



# DEGRADACIÓN DE COLORANTES EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A PARTIR DE LA REACCIÓN FENTON<sup>1</sup>

Dyes degradation in wastewater from  
the textile industry from the Fenton reaction

*M. Quintero<sup>2</sup>, J. A. Rodríguez<sup>3</sup> y H. Reyes<sup>4</sup>*

- 
- 1 Producto derivado del proyecto de investigación “DEGRADACIÓN DE COLORANTES EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A PARTIR DE LA REACCIÓN FENTON”. Presentado por el Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales, de la Universidad del Quindío. Como requisito para obtener el título de Magister en Química.
  - 2 M. Quintero docencia en el Departamento del Quindío, estudiante de doctorado en Ciencias de la universidad DEL QUINDÍO, Armenia (Colombia); mquinteror\_3@uqvirtual.edu.co; mquinter@crystal.com.co
  - 3 J. A. Rodríguez docente de la universidad del Quindío; <https://orcid.org/0000-0001-7475-1662>; jarodriguez@uniquindio.edu.co
  - 4 H. Reyes docente de la universidad del Quindío; <https://orcid.org/0000-0003-3524-8658>; hreyes@uniquindio.edu.co

## Resumen

Se plantea una solución tanto a la problemática de seguridad industrial y de mejoramiento a los procesos ambientales en las industrias textiles. El objetivo de este trabajo fue degradar colorantes en aguas residuales provenientes de la industria textil a partir de la reacción Fenton. Para ello se realizó la toma de muestra en condiciones reales de operación, en el tanque de homogenización de la planta de tratamiento de aguas residuales de Industrias Printex S.A.S. Se utilizó un floculador de 6 puestos; encontrando como dosis óptima una concentración de 570 ppm de hierro y 38 ppm de peróxido de hidrogeno, valor encontrado mediante el programa STATGRAPHICS con el diseño 2k de superficies de respuesta. Se comparó el tratamiento actual y el tratamiento propuesto realizando una ANOVA multifactorial con los datos recolectados al aplicar el tratamiento en tres (3) tanques diferentes, encontrando que es más eficiente el tratamiento propuesto (Fenton).

## Palabras clave

Agua residual, colorantes, Fenton.

## Abstract— Intructions

A solution is proposed to both the problems of industrial safety and improvement of environmental processes in the textile industries. The objective of this work was to degrade dyes in waste water from the textile industry from the Fenton reaction. For this, the sample was taken under real operating conditions, in the homogenization tank of the wastewater treatment plant of Industrias Printex S.A.S. A 6-position flocculator was used; Finding as an optimal dose a concentration of 570 ppm of iron and 38 ppm of hydrogen peroxide, a value found through the STATGRAPHICS program with the 2k design of response surfaces. We compared the current treatment and the proposed treatment by performing a multifactorial ANOVA with the data collected when applying the treatment in three (3) different tanks, finding that the proposed treatment (Fenton) is more efficient.

## Keywords

Waste water, colorants, Fenton

## I. INTRODUCCIÓN

La presencia de colorantes en los cuerpos de agua tiene graves consecuencias ambientales. Por un lado, dificultan la difusión del oxígeno y la luz al tiempo que producen un aspecto antiestético, y por otro son considerados como persistentes en el ambiente debido a su naturaleza química; además, algunos de sus precursores o subproductos son cancerígenos.

Dentro de los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales, se encuentra la degradación de colorantes, donde se utiliza como insumo el cloro; siendo éste el insumo químico que representa mayor riesgo tanto para el personal que labora en la empresa y sus alrededores, como para el medio ambiente; se buscó una alternativa diferente para realizar el proceso de degradación de colorantes de las aguas residuales industriales.

El proceso Fenton ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, fenoles. Son muy pocos los compuestos que no pueden ser atacados por este reactivo; entre ellos la acetona, o el ácido acético [García-Montaña 2007, Pignatello et al. 2006, Parag et al. 2004, Vogelpohl et al. 2004]. Se ha aplicado exitosamente para la reducción de la DQO de aguas municipales y subterráneas y en el tratamiento de efluentes de lixiviados de vertederos municipales y empresas papeleras y textiles. [Papadopoulos et al., 2007; Rodrigues et al., 2009].

El reactivo de Fenton es una mezcla de peróxido de hidrógeno e ion ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) que produce el radical libre hidroxilo ( $\text{HO}^\cdot$ ) y el ion férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). [TRAGUA, 2012].

El radical libre hidroxilo es la especie oxidante primaria, formada por la descomposición del peróxido de hidrógeno, catalizada por  $\text{Fe}^{2+}$  en ausencia de agentes quelatantes del ion ferroso. Es el segundo agente oxidante después del flúor ( $\text{HO}^\cdot$ ,  $E_0 = -2.8 \text{ V vs. flúor}$ ,  $E_0 = -3.0 \text{ V}$ ), y es capaz de realizar oxidaciones no específicas de algunos compuestos orgánicos. Cuando se genera una concentración suficiente de radical libre hidroxilo y otros radicales, las reacciones de oxidación de los compuestos orgánicos pueden llegar hasta una total mineralización. [Zazo, 2004].

