

1 The Biologist (Lima), 2024, vol. 22 (2), XX-XX.

2 DOI: <https://doi.org/10.62430/rtb20242221849>

3 Este artículo es publicado por la revista The Biologist (Lima) de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática,  
4 Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los  
5 términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio,  
6 siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.  
7



8

9

## ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

10 PROCESO DE TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN Y RADIACIÓN

11 SOLAR VISIBLE DE UNA SOLUCIÓN ACUOSA MODELO DEL COLORANTE

12 TEXTIL DISPERSO "TAICRON-RED"

13 TREATMENT PROCESS BY ELECTROCOAGULATION AND VISIBLE SOLAR

14 RADIATION OF AN AQUEOUS SOLUTION MODEL OF THE DISPERSED

15 TEXTILE DYE "TAICRON-RED"

16 Lia Concepción Gamarra<sup>1,2\*</sup>; Luz Castañeda Pérez<sup>3</sup> & Luis Carrasco Venegas<sup>4</sup>

17 <sup>1</sup> Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima,  
18 Perú.

19 <sup>2</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

20 E-mail: [lconcepciong@unmsm.edu.pe](mailto:lconcepciong@unmsm.edu.pe)

21 <sup>3</sup>Red RIDIEP, Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico  
22 Villarreal, Lima, Perú. E-mail: [lcastaneda@unfv.edu.pe](mailto:lcastaneda@unfv.edu.pe)

23 <sup>4</sup>Centro de Bioenergía, Universidad Nacional del Callao, Red RIDIEP, Escuela  
24 Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. E-  
25 mail: [lcarrascov@unac.edu.pe](mailto:lcarrascov@unac.edu.pe)

26 \* Corresponding author: lconcepciong@unmsm.edu.pe.

27 Titulillo: Treatment of an aqueous solution by electrocoagulation and visible solar  
28 radiation

29 Concepción-Gamarra *et al.*

30 Lia Concepción-Gamarra: <https://orcid.org/0000-0001-5069-5769>

31 Luz Castañeda-Pérez: <https://orcid.org/0000-0001-6684-8205>

32 Luis Carrasco-Venegas: <https://orcid.org/0000-0002-7832-3366>

33 **ABSTRACT**

34 The textile industry, one of the fastest growing industries, faces major challenges related  
35 to the color persistence of products and the treatment of wastewater generated during  
36 processing. The discoloration of the dyes used, such as “Taicron Red”, is a major problem,  
37 as these dyes are chemically stable and difficult to remove. It is therefore essential to  
38 develop effective and sustainable methods for their treatment. The objective of this study  
39 was to evaluate the efficiency of a treatment system for the removal of textile dye “Taicron  
40 Red” in model solutions, using sustainable processes powered by solar energy. For this  
41 purpose, an electrolytic cell powered by a solar panel and a photoreactor whose pump is  
42 also driven by solar energy were designed and built. The treatment consisted of an  
43 electrocoagulation process with aluminum anodes, applying a potential difference of 12  
44 volts for 40 min, which reduced the Chemical Oxygen Demand (COD) of the solution  
45 from 5216.7 ppm to an initial value that allowed a second electrocoagulation.  
46 Subsequently, the solution was treated in the photoreactor for 180 min using 100 mg of  
47 Fe(II), 12 ml/L of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH = 3 and TiO<sub>2</sub> at 100 ppm, achieving a 60% COD removal  
48 (removing 3129.2 ppm) and 90.68% of the color. In a second treatment, increasing the  
49 concentration of TiO<sub>2</sub> to 1000 ppm, 84% COD removal (removing 4381.4 ppm) and

50 99.38% color removal were achieved. The results demonstrated that the proposed system  
51 is highly efficient for the removal of textile dye and COD, reaching high removal  
52 percentages in both cases, and that the use of solar energy in conjunction with  
53 electrocoagulation and photocatalysis processes is a viable and sustainable alternative for  
54 treating wastewater in the textile industry.

