*. (2.^a ed.). Madrid, España.
- Castro, L. y Durán, E. (2013). *Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada*. Costa Rica: Tecnología en Marcha.
- Cervantes, F. (2008). *Reducción de colorantes azo por distintos grupos microbianos en consorcios anaerobios*. Recuperado el 1 de noviembre de 2014 de

<http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/morelia07/TRABAJOS/Magistrales/M-7.pdf>.

- Chang, R. (2010). *Química*. (10.^a ed.). México D.F., México: Mc. Graw Hill.
- Cui, D., Li, G., Zhao, M. y Song, H. (2014). *Decolourization of azo dyes by a newly isolated Klebsiella sp. strain Y3, and effects of various factors on biodegradation*. China. Taylor & Francis.
- Coello, J. (2011). *Aplicación del Hongo Pleurotus Ostreatus como Alternativa para la Biorremediación de Suelos Contaminados con Metales Pesados*. Recuperado el 10 de diciembre de <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/21150/1/D-92862.pdf>
- Daud, N., Akpan, U. y Hameed, B. (2012). *Decolorization of Sunzol Black DN conc. in aqueous solution by Fenton oxidation process: effect of system parameters and kinetic study*. *Desalination and Water Treatment*. Penang, Malasia: Taylor & Francis.
- Doerner, M. (2005). *Los materiales de pintura y su empleo en el arte*. (6.^a ed.). Barcelona, España: Reverté.
- Domènech, X., Jardim, W. y Litter, M. (2006). *Procesos Avanzados de Oxidación para la Eliminación de Contaminantes*. Recuperado el 28 de julio, 2014 de [http://tchie.uni.opole.pl/freeCDEM/CDEM09/Barbusinski_CDEM09\(1-2\).pdf](http://tchie.uni.opole.pl/freeCDEM/CDEM09/Barbusinski_CDEM09(1-2).pdf)
- Doménech, X., Jardim, W., y Litter, M. (2012). *Tecnologías Avanzadas de Oxidación*. Recuperado el 25 de septiembre de 2014 de <http://horus.psa.es/webeng/solwater/files/CYTED01/06cap01.pdf>
- Donato, N., Marmolejo, R., Lemus, R., Aquino, A., Gaytán, B. y Mijares, E. (2013). *Eliminación de Colorantes de Disoluciones Acuosas Utilizando Sulfato de Quitosano*. Recuperado el 29 de septiembre de 2014 de <http://www.observatorioplastico.com/ficheros/articulos/62008884206030833.pdf>
- Dos Santos, M. y Maier, M. (2010). *Química y color en los textiles*. Recuperado el 27 de noviembre de 2014 de <http://www.fcen.uba.ar/dov/lateral/publicaciones/libros/Libro%20quimica%20y%20textiles.pdf>

- EL TELÉGRAFO. (2009). *Industria del jean afecta al río de Patate*. Hora de publicación 16H29. Recuperado el 3 de mayo del 2015. http://ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=112725&umt=el_telegrafo_guayaquil_industria_del_jean_afecta_al_rio_patate.
- EL TELÉGRAFO. (2013). *Taiwán ofrece asesoría para textileros de Pelileo*. Hora de publicación. Recuperado el 3 de mayo de 2015. <http://www.telegrafo.com.ec/regionales/regional-centro/item/taiwan-ofrece-asesoria-para-textileros-de-pelileo.html>
- Ebrahiem, E.; Mohammednoor, N. y Ahmed, R. (2013). *Removal of organic pollutants from industrial wastewater by applying photo-Fenton oxidation technology*. Riad, Arabia Saudita: Arabian Journal of Chemistry.
- Eslami, A., Moradi, M., Ghanbari, F. y Mehdipour, F. (2013). *Decolorization and COD removal from real textile wastewater by chemical and electrochemical Fenton processes: a comparative study*. Ahvaz, Iran: Springer, Journal of Environmental Health Sciences & Engineering.
- Forero, J., Ortiz, O. y Ríos, F. (2005). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería*. Bucaramanga, Colombia: CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro.
- Frutos, A., Manzano, M. y Quiroga, J. (2012). *Oxidación de azo-colorantes vía reacción foto-Fenton*. Recuperado el 25 de enero de 2015 de <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/444/IQfeb12.pdf>.
- Gamarra, C. y Gómez, A. (2014). *Decoloración del Anaranjado de metilo empleando el sistema Fenton*. Lima, Perú: Revista de la Sociedad Química del Perú.
- Garcés, L., Hernández, M., Peñuela, G., Rodríguez, A. y Salazar, J. (2012). *Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocatalisis*. Antioquía, Colombia: LASALLISTA de Investigación.
- Garcés, G. y Hernández, Á. (2012). *Tratamiento de aguas residuales de la industria textil por medio de luz ultravioleta: una comparación de dióxido de titanio y fenton*. Antioquía, Colombia: LASALLISTA, Journal of Engineering and Technology.