Teniendo en cuenta lo anterior, se propuso desarrollar un proyecto de investigación, donde se evaluará otra alternativa como el Fenton, que permita mejorar la degradación de colorantes en las aguas residuales industriales y eliminar el uso de cloro en dicho proceso. Evitando que a los recursos hídricos lleguen compuestos orgánicos de difícil degradación, muchos de ellos tóxicos, como es el caso de algunos colorantes. Esto permitirá que las plantas de potabilización capten aguas de más fácil tratamiento, y la fauna y flora acuáticas corran menos peligro de extinción.

## II. DESARROLLO DEL DOCUMENTO

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones de planta de tratamiento de aguas residuales industriales de la empresa Industrias Printex S.A.S.

### A. Diseño experimental

El diseño experimental usado para determinar la dosis óptima del reactivo Fenton fue un diseño factorial  $2^k$ ; donde se tienen  $k$  factores, cada uno con solo dos niveles que para este caso son cuantitativos (concentración de sulfato ferroso heptahidratado y concentración de peróxido); la variable a estudiar es el color, teniendo en cuenta que es lo que se busca es degradar. Los resultados se procesaron estadísticamente con un nivel de confianza del 95% y se construyeron superficies de respuesta.

Para evaluar el comportamiento del Fenton se tomaron tres tanques diferentes, se realizaron pruebas por triplicado y se compararon con el tratamiento usado actualmente (cloro). Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente mediante un análisis de varianza - ANOVA multifactorial al 95% de confianza estadística para las variables DQO y color real. Para determinar diferencias entre tanques y comparar los dos tratamientos (proceso convencional y Fenton).

### B. Toma de muestra

Se toman muestras en condiciones reales de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales. Para el caso específico la planta cuenta con dos tanques de homogenización los cuales operan por baches; de

esta forma la muestra es tomada una vez el tanque está lleno y justo antes de realizar el proceso de cloración.

Las muestras fueron tomadas, preservadas, transportadas y analizadas de acuerdo con lo establecido en los métodos estándar de análisis de aguas, ed. 22. [APHA. 2013].

### **C. Determinación de Color Real**

La medición de color se llevó a cabo en un espectrofotómetro Hewlett packard 8453, de acuerdo con lo establecido en la ISO 7887:2011 [ISO, E. (2012)], en cumplimiento a los requisitos de la resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Los análisis realizados en el laboratorio LAIMAQ S.A.S., ubicado en la ciudad de Armenia, Q.

### **D. Determinación de pH y Temperatura**

La determinación de pH y temperatura se realizó con un potenciómetro HACH sensION + 5059 portátil, electrodo de múltiples parámetros: pH, conductividad y temperatura.

### **E. Determinación de la DQO**

Los análisis de DQO se realizaron por el método de reflujo cerrado. Los equipos utilizados fueron el Termorreactor Spectroquant® serie TR, MERCK. Modelo TR320.

### **F. Determinación de la dosis óptima del reactivo Fenton**

Con el fin de determinar las condiciones de tratamiento, tales como: la concentración del reactivo de hierro y del agente oxidante, se realizaron pruebas variando cada uno de estos parámetros. Los ensayos se efectuaron a pH <5, teniendo en cuenta que es el valor al cual se encuentra el agua en los tanques de homogenización y evitar el incremento de costos por adición de ácidos. Los reactivos utilizados para el tratamiento fueron: peróxido de hidrógeno y sulfato de ferroso heptahidratado.

**Tabla I** - Concentraciones utilizadas  
para determinar la dosis óptima de Fe(II) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Concentración sulfato ferroso heptahidratado (ppm)	[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] (ppm)
50	15
250	15
450	15
650	15
850	15
50	25
250	25
450	25
650	25
850	25
50	35
250	35
450	35
650	35
850	35
50	45
250	45
450	45
650	45
850	45
50	55
250	55
450	55
650	55
850	55
50	65
250	65
450	65
650	65
850	65

Los tiempos y las velocidades se tomaron de acuerdo con las condiciones de operación actuales de la planta.

**Tabla II** - Condiciones iniciales del agua en el tanque de homogenización

Tanque	pH (UN)	Temperatura (°C)	Color real (m <sup>-1</sup> )		
			436 nm	525 nm	620 nm
1	4.71	35	5,6148	8,1627	5,0651

**G.** Aplicación de la dosis optima en tres tanques y comparación con el proceso convencional.

Se realizan pruebas por triplicado con la dosificación encontrada a 3 tanques diferentes, para de determinar diferencias entre tanques. Adicionalmente, se toman muestras por triplicado de la misma agua tratada con cloro.