55 **Keywords:** aqueous solution – electrocoagulation – Treatment – visible solar radiation

## 56 RESUMEN

57 La industria textil, una de las de mayor crecimiento, enfrenta grandes desafíos  
58 relacionados con la persistencia del color de los productos y el tratamiento de aguas  
59 residuales generadas durante su proceso. La decoloración de los colorantes utilizados,  
60 como el "Taicron Red", es un problema importante, ya que estos colorantes son  
61 químicamente estables y difíciles de eliminar. Por ello, es fundamental desarrollar  
62 métodos eficaces y sostenibles para su tratamiento. El objetivo de este estudio fue evaluar  
63 la eficiencia de un sistema de tratamiento para la remoción de colorante textil "Taicron  
64 Red" en soluciones modelo, utilizando procesos sostenibles alimentados por energía solar.  
65 Para ello, se diseñó y construyó una celda electrolítica alimentada por panel solar y un  
66 fotorreactor cuya bomba también es impulsada por energía solar. El tratamiento consistió  
67 en un proceso de electrocoagulación con ánodos de aluminio, aplicando una diferencia de  
68 potencial de 12 voltios durante 40 min, lo que redujo la Demanda Química de Oxígeno  
69 (DQO) de la solución de 5216,7 ppm a un valor inicial que permitió una segunda  
70 electrocoagulación. Posteriormente, la solución fue tratada en el fotorreactor durante 180  
71 minutos utilizando 100 mg de Fe (II), 12 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH = 3 y TiO<sub>2</sub> a 100 ppm, logrando  
72 una remoción del 60% de la DQO (removiendo 3129,2 ppm) y del 90,68% del color. En

73 un segundo tratamiento, incrementando la concentración de  $\text{TiO}_2$  a 1000 ppm, se alcanzó  
74 una remoción del 84% de la DQO (removiendo 4381,4 ppm) y una remoción del color  
75 del 99,38%. Los resultados demostraron que el sistema propuesto es altamente eficiente  
76 para la remoción de colorante textil y DQO, alcanzando altos porcentajes de remoción en  
77 ambos casos, y que el uso de energía solar en conjunto con los procesos de  
78 electrocoagulación y fotocátalisis resulta ser una alternativa viable y sostenible para tratar  
79 aguas residuales en la industria textil.

80 **Palabras clave:** electrocoagulación – radiación solar visible – solución acuosa –  
81 Tratamiento

## 82 INTRODUCCIÓN

83 La industria textil genera efluentes acuosos durante procesos como tintura y acabados,  
84 que contienen productos químicos tóxicos, como tintes, blanqueadores y metales pesados.  
85 Estos efluentes son difíciles de biodegradar y afectan la calidad del agua residual, que  
86 suele ser muy coloreada y contener nutrientes y sólidos en suspensión. Es crucial  
87 implementar tratamientos adecuados para reducir la contaminación y cumplir con las  
88 regulaciones ambientales (López & Crespi, 2015).

89 Los residuos textiles afectan los cuerpos de agua, causando eutrofización y contaminación  
90 por microplásticos debido a la descomposición de fibras sintéticas, lo que impacta la  
91 biodiversidad y la salud humana, especialmente en comunidades dependientes de estos  
92 recursos hídricos. Esto subraya la necesidad de una gestión sostenible en la industria textil  
93 (Fluence Corp Ltd, 2018).

94 El tratamiento de estas aguas residuales es complejo debido a la presencia de  
95 contaminantes peligrosos. Métodos avanzados como la electrocoagulación (EC), que

96 utiliza electrodos para generar coágulos metálicos que atrapan los contaminantes, se han  
97 destacado por su efectividad en la eliminación de estos compuestos tóxicos.

98 El uso de electrocoagulación para tratar aguas residuales con tintes ha sido estudiado por  
99 Alizadeh *et al.* (2015), quienes encontraron que los electrodos de hierro lograron una  
100 remoción del 100% del azul de metileno, pero el proceso consume mucha energía,  
101 limitando su aplicación a gran escala.