- García, M. (2010). *Tratamiento de aguas residuales industriales*. Bloque III. Tratamientos específicos de vertidos industriales, parte I. Recuperado el 13 de diciembre de 2014 de <http://www.ugr.es/~mgroman/archivos/TARI/teari-1.pdf>
- García, D., Trevilla, J. y Buitrón, G. (2010). *Tratamiento de colorantes azo con procesos fotocatalíticos*. Queretaro, México: Revista científica AIDIS.
- Godínez, R. y Bernal, A. (2014). *Decoloración de un efluente textil proveniente de una industria por los procesos Fenton y foto-Fenton*. Recuperado el 23 de abril de 2015 de http://concyteg.gob.mx/resources/reportesVerano2014/ROSAURA%20GOD_NEZ%20P%C3%89REZ.pdf
- González, L. y Escamilla, E. (2008). *Biodegradación Anaerobia de Colorantes Azoicos Textiles usando Carbón Activado*. Querétaro, México: Bio Tecnología.
- González, K., Quesada, I., Julcour, C., Delmas, H., Cruz, G. y Jáuregui, U. (2010). *El empleo del ultrasonido en el tratamiento de aguas residuales*. Habana, Cuba: Revista CENIC, Ciencias Químicas.
- Grekova, M. y Topalova, T. (2009). *Biological Algorithms for Textile Wastewater Management*. Sofia, Bulgaria: Taylor & Francis, Biotechnology & Biotechnological Equipment.
- Guarín, C. y Mera, A. (2011). *Fotocatálisis heterogénea con TiO₂ para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol*. Medellín, Colombia: Revista Scielo de Ingenierías Universidad de Medellín.
- Hilal, N. (2011). *Treatment of Reactive Dyeing Wastewater by Different Advanced Oxidation Processes*. Cairo, Egipto: Pelagia Research Library.
- Iglesias, F., Romero, A. y Santos, A. (2011). *Aplicación de agua oxigenada para la remediación de suelos contaminados*. Recuperado el 27 de noviembre de 2014 de http://pendientedemigracion.ucm.es/info/otri/cult_cient/infocientifica/descargas/201109_01not.pdf
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2012). *Encuesta de Información Ambiental Económica en Empresas 2012*. Recuperado el 22 de

septiembre de 2014 de
http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Empresas_Privadas/Presentacion_Empresas.pdf

Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud. (2014). *Lista Negra de ISTAS*. Recuperado el 22 de octubre de 2014 de http://www.istas.net/risctox/dn_risctox_ficha_sustancia.asp?id_sustancia=959606

IRO Group Limited. (2014). Color calculator. *EasyRGB*. Recuperado el 13 de abril de 2015 de <http://www.easyrgb.com/index.php?X=CALC#Result>.

Jiménez, T. (2012). *Decoloración de efluentes textiles que contienen colorantes reactivos empleando extracto de alcachofa*. Antioquía, Colombia: LASALLISTA, Producción + Limpia.

Jonnalagadda, S. y Nadupalli, S. (2014). *Chlorine Dioxide for Bleaching, Industrial Applications and Water Treatment*. KwaZulu-Natal, South Africa: Taylor & Francis.

Kalra, S., Mohan, S., Sinha, A. y Singh, G. (2011). *Advanced Oxidation Processes for Treatment of Textile and Dye Wastewater: A Review*. Dhanbad, India: IPCBEE.

Khandelwal, D. y Ameta, R. (2013). *Use of Photo-Fenton Reagent in the degradation of Basic Yellow 2 in Aqueous Medium*. Rajasthan, India: Research Journal of Recent Sciences.

Kos, L., Michlaska, K. y Perkowski, J. (2010). *Textile Wastewater Treatment by the Fenton Method*. Bielsko-Biała, Poland: FIBERS & TEXTILES in Eastern Europe.

Kos, L., Michalska, K., Żyła, R. y Perkowski, J. (2011). *The application of Fenton's reagent and iron nanocompounds in textile wastewater treatment*. Łódź, Poland: 12th International Conference on Environmental Science and Technology.

Kos, L., Michalska, K., Żyła, R. y Perkowski, J. (2012). *Effect of acetic acid on pollutant decomposition in textile wastewater treated by the fenton method*. Łódź, Poland: Environment Protection Engineering.