**Tabla III** - Condiciones iniciales del agua en cada tanque de homogenización

Tanque	pH (UN)	Temp. (°C)	DQO (mg/L)	Color real (m <sup>-1</sup> )		
				436 nm	525 nm	620 nm
1	4,98	35	435	11,835	8,8813	8,2617
2	4,93	35	605	26,459	22,342	20,517
3	5,00	35	534	79,471	70,215	64,306

**H.** Prueba de dosis mínima y escalamiento a las condiciones reales de la planta de tratamiento

Se observa que con dosis bajas también se genera degradación de color en altos porcentajes; es de anotar que a mayor dosis el costo se hace más alto por tal razón se decide montar una prueba en planta usando dosis mínimas de sulfato ferroso heptahidratado y peróxido, que permita igualar la degradación de color que se lleva a cabo con el proceso convencional y a su vez genere menor impacto tanto ambiental como de riesgo ocupacional.

Al verificar que la prueba funciona en la jarra, se realizaron los cálculos matemáticos para dosificar en el tanque de homogenización y se aplicó el proceso en planta.

Se realizó medición de pH, DQO y color, tanto al agua antes y después del tratamiento con Fenton.

## I. Optimización de la formulación del reactivo Fenton

En la Fig. 1, se observa el equipo usado para realizar las pruebas y los elementos usados para la toma de muestras que posteriormente se analizaron. También, se puede observar visualmente la degradación del color.



**Fig. 1.** Equipo de jarras usado para llevar a cabo la reacción

La optimización del diseño experimental de superficie de respuesta indicó las concentraciones óptimas de sulfato ferroso heptahidratado y peróxido que dan como resultado la menor absorbancia, la cual está directamente relacionada con el menor valor de color. Para el análisis de datos se utilizó el software (Statgraphics Centurión XVI).

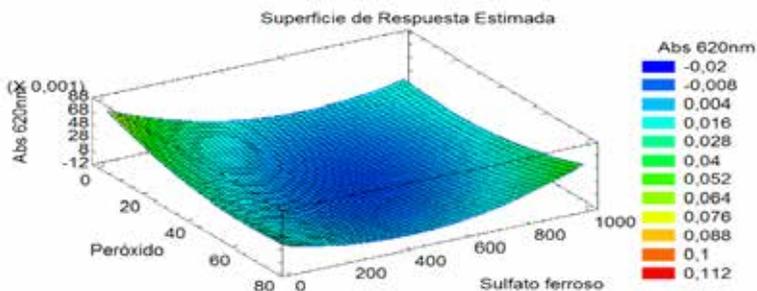
**Tabla IV** Valores óptimos de concentraciones de sulfato ferroso heptahidratado y peróxido

Longitudes de onda	436 nm	525 nm	620 nm	Promedios
$[H_2O_2]$ (ppm)	34	37	41	38
Concentración sulfato ferroso heptahidratado (ppm)	595	583	536	571

Los parámetros óptimos de concentración de sulfato ferroso heptahidratado y peróxido, para obtener una mayor degradación del color medido a 436 nm es 595:34; para el color medido a 525 nm es 583:37 y para el color medido a 620 nm es 536:41. Con el fin de establecer un valor que logre las mejores remociones

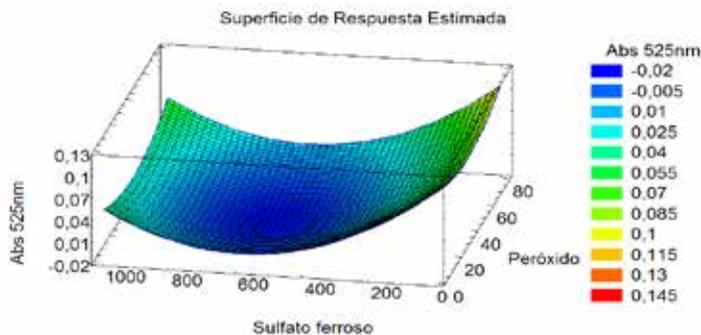
en las tres longitudes de onda se calcula el promedio de los valores óptimos, para lo cual se obtuvo el resultado 571:38.

La Fig. 2, es una representación gráfica del diseño de superficie de respuesta optimizado para la menor absorbancia de la muestra a 436 nm.



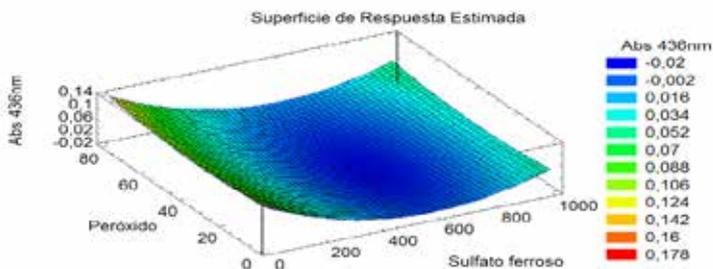
**Fig. 2.** Superficie de respuesta de la absorbancia a 436 nm

La Fig. 3, es una representación gráfica del diseño de superficie de respuesta optimizado para la menor absorbancia de la muestra a 525 nm.