102 Se ha aplicado coagulación/floculación seguida de oxidación electroquímica para tratar  
103 efluentes textiles, mejorando la eficiencia del tratamiento y reduciendo la contaminación  
104 del agua (Torres *et al.*, 2019; GilPavas *et al.*, 2020; Suárez-Escobar *et al.*, 2016).

105 Se ha combinado la electrocoagulación con un tratamiento enzimático usando Lacasa, lo  
106 que mejora la descomposición de los tintes. Sin embargo, señalaron que el proceso sigue  
107 siendo costoso en energía y genera mucho lodo, lo que requiere soluciones más eficientes  
108 y sostenibles (Kalia *et al.*, 2023).

109 El proceso híbrido de electrocoagulación y electro-oxidación (EC-EO), ha sido evaluado  
110 por Asfaha *et al.* (2022) para tratar aguas residuales textiles de la industria algodonera.  
111 Este enfoque reduce eficazmente la demanda química de oxígeno (DQO), el carbono  
112 orgánico total (COT) y la intensidad del color. Utilizando electrodos de aluminio y  
113 dióxido de iridio recubiertos de titanio, el estudio optimizó parámetros como la densidad  
114 de corriente, el pH y el tiempo de electrólisis para mejorar la eficiencia del tratamiento.

115 Bener *et al.* (2019) también investigaron el uso de electrocoagulación en aguas residuales  
116 textiles reales, evaluando su impacto en la eliminación de COT. Otros estudios han  
117 combinado electrocoagulación con ozonización o adsorción para mejorar la remoción de

118 contaminantes y optimizar el rendimiento del tratamiento (Tezcan & Aytac, 2013; Bulca  
119 *et al.*, 2021; Ahangarnokolaei *et al.*, 2021).

120 Además de la electrocoagulación, se han desarrollado otros métodos avanzados como la  
121 fotocatalisis. Zhang *et al.* (1998) investigaron la degradación de eosina con TiO<sub>2</sub> bajo luz  
122 visible, concluyendo que mejora la descomposición del colorante en medios ácidos.  
123 Ambaye & Hagos (2020) combinaron TiO<sub>2</sub> con un tratamiento biológico aeróbico para  
124 decolorar tintes azo en aguas residuales textiles, logrando una reducción significativa de  
125 la DQO y alta eliminación del color.

126 Bilińska *et al.* (2019) investigaron el uso combinado de electrocoagulación y ozonización  
127 para la reutilización de aguas residuales textiles, mientras que Zazou *et al.* (2019)  
128 aplicaron electrocoagulación con oxidación avanzada. Otros enfoques integrados  
129 incluyen tratamientos químicos y biológicos (Ledakowicz *et al.*, 2001) y un sistema  
130 continuo de electrocoagulación para la desalinización parcial de agua en las turberas  
131 costeras de Sarawak (Abdul-Rahman *et al.*, 2023).

132 La fotocatalisis ha demostrado ser efectiva para eliminar contaminantes en aguas  
133 residuales cuando se combina con otros tratamientos. Se ha utilizado el TiO<sub>2</sub> para la  
134 fotodegradación del colorante Remazol Red 133, alcanzando una decoloración del 97,9%  
135 y una degradación del 87,6% en 120 min (Gümüş & Akbal, 2011). Se ha investigado la  
136 degradación fotocatalítica de varios colorantes comerciales con TiO<sub>2</sub> bajo irradiación  
137 solar, observando que la decoloración fue más rápida que la mineralización (Wang, 2000).

138 La estructura de TiO<sub>2</sub> influye en su rendimiento fotocatalítico (Nakata & Fujishima,  
139 2012), optimizando los procesos de tratamiento (Minero, 1995). Se ha desarrollado un  
140 tratamiento de reducción química para el colorante azoico Disperse Blue 79 (Weber &

141 Adams, 1995). Rodríguez *et al.* (2002) y Ribeiro *et al.* (2017) estudiaron el tratamiento  
142 foto-Fenton de efluentes textiles, evaluando la biodegradabilidad de las soluciones  
143 tratadas. Se ha investigado el destino de los colorantes azoicos en los lodos generados  
144 durante el tratamiento, proporcionando información sobre su impacto ambiental (Ganesh  
145 *et al.*, 1994).