Kwon, J., Lee, H., Kwon, J., Kim, K., Park, E, Kang, M. y Kim, Y. (2008). *Mutagenic activity of river water from a river near textile industrial*

- complex in Korea*. Recuperado el 2 de octubre de 2014 de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17882525>.
- Lee, I., Neefus, J., Strother, J. y Niyogi, A. (2009). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. Recuperado el 18 de octubre de 2014 de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/89.pdf>.
- Levi Straus & Co. (2013). *Lista de Sustancias Restringidas ("LSR")*. Recuperado el 22 de octubre de 2014 de <http://levistrauss.com/wp-content/uploads/2014/03/2013-November-RSL-Spanish.pdf>.
- Lokúan, F. (2012). *La Industria Textil y su Control de Calidad*. V. Tintorería. Recuperado el 29 de septiembre de 2014 de <https://archive.org/details/V.LITYSCDC>.
- Maldonado, N. y Molina, R. (2011). *Estudio para la reducción de colorantes de las aguas residuales de la industria textil a través de métodos electroquímicos*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014 de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1508/13/UPS-T002191.pdf>.
- Marín, B. y Romero, I. (2009). *Manual de química: teoría y práctica*. Santa Marta, Colombia: Editorial de la Universidad del Magdalena.
- Martínez, A., Olivares, C., Lozada, A. y Ramírez, C. (2010). *Contaminación generada por colorantes de la industria textil*. Recuperado el 2 de octubre de 2014 de <http://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>.
- Mathur, N.; Krishnatrey, R.; Sharma, S. y Sharma, K. (2003). *Toxic effects of textile printing industry effluents on liver and testes of albino rats*. Jaipur, India: Bull Environ Contam Toxicol.
- Menéndez, A. (2008). *Decoloración de aguas contaminadas por colorantes mediante la aplicación de la tecnología de oxidación avanzada basada en la combinación de radiación ultravioleta y peróxido de hidrógeno*. Recuperado el 29 de julio de 2014 de http://www.ehu.es/cdsea/web/revista/numero_2/forum_sost_2_101-109.pdf.

- Meriç, S., Lofrano, G. y Belgiorno, V. (2005). *Treatment of reactive dyes and textile finishing wastewater using Fenton's oxidation for reuse*. International Journal Environment and Pollution: Salerno, Italia.
- Ministerio de Ambiente. (2002). Libro VI. Anexo 1. Norma de calidad ambiental y descargas de efluentes: recurso agua. Tabla 11: Límites de descarga al sistema de alcantarillado, Tabla 12: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce y Tabla 13: Límites de descarga a un cuerpo de agua marina. Ecuador.
- Ministerio del Ambiente. (2008). *Acuerdo Ministerial N°026 Registro de Generadores de Desechos Peligrosos*. Ecuador.
- Ministerio del Ambiente. (2013). *Estudio de Potenciales Impactos Ambientales y Vulnerabilidad Relacionada con las Sustancias Químicas y Tratamiento de Desechos Peligrosos en el Sector Productivo del Ecuador*. Recuperado el 22 de octubre de 2014 de www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/PART11.pdf.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial N°061 Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria*. Art. 209 y 211. Quito, Ecuador.
- Moreno, A., Figueroa, D. y Hormaza, A. (2013). *Adsorción de azul de metileno sobre cascarilla de arroz*. Antioquía, Colombia: Corporación Universitaria Lasallista, Producción + Limpia.
- Muñoz, A. (2011). *Proceso Fenton y Foto-Fenton para la remoción de fenoles generados en una planta de celulosa Kraft*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014 de http://www.tede.ufv.br/tedesimplificado/tde_arquivos/54/TDE-2012-02-03T081202Z-3547/Publico/texto%20completo.pdf.
- Neamtu, M., Yediler, A., Siminiceanu, I. y Kettrup, A. (2003). *Oxidation of comercial reactive azo dye aqueous solutions by the photo-Fenton and Fenton-like processes*. Alemania: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.
- Nguyen, V. y Nguyen, B. (2007). *Investigation on basic blue 41 dye degradation by fenton reaction*. Hanoi, Vietnam: VNU Journal of Science, Natural Sciences and Technology.