**Fig. 3.** Superficie de respuesta de la absorbancia a 525 nm

La Fig. 4, es una representación gráfica del diseño de superficie de respuesta optimizado para la menor absorbancia de la muestra a 620 nm.



**Fig. 4.** Superficie de respuesta de la absorbancia a620 nm

El análisis de varianza – ANOVA del modelo de superficie de respuesta para las absorbancias a 436 nm, 525nm y 620 nm muestra que el Fenton degrada el color en un amplio rango de combinaciones de concentración de sulfato ferroso heptahidratado y peróxido; con lo cual se puede buscar minimizar los costos a la hora de escalar el proyecto.

**J.** Análisis de varianza multifactorial para comparar los procesos convencional y Fenton en tres tanques

Con los valores de las dosis óptimas encontradas en el anterior análisis se trataron tres muestras tomadas de tres tanques diferentes a las que se les realizó análisis de DQO y color con el fin de evaluar la eficiencia del tratamiento con Fenton y compararlo con el tratamiento convencional.

**Tabla V** - Resultados del análisis de DQO  
a las muestras antes y después de los tratamientos

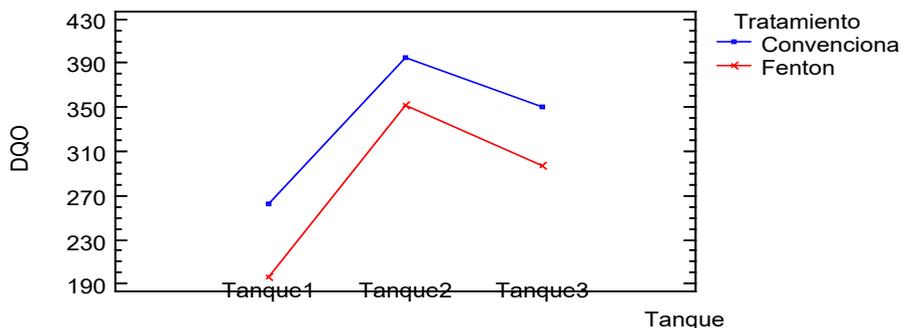
Tanques	Análisis de DQO (mg/L)		
	Inicial	Tratamiento convencional	Tratamiento Fenton
1	435	265	189
		252	200
		271	198
2	605	394	345
		396	362
		394	348
3	534	351	308
		352	285
		346	296

Se realizó el análisis estadístico de los datos experimentales, empleando para ello un análisis de varianza – ANOVA multifactorial, como se puede observar en la Tabla VI; de acuerdo con los valores arrojados de P ( $p < 0.05$ ) se encuentra que los factores tanques y tratamientos tienen influencia significativa en la variable respuesta. Por lo tanto, se muestra que existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95,0%.

**Tabla VI** - Análisis estadístico ANOVA  
multifactorial de los datos experimentales de DQO

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A: Tratamiento	13338,9	1	13338,9	225,45	0,0000
B: Tanque	64114,8	2	32057,4	541,82	0,0000
INTERACTIONS					
AB	434,778	2	217,389	3,67	0,0569
RESIDUAL	710,0	12	59,1667		
TOTAL (CORRECTED)	78598,4	17			

En la Fig. 5, se muestra la variación de la DQO en cada tanque y en los tratamientos aplicados. Allí podemos observar que en los tres tanques funciona mejor el tratamiento Fenton ya que se obtienen menores valores de DQO. Cabe resaltar que los valores iniciales de DQO en cada tanque son diferentes, siendo el más alto el del tanque 2.



**Fig. 5.** Variación de la DQO en cada tanque y en los dos tratamientos aplicados

**Tabla VII** - Resultados del análisis de color  $m^{-1}$   
a 436 nm a las muestras antes y después de los tratamientos

Tanques	Color 436 nm ( $m^{-1}$ )		
	Inicial	Tratamiento convencional	Tratamiento Fenton
1	11,835	0,040	0,164
		1,912	0,000
		6,054	1,760
2	26,459	0,000	3,810
		1,222	1,762
		10,143	0,000
3	79,471	0,000	0,000
		2,974	0,396
		0,000	1,042