146 El tratamiento de aguas residuales textiles ha avanzado con métodos como la  
147 electrocoagulación y la fotocatalisis, combinados con procesos como la oxidación  
148 electroquímica y la biocatalisis. Aunque estos métodos son efectivos para eliminar  
149 contaminantes, presentan limitaciones en el consumo de energía y la generación de lodos.  
150 Los estudios continúan buscando formas de optimizar estos procesos para hacerlos más  
151 eficientes y sostenibles. La investigación se centra en el tratamiento de una solución  
152 modelo de colorante textil denominado "taicron red", utilizando la electrocoagulación  
153 seguida de tratamiento por radiación solar visible, con un sistema de energía solar para  
154 alimentar ambos procesos.

## 155 **MATERIALES Y MÉTODOS**

### 156 **Panel solar**

157 Fue adquirido de la empresa Electronic Siblings SAC., con estimaciones de potencia y  
158 autonomía de alrededor de 8 h a una tasa de consumo de 4 A-h, con la finalidad de que la  
159 batería este cargada a un 50%. Las dimensiones son 1,80 m x 1,10 m; la potencia de 405  
160 W; una batería de 150 A-h y un controlador de 10 A-h. La estructura fue diseñada  
161 convenientemente para orientar el panel de forma manual en la dirección de la radiación  
162 solar. Este equipo se utiliza con la finalidad de proveer energía para la electrocoagulación,

163 el bombeo de fluidos y agitación durante la electrocoagulación. La figura 1 muestra el  
164 panel solar que permite hacer el seguimiento de forma manual en la dirección del sol.



165

166

**Figura 1.** Panel solar.

### 167 **Celda electrolítica**

168 Es una cubeta de plástico de 31 cm de longitud, 21 cm de ancho y 18 cm de altura cuya  
169 capacidad de operación es de 10 L, a la cual se acondicionó dos barras conductoras de  
170 cobre para soportar los electrodos. Los electrodos están constituidos de siete electrodos  
171 (3 electrodos de aluminio y 4 electrodos de acero de 10 cm de ancho y 12 cm de altura),  
172 los cuales se colocan en forma alternada considerando que los electrodos de aluminio  
173 estén ubicados siempre entre dos electrodos de acero. El esquema ensamblado se muestra  
174 en la figura 2.



175

176

**Figura 2.** Celda electrolítica con cátodos de acero y ánodos de aluminio.



177 **Fotorreactor**

178 Ha sido diseñado y construido específicamente para esta investigación; consta de 5  
179 unidades idénticas dispuestas en forma paralela; sin embargo, su funcionamiento es en  
180 serie; cada una de estas unidades son idénticas y consta de dos elementos el tubo y el  
181 paraboloides (involuta+ parábola), cuyas ecuaciones de diseño son las siguientes:

182 La ecuación del tubo de vidrio borosilicato cuyo radio es  $r$ , viene dada por:

183  $x = r \cos(\theta), y = r \sin(\theta), 0 \leq \theta \leq 2\pi$

184 La ecuación de la involuta esta dada por

185  $x = r(\sin \theta_{COB} - \theta_{COB} \cos \theta_{COB}) y = -r(\theta_{COB} \sin \theta_{COB} + \cos \theta_{COB}) \quad 0 \leq \theta_{COB} \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a$

186 Y la parábola

187  $x = r(\sin \theta_{COB} - A \cos \theta_{COB}) \quad y = -r(A \sin \theta_{COB} + \cos \theta_{COB})$

188  $A = \frac{\pi / 2 + \theta_{COB} + \theta_a - \cos(\theta_{COB} - \theta_a)}{1 + \sin(\theta_{COB} - \theta_a)} \quad \frac{\pi}{2} + \theta_a \leq \theta_{COB} \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a$

189 Es un dispositivo de acero inoxidable brillante que consta de cinco unidades dispuestas  
190 en serie de 1 m de longitud y 22 mm. de diámetro cada uno, ensamblado en un soporte  
191 móvil, capaz