- Ohura, S., Harada, H., Shiki, M., Kawakita, H. y Biswas, B. (2012). *Decoloration of Acid Red 88 Using Synthetic-Zeolite-Based Iron as a Heterogeneous Photo-Fenton Catalyst*. Environment and Pollution.
- Osorio, F., Torres, J. y Sánchez, M. (2010). Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes. (1.ªed.). Granada, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Patel, R. y Patel, R. (2013). *Treatment of Dye Intermediate Waste-Water by Fenton and Electro-Fenton Treatments*. Gujarat, India: International journal of reasearch in modern engineering and emerging technology.
- Patil y Raut. (2014). *Treatment of textile wastewater by Fenton's process as an Advanced Oxidation Process*. Kolhapur, India: Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology.
- Presidente de la República. (2003). Decreto Ejecutivo N°3516 Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente. Registro Oficial Suplemento #2 publicado el 31 de marzo de 2003.
- Punzi, M., Mattiasson, B. y Jonstrup, M. (2012). *Treatment of synthetic textile wastewater by homogeneous and heterogeneous photo-Fenton oxidation*. Lund, Suecia: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.
- Quintero, L. y Cardona, S. (2009). *Tecnologías para la Decoloración de Tintes Índigo e Índigo Carmín*. Medellín, Colombia: Scielo, Escuela de Geociencia y Medio Ambiente.
- Rahman, M., Hasnat, M. y Sawada, K. (2009). *Degradation of commercial textile dye by fentons reagent under xenon beam irradiation in aqueous medium*. Bangladesh: Journal of Scientific Research.
- Rao, D., Senthilkumar, R., Byrne, J. y Feroz, S. (2013). *Wastewater Treatment: Advanced Processes and Technologies*. (1.ªed.) Londres, Inglaterra: IWA Publisihng.
- Rehman, A., Bhatti, H. y Rehman, H. (2008). *Textile effluents affected seed germination and early growth of some winter vegetable crops: a case study*. Multan, Pakistan: Springer Science + Business Media.
- Reinoso, F. (2004). *Diagnóstico y Análisis del Proceso de Lavado Posterior a la Tintura con Colorantes Reactivos por Agotamiento Sobre Tejidos de Punto de Algodón 100% en la Ciudad de Quito*. Recuperado el 16 de

- octubre de 2014 de
http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/5811/1/22551_1.pdf.
- Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., y Sanz, J. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid, España: Vtmi+d.
- Rodríguez, S. y Geissler, G. (2011). *Minimización de Contaminantes en Efluentes Textiles con Reacción Fenton Modificada Usando Clinoptilolita Como Soporte de Iones De Hierro*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014 de http://www.uaemex.mx./Red_Ambietnales/docs/congresos/MORELOS/Extensos/TA/EO/TAO-41.pdf.
- Rojas, J., Giraldo, L. y Trujillo, J. (2009). *Empleo del reactivo de Fenton para la degradación del colorante Tartrazina*. Antioquia, Colombia: Revista Lasallista de Investigación.
- Romero, J. (2009). *Calidad del Agua*. Capítulo 5 Coagulación química del agua. (3.ªed.). Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Roy, A. (2013). *Green chemistry and the textile industry*. Textile Progress. West Bengal, India: Taylor & Francis.
- Ruíz, Á. y Garcés, L. (2012). *Remoción del colorante azoico amaranto de soluciones acuosas mediante electrocoagulación*. Antioquia, Colombia: Lasallista de Investigación.
- Sahunin, C., Kaewboran, J. y Hunsom, M. (2006). *Treatment of Textile Dyeing Wastewater by Photo Oxidation using UV/H₂O₂/Fe²⁺*. Bangkok, Thailand: Reagents. ScienceAsia.
- Salas, G. (2010). *Tratamiento por Oxidación Avanzada (Reacción Fenton) De Aguas Residuales De La Industria Textil*. Lima, Perú: Revista Peruana de Química e Ingeniería Química.
- Santos, M. y Maier, M. (2010). *Química y color en los textiles*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA). Recuperado el 28 de noviembre de 2014 de <http://www.fcen.uba.ar/dov/lateral/publicaciones/libros/Libro%20quimica%20y%20textiles.pdf>.
- Serrano, P. y Zárata, O. (2012). *Daños Causados Por Los Colorantes Textiles En La Salud*. Benemerita Universidad Autónoma De Puebla.

- Recuperado el 3 de diciembre de 2014 de www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/654567.pdf
- Siedlak, D. (2013). *Documento/ Manual de Química*. Recuperado el 26 de septiembre de 2014 de <http://www.afirm-group.com/wp-content/uploads/2013/07/Apendice-F-Manual-de-Guia-Quimica.pdf#page=1&zoom=auto,-81,848>.
- Singh, M. (2014). *Microbial Degradation of Synthetic Dyes in Wastewaters*. Suiza: Springer, Environmental Science.
- Sohrabia, M., Khavarana, A., Shariatib, S. y Shariatic, S. (2014). *Removal of Carmoisine edible dye by Fenton and photo Fenton processes using Taguchi orthogonal array design*. Tehran, Iran: Arabian Journal of Chemistry.
- Soto, A., Gil, M., Jiménez, T., Usma, J., Gutiérrez, O. & Sánchez, G. (2011). *Comparación en la decoloración del efluente proveniente de la industria textil de un municipio antioqueño empleando extracto de alcachofa con actividad peroxidasa y peróxido de hidrogeno*. Antioquía, Colombia: Lasallista, Producción + Limpia.
- Sulaka, M. y Yatmaz, C. (2012). *Removal of textile dyes from aqueous solutions with eco-friendly biosorbent*. Karabuk, Turquía: Taylor & Francis, Desalination and Water Treatment.
- Sundararaman, T., Ramamurthi, V. y Partha, N. (2009). *Decolorization and COD Removal of Reactive Yellow 16 by Fenton Oxidation and Comparison of Dye Removal with Photo Fenton and Sono Fenton Process*. India: Department of Chemical Engineering.
- Surana, M., Mehta, P., Pamecha, K. y Kabra, B. (2011). *Treatment of water contaminated with Reactive Red 198 (RR198) by Photo-Fenton Reagent*. Rajasthan, India: Pelagia Research Library.
- Tinoco, Ó., Campos, C., Sánchez, L., Salvador, B., Reyna, J. y Medina, A. (2010). *Tratamiento de efluentes textiles con energía solar*. Recuperado el 29 de septiembre de 2014 de <http://industrial.unmsm.edu.pe/archivos/investigacion/proyectos/101701045.pdf>.