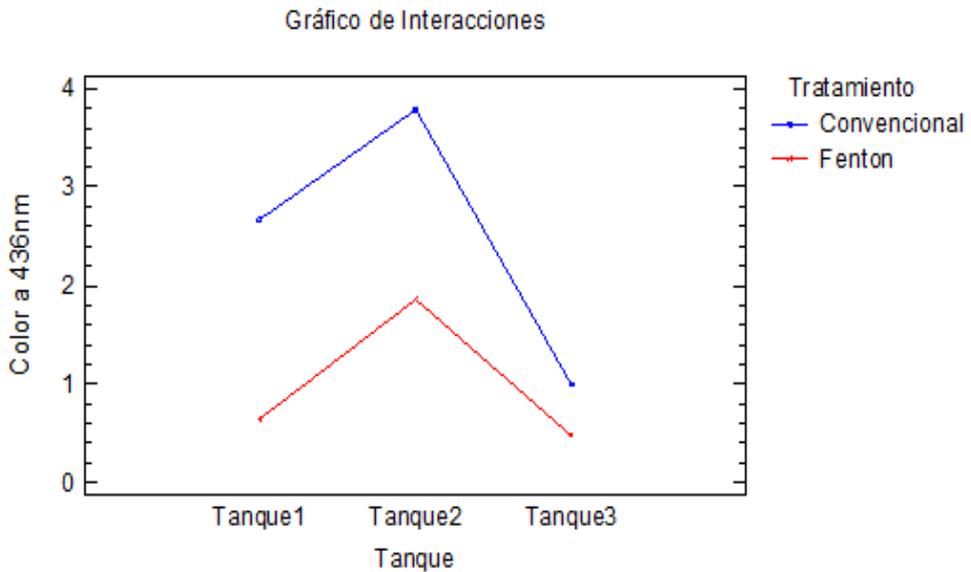
Se realizó el análisis estadístico de los datos experimentales, empleando para ello un análisis de varianza – ANOVA multifactorial, de acuerdo con los valores arrojados de P ( $p > 0.05$ ) se encuentra que los factores tanques y tratamientos no tienen influencia significativa en la variable respuesta; es decir, el color  $m^{-1}$  a 436 nm, el color  $m^{-1}$  a 525 nm y color  $m^{-1}$  a 620 nm; no varía significativamente en cada tanque y no difiere en los tratamientos estudiados. Por lo tanto, se muestra que no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95,0%

En la Fig. 6, se muestra la variación del color  $m^{-1}$  a 436 nm en cada tanque y en los tratamientos aplicados.

En la Fig. 7, se muestra la variación del color  $m^{-1}$  a 525 nm en cada tanque y en los tratamientos aplicados.

En la Fig. 8, se muestra la variación del color  $m^{-1}$  a 620 nm en cada tanque y en los tratamientos aplicados.

Allí podemos observar que en los tres tanques funciona mejor el tratamiento Fenton ya que se obtienen menores valores de color  $m^{-1}$  a 436 nm, a 525nm y a 620nm. Cabe resaltar que los valores iniciales de color  $m^{-1}$  a 436 nm, a 525nm y a 620nm en cada tanque son diferentes, siendo el más alto el del tanque 2.

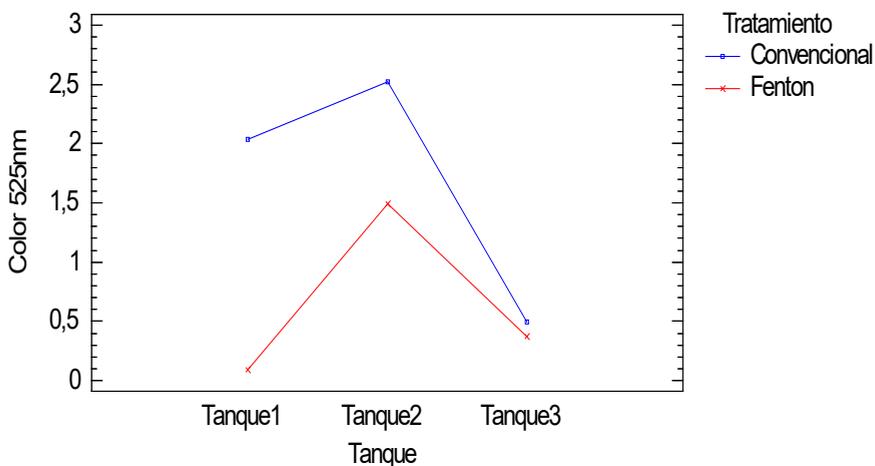


**Fig. 6.** Variación del Color a 436 nm en cada tanque y en los dos tratamientos aplicados

**Tabla VIII** - Resultados del análisis de color  $m^{-1}$  a 525 nm a las muestras antes y después de los tratamientos

Tanques	Color 525 nm ( $m^{-1}$ )		
	Inicial	Tratamiento convencional	Tratamiento Fenton
1	8,8813	0,040	0,164
		1,912	0,000
		6,054	1,760
2	22,342	0,000	3,810
		1,222	1,762
		10,143	0,000
3	70,215	0,000	0,000
		2,974	0,396
		0,000	1,042