- Torres, L., Juárez, I. y García, X. (2010). *Semiconductores tipo perovskita en procesos fotoindicadores para la purificación de agua*. Logroño, La Rioja: Dialnet, Ingenierías.
- Ugsha, M. y Llerena, E. (2013). *Aplicación del proceso Fenton en la disminución de materia orgánica en aguas residuales de la industria termoeléctrica*. Quito, Ecuador: Química Central.
- Unión Europea. (2011). *El agua es la vida: La Directiva marco sobre aguas contribuye a proteger los recursos de Europa*. Luxemburgo.
- Villacreces, L. (2013). *Aplicación de oxidación química tipo fenton asistida con detergente para tratamiento de suelos contaminados con petróleo*. Recuperado el 5 de diciembre de 2014 de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7802/1/T-ESPE-047460.pdf>.
- Villegas, M. (2007). Purificación del agua. Capítulo 3. Análisis físicos, químicos y bacteriológicos. (2.^a ed.). Bogotá, Colombia. Editorial Escuela colombiana de Ingeniería.
- Westland, S. (2010) *¿Qué es el espacio de color CIE L*a*b?* Recuperado el 13 de diciembre de 2014 de http://www.gusgsmx.com/espacio_color_cie_lab.
- World dye variety. (2012). *Reactive dyes*. Publicado el 15 de marzo de 2012. Recuperado el 11 de noviembre de 2014 de <http://www.worlddyevariety.com/category/reactive-dyes/>.
- Young-O, K., Hai-Uk, N., Yu-Ri, P., Jong-Hyun, L., Tae-Joo, P. y Tae-Ho, L. (2004). *Fenton Oxidation Process Control Using Oxidation-reduction Potential Measurement for Pigment Wastewater Treatment*. Korea: Journal Chemistry, Engineering.

ANEXOS

Anexo 1. Marco legal del Ecuador para descarga de efluentes industriales

A: Constitución del Ecuador 2008

Título II Derechos, Capítulo segundo Derechos del buen vivir

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano...y es de interés público la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados

Título VII Régimen del Buen Vivir, Capítulo segundo Biodiversidad y recursos naturales. Sección sexta Agua

Art. 411.- El Estado garantiza la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos....

B: Ley de Gestión Ambiental

Art. 12.- Son obligaciones de las instituciones del Estado del Sistema Descentralizado de Gestión Ambiental en el ejercicio de sus atribuciones y en el ámbito de su competencia, las siguientes:...b) Ejecutar y verificar el cumplimiento de las normas de calidad ambiental, de permisibilidad...e) regular y promover la conservación medio ambiente...

C: Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental

Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental de Aguas

Art.16.- Queda prohibido descargar, sin sujetarse a las correspondientes normas técnicas y regulaciones, a las redes de alcantarillado, ríos...

D: Decreto N° 3516 Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente Ministerio del Ambiente del 2003. Título IV Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental
Capítulo I Normas Generales Sección I

Art. 41.- Ámbito.- El presente Título, establece los siguientes aspectos:

a) Las normas aplicables a impactos ambientales negativos de actividades... según el CIIU...

b)...Límites permisibles de emisión...

c) Los criterios de calidad de agua...

Art. 42.- Objetivos Específicos

a) Determinar los límites permisibles para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado...

b) Establecer criterios de calidad y remediación...

Art. 43.- Regulados ambientales.- Todos los individuos que realicen actividades potenciales de afectar la calidad de los recursos agua...

Sección II De los Permisos de Descargas, Emisiones y Vertidos

Art. 92.-Permisos de Descargas y Emisiones.- instrumento administrativo que permita la descarga bajo los parámetros de las normas técnicas...

Art. 95.- Requisitos.-debe seguir el procedimiento de los literales a-d) por ejemplo a) declarar o reportar sus descargas, emisiones y vertidos...

E: Acuerdo Ministerial N° 061 Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria

Capítulo VIII. Calidad de los Componentes Bióticos y Abióticos. Sección III
Calidad de Componentes Abióticos. Párrafo I

Art.209, De la calidad del agua: ... Toda actividad antrópica deberá realizar las acciones preventivas necesarias para no alterar y asegurar la calidad y cantidad de agua de las cuencas hídricas, la alteración de la composición físico-química y biológica de fuentes de agua por efecto de descargas y vertidos líquidos...

Art.211, Tratamiento de aguas residuales urbanas: ... Las actividades productivas, se sujetarán a lo dispuesto en el presente Libro y a la normativa técnica que para el efecto emita la Autoridad Ambiental Nacional...

F: Acuerdo Ministerial N° 026 Registro de Generadores de Desechos Peligroso

6.6. Formatos para la solicitud de registro para el generador de desechos peligrosos.

El Ministerio del Ambiente a través de la Dirección de Control y Prevención de la Contaminación (Quito) y la Subsecretaría de Gestión Ambiental Costera (Guayaquil) de proporcionará los formularios de solicitud a las Autoridades Ambientales Aplicación y a los generadores para la aplicación del presente procedimiento...

6.9 Formularios para la solicitud de licenciamiento ambiental para el prestador de servicios de manejo de desechos peligrosos

El Ministerio del Ambiente a través de la Dirección de Prevención y Control de la Contaminación y la Subsecretaría de Gestión Ambiental Costera proporcionará los formularios de solicitud de manejo para ... generadores para la aplicación del presente procedimiento...

G: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua Libro VI Anexo 1: Tabla 11,12 y 13.

G.1: Límites de descarga al sistema de alcantarillado público

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
			caudal promedio horario del sistema de alcantarillado.
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	1,0
Cobalto total	Co	mg/l	0,5
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo (ECC)	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,2
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅ .	mg/l	250
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	500
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Fósforo Total	P	mg/l	15
Hierro total	Fe	mg/l	25,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20

G.2: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

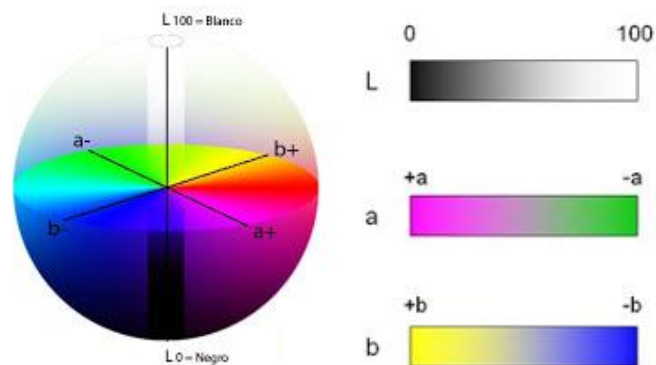
Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aldehídos		mg/l	2,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	Nmp/100 ml		⁸ Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	* Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅ .	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250

G.3: Límites de descarga a un cuerpo de agua marina

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Coliformes Fecales	nmp/100 ml		⁹ Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	* Inapreciable en dilución: 1/20
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,2
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅ .	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250
Fósforo Total	P	mg/l	10
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo.	TPH	mg/l	20,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,01
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno Total kjedahl	N	mg/l	40
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,5
Potencial de hidrógeno	pH		6-9

Anexo 2. Gráfica de color del método colorimétrico CIE Lab 1976

Tomado de Westland, 2010



Anexo 3. Uso de la técnica de programación de color EasyRGB de 2014

Tomado de IRO Group Limited, 2014

Color calculator

Converts color data to different color standards (RGB, CMYK, L*ab, L*ch, L*uv, Hunter, XYZ etc.).
Looking for color math or specific conversion formulas? Check our [math page](#) for some practical examples.

Select your data color space...

Insert your color data here... Data #1 #2 #3

Only for CMYK data... K

Select the illuminant...

Select the observer...

→

RGB 0÷255	RGB 0÷FF	RGB 0÷1	XYZ	CMY 0÷1	CMYK %
255.00 R	FF R	1.00000 R	93.760 X	0.00000 C	0.000 C
253.25 G	FD G	0.99313 G	98.712 Y	0.00687 M	0.687 M
243.58 B	F4 B	0.95520 B	99.361 Z	0.04480 Y	4.480 Y
					0.000 K

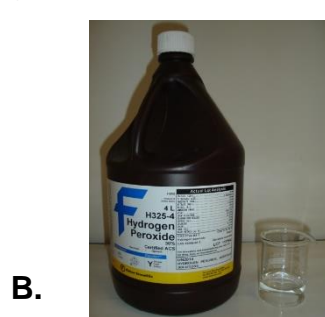
CIE-L*ab	CIE-L*Ch	CIE-L*uv	Yxy (Y=LRV)	Hunter-Lab
99.500 L*	99.500 L*	99.500 L*	98.712 Y	99.354 L
0.300 a*	4.211 C*	3.135 u*	0.32128 x	-5.421 a
4.200 b*	85.914 H°	6.330 v*	0.33825 y	10.254 b

HTML

Web-Safe

→ Get commercial tints
→ Get color harmonies

Anexo 4. Reactivos empleados en para el Reactivo Fenton: A. Sulfato ferroso heptahidratado y B. Peróxido de hidrógeno 30%



Anexo 5: Equipos empleados en el trabajo de titulación: A. Balanza analítica, B. Potenciómetro, C. Agitador, D. Espectrofotómetro, E. Bomba de vacío, F. Equipo de filtración (embudo, pinzas, base de vidrio y bomba de vacío), G. Test de jarras, H. Fotómetro e I. Digestor



A.



B.



C.



D.



E.



F.



G.



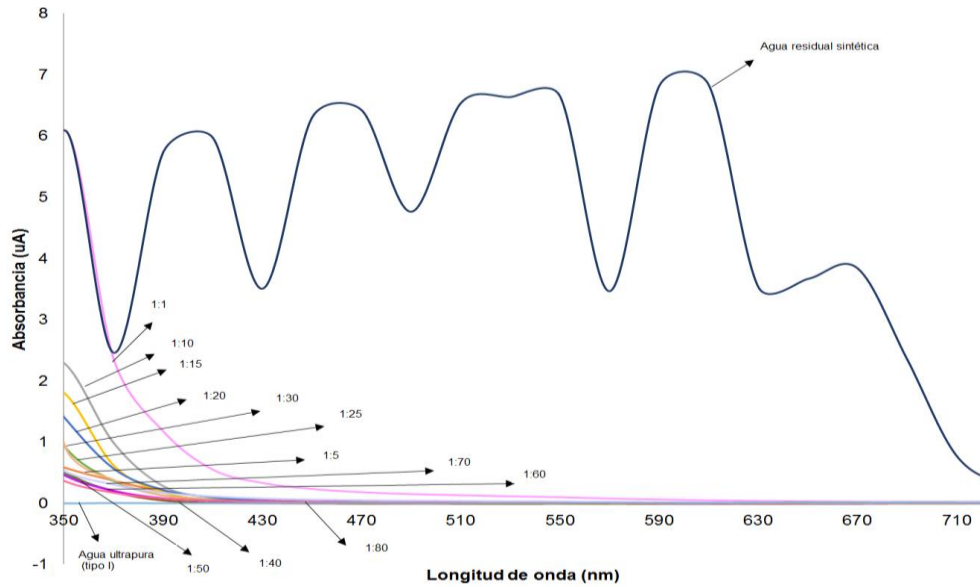
H.



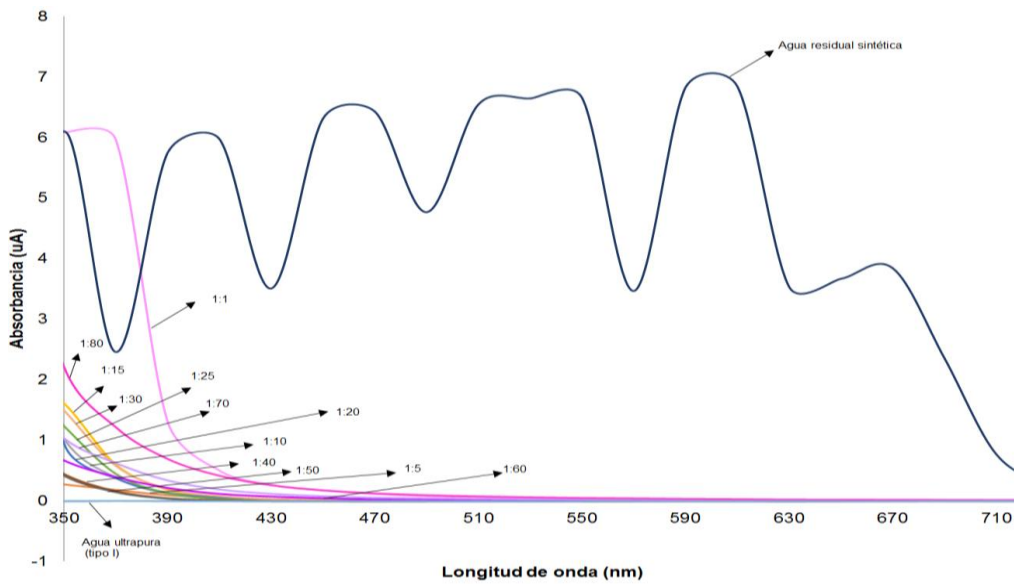
I.