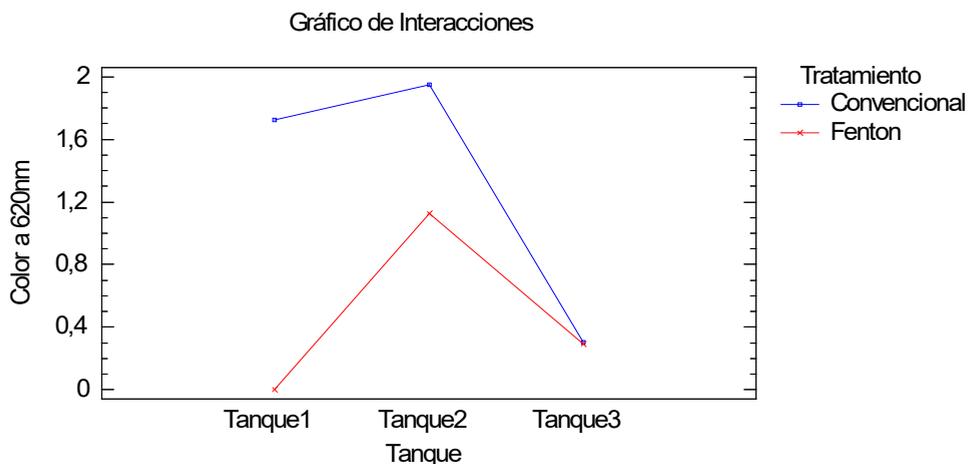
Gráfico de Interacciones



**Fig. 7.** Variación del Color a 525 nm en cada tanque y en los dos tratamientos aplicados

**Tabla IX** - Resultados del análisis de color  $m^{-1}$  a 620 nm a las muestras antes y después de los tratamientos

Tanques	Color 620 nm ( $m^{-1}$ )		
	Inicial	Tratamiento convencional	Tratamiento Fenton
1	8,2617	0,000	0,000
		0,334	0,000
		4,838	0,000
2	20,517	0,000	2,068
		0,000	1,316
		5,851	0,000
3	64,306	0,000	0,000
		0,916	0,332
		0,000	0,544



**Fig. 8.** Variación del Color a 620 nm en cada tanque y en los dos tratamientos aplicados

#### J. Escalamiento a planta de las dosis mínimas

Tomando como referencia los resultados de las pruebas realizadas anteriormente y en especial las superficies de respuesta, donde se evidencia que la degradación de color inicia al aplicar concentraciones de sulfato ferroso heptahidratado de 200 ppm y concentraciones de peróxido de 25 ppm; se realiza una prueba de jarras con el agua contenida en un tanque de homogenización, evidenciándose allí degradación de color. Con estos valores de concentración y conociendo el volumen del agua almacenada en el tanque se realizan los cálculos matemáticos para escalar las dosis y realizar la aplicación en la planta.

**Tabla X** - Valores tomados para la prueba en planta

Volumen del tanque (m <sup>3</sup> )	Dosis Sulfato ferroso heptahidratado (ppm)	Dosis de peróxido (ppm)	Kg sulfato ferroso heptahidratado	Litros peróxido al 50%
108	200	25	22	5,4

Se procedió a tomar una muestra para compararla con las condiciones iniciales y realizar análisis de color real y DQO tanto a la muestra antes y después del tratamiento con Fenton. En la Fig. 9, se pueden observar las muestras tomadas.



**Fig. 9.** A la izquierda muestra del tanque de homogenización antes del tratamiento y a la derecha muestra tratada con Fenton y sedimentada previamente

En la Tabla XI, se muestran los resultados obtenidos al analizar las muestras de la Fig. 9, en las variables de color real y DQO. De lo cual podemos observar una remoción del 48% en términos de la DQO. Parámetro que comparado con la resolución 0631 de 2015, que establece un máximo de 400 mg/L de DQO, cumple con el criterio de calidad para vertimientos. El color no se puede comparar ya que no es una variable con parámetro establecido en la norma; sin embargo, se muestran porcentajes de remoción hasta del 65% en este parámetro.

**Tabla XI** - Resultados del análisis del agua en el tanque de homogenización (antes del tratamiento) y en el vertedero (después del Fenton).

Muestra	pH (UN)	Temp. (°C)	DQO (mg/L)	Color real (m <sup>-1</sup> )		
				436 nm	525 nm	620 nm
Tanque de homogenización	5,00	35	560	12,906	10,815	10,536
Vertedero	6,00	35	391	8,005	5,246	3,654
% de remoción			30	38	51	65

### K. Análisis costo beneficio del proceso de oxidación

El costo estimado sólo incluye el reactivo Fenton; es decir, no incluye acidulantes ni alcalinizantes. Tomando como referencia que los pH encontrados en los tanques de homogenización son inferiores de 5,00UN, cada vez que se tiñen prendas de nylon no sería necesario el uso de acidulantes. No obstante, cuando el proceso de teñido incluye prendas de algodón y el pH sube se debe aplicar acidulante y llevar el pH mínimo a 5,00UN.

En la operación normal al final del proceso Fenton se debe ajustar el pH mínimo a 6,00UN que es lo establecido en la normatividad de vertimientos, para dicho ajuste se realizaron pruebas con Cal hidratada encontrando que el consumo promedio es equivalente al consumo actual de dicho producto.

En la Tabla XII, se observan las diferencias entre tratamientos Fenton vs Cloro, y encontramos allí el ahorro desde el punto de vista económico al implementar el proceso Fenton.

Teniendo en cuenta que en promedio la planta trata 360 m<sup>3</sup>/día, el ahorro diario con el tratamiento Fenton asciende a \$10.800=, lo que indica que en los 30 días del mes se ahorrarán \$324.000=, para un total de \$3.888.000= en un año.

Lo anterior indica que si es viable la implementación del proceso Fenton en términos de costos.

**Tabla XII** - Diferencias entre tratamientos Fenton vs Cloro

TRATAMIENTO FENTON		TRATAMIENTO CON CLORO	
Costo Sulfato ferroso heptahidratado (\$/Kg)	\$ 1.175	Costo coagulante (\$/Kg)	\$ 1.605
Costo Peróxido (\$/Kg)	\$ 2.680	Costo Cloro (\$/Kg)	\$ 4.200
Dosis Sulfato ferroso heptahidratado (ppm)	200	Dosis coagulante (ppm)	110
Dosis Peróxido (ppm)	25	Dosis cloro (ppm)	52
Consumo Sulfato ferroso heptahidratado (Kg/m <sup>3</sup> )	0,200	Consumo coagulante (Kg/m <sup>3</sup> )	0,109
Consumo Peróxido (Kg/m <sup>3</sup> )	0,060	Consumo cloro(Kg/m <sup>3</sup> )	0,052
Costo Consumo Sulfato ferroso heptahidratado (\$/m <sup>3</sup> )	\$ 235	Costo Consumo coagulante (\$/m <sup>3</sup> )	\$ 175
Costo Consumo Peróxido (\$/m <sup>3</sup> )	\$ 160	Costo Consumo cloro(\$/m <sup>3</sup> )	\$ 218
<b>Costo Total Fenton (\$/m<sup>3</sup>)</b>	<b>\$ 395</b>	Costo Tratamiento con cloro (\$/m <sup>3</sup> )	\$ 393
		Adicionales (costo energético \$/m <sup>3</sup> )	\$ 31
		<b>Costo Total con cloro (\$/m<sup>3</sup>)</b>	<b>\$ 424</b>
<b>Ahorro (\$/m<sup>3</sup>)</b>		<b>\$ 30</b>	

### III. CONCLUSIONES

Se determinó que una concentración de 571 ppm de sulfato ferroso heptahidratado con una concentración de 38 ppm de peróxido son óptimos para que la reacción Fenton produzca la mejor degradación de color a las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en industrias Printex S.A.S. Después, de analizar 30 combinaciones diferentes de dosis de sulfato ferroso heptahidratado y peróxido, al realizar un análisis de varianza – ANOVA, construir la respectiva superficie de respuesta y optimizar, se encuentra que tras la aplicación de dichas dosis se logran las mejores remociones de color. Es importante tener en cuenta que el método reporta bajos valores de absorbancia desde los 200 ppm de sulfato ferroso y 25 ppm de peróxido; lo que llevaría a disminuir costos a la hora de realizar un escalamiento del proceso.

Se comparó la reacción Fenton con el uso de cloro gaseoso en el proceso; encontrando que es más eficiente el proceso Fenton que el usado actualmente (cloro). En términos de remociones de la DQO, de acuerdo con los valores arrojados de P ( $p < 0.05$ ) se encuentra que los factores tanques y tratamientos tienen influencia significativa en la variable respuesta; es decir, la DQO varía en cada tanque y difiere en los tratamientos estudiados; por lo tanto, se muestra que existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95,0%. En términos de degradación de color las diferencias entre los dos procesos son muy pequeñas, ya que ambos tratamientos al ser aplicados reportan valores muy bajos de color; sin embargo, el tratamiento con Fenton es la mayoría de los casos muestra una mejor remoción de dicho parámetro. Esto permitirá que las plantas de potabilización capten aguas de más fácil tratamiento, y la fauna y flora acuáticas corran menos riesgo.

Se realizó el análisis de costo beneficio del proceso de oxidación para determinar la viabilidad de implementación a nivel piloto; no obstante, dado que las condiciones de la planta de tratamiento de aguas de Industrias Printex S.A.S., permite realizar un escalamiento a nivel de planta; se planteó el estudio de costos en condiciones reales de operación. Se llevó a cabo el escalamiento tratando 100 m<sup>3</sup> de agua residual proveniente de la tintorería de la empresa, haciendo uso de las dosis mínimas para que se diera la reacción Fenton. Encontrando que es viable económicamente con ahorros que ascienden a los \$30 pesos por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de agua tratada.