Anexo 6. Absorbancia de las muestras tratadas con reactivo Fenton

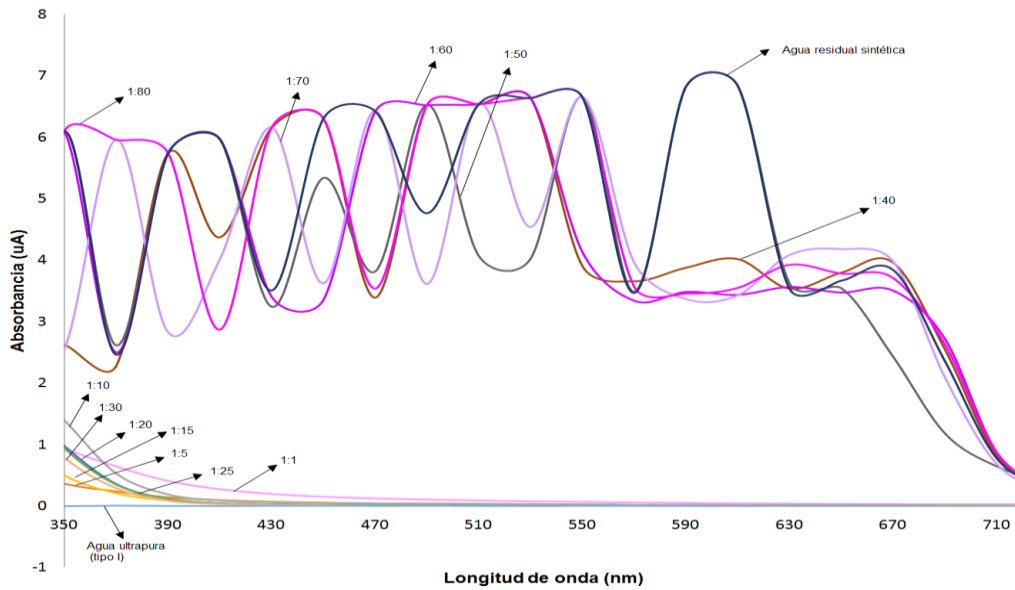
A. Absorbancia de 12 tratamientos con dosis de 1:1-1:80 moles. Condiciones ácidas a pH 3,5. Tiempo de reposo 24 horas



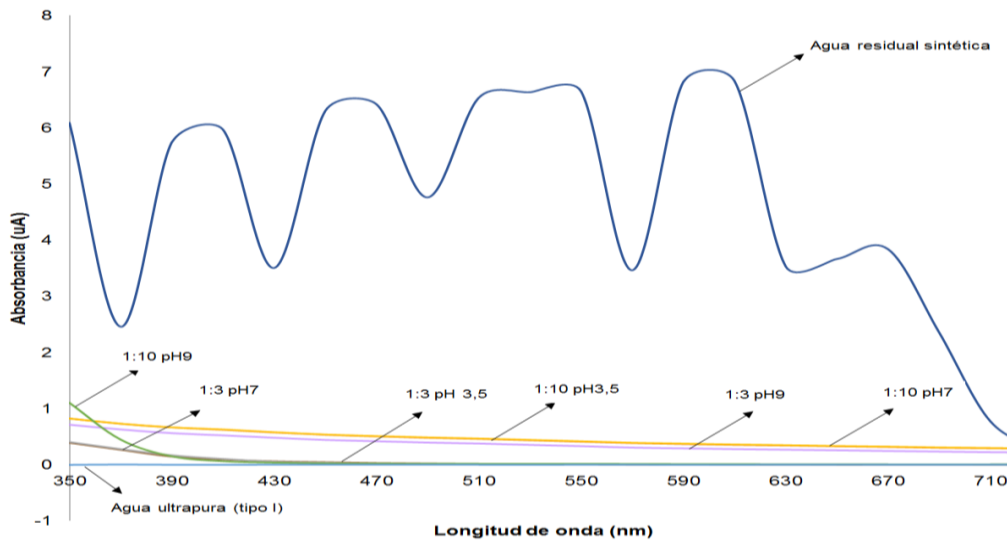
B. Absorbancia de 12 tratamientos con dosis de 1:1-1:80 moles. pH neutro de 7,0. Tiempo de reposo 24 horas



C. Absorbancia de 12 tratamientos con dosis de 1:1-1:80 moles. Medio básico a pH 9,0. Tiempo de reposo 24 horas



D. Absorbancia de tratamientos de oxidación con Reactivo Fenton, Peróxido de hidrógeno al 30% y Cloro. Tiempo de reposo 3 horas



E. Absorbancia de tratamientos de oxidación con Reactivo Fenton, Peróxido de hidrógeno al 30% y Cloro. Tiempo de reposo 24 horas