Se verificó el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente para vertimientos analizando el agua resultante del proceso Fenton, el parámetro comparado fue el de DQO ya que es el que cuenta con un valor máximo establecido en la normatividad ambiental vigente en términos de vertimientos. Se encontró una DQO de 391 mg/L y la norma establece que debe ser máximo 400 mg/L. Cabe resaltar que la empresa cuenta con un reactor biológico donde el agua ingresa después del tratamiento Fenton, con lo cual se disminuye aún más el valor de este parámetro. [Mantzavinos et al., 2004; Tantak et al., 2006; Oller et al., 2007; Rodrigues et al., 2009].

## REFERENCIAS

### *Periodicals (Artículos de revista):*

- [1] Pignatello, J.J. Dark, D. 1992, and photoassisted iron(III)-catalyzed degradation of chlorophenoxy herbicides by hydrogen peroxide. *Environ. Sci. Technol.*, 26, 944-951..
- [2] Mantzavinos, D. and Psillakis, E., 2004, Enhancement of biodegradability of industrial wastewaters by chemical oxidation pre-treatment. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 79, 431-454.
- [3] Tantak, N.P. and Chaudhari, S., 2006, Degradation of azo dyes by sequential Fenton's oxidation and aerobic biological treatment. *J. Hazard. Mater.*, 136, 698-705.
- [4] Oller, I.; Malato, S.; Sánchez-Pérez, J.A.; Maldonado, M.I.; Gernjak, W.; Pérez-Estrada, L.A., 2007, Advanced oxidation process-biological system for waste-water containing a recalcitrant pollutant. *Water Sci. Technol.*, 55, 229-235.
- [5] Papadopoulos, A.E.; Fatta, D.; Loizidou, M., 2007, Development and optimization of dark Fenton oxidation for the treatment of textile wastewaters with high organic load. *J. Hazard. Mater.*, 146, 558-563.
- [6] Rodrigues, C.S.D.; Madeira, L.M.; Boaventura, R.A.R., 2009, Treatment of textile effluent by chemical (Fenton's Reagent) and biological (sequencing batch reactor) oxidation. *J. Hazard. Mater.*, 172, 1551-1559.
- [7] Parag R. C., Aniruddha B. P. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8, 501-555.

*Books (Libros):*

- [8] APHA. 2013. Standard methods for examination of water and wastewater. 22nd ed. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF). Washington, D.C., USA.
- [9] TRAGUA, C., García-Calvo, E., & Letón, P. (2012). Guía de Tecnologías de Tratamiento de aguas para su reutilización

*Technical Reports (Informes técnicos):*

- [10] <http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/el-tratamiento-de-textiles-y-s.pdf>.

*Dissertations (Tesis doctorales):*

- [11] Zazo, J., 2004, Oxidación de fenol de aguas residuales mediante  $H_2O_2/Fe^{2+}$ /Carbón activo. Tesis doctoral.

*Standards, official rules (Normas, reglamentos oficiales):*

- [12] ISO, E. (2012). 7887: 2011 Water quality—examination and determination of colour. European Committee for Standardization.
- [13] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 0631 de 2015. *Fuentes de alimentación estabilizada de corriente continua. Terminología*, Norma UNE 20589-1:1978, AENOR, España, edición 15, nov. 1978.

**Biografía. Autor 1: Mallerliny Quintero Rodríguez**

Estudiante de doctorado en Ciencias, de la Universidad del Quindío; Magíster en Química, de la Universidad del Quindío; Especialista en Gestión Ambiental, de la Universidad Pontificia Bolivariana, Profesional en Química, de la Universidad del Quindío, Tecnóloga Química en Productos Vegetales, de la Universidad del Quindío. Docente en la Institución educativa La Popa, ubicada en La Tebaida, Quindío; jefe de la planta de tratamiento de aguas y gestión ambiental en Industrias Printex S.A.S; Asesora Ambiental en Ganapollo S.A.S.

Áreas de investigación: Ciencias Naturales, Química, medio ambiente, Tratamiento de aguas

**Biografía. Autor 2: Jhon Alexander Rodriguez Espinosa**

Magíster en Química, de la Universidad del Quindío; profesional en Química, de la Universidad del Quindío. director de la Maestría en Química, de la Universidad del Quindío.

Áreas de investigación: Analítica, electroquímica, bioquímica, química orgánica, medio ambiente y biotecnología

**Biografía. Autor 3: Henry Reyes Pineda**

Doctor en Ingeniería Química y Nuclear de la Universidad Politécnica de Valencia, España; Magister en Tecnologías de Membranas, Electroquímica y medio Ambiente Seguridad Nuclear; Especialista en Educación Ambiental; Especialista en Ingeniería Electroquímica y Corrosión; Ingeniero Químico, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Decano de la Facultad de Ciencias Agroindustriales; hace parte del Grupo Químico en Investigación y Desarrollo Ambiental.

Áreas de investigación: Ingeniería Electroquímica, Procesos ambientales, Tratamiento de residuos sólidos y líquidos, Diseño de Reactores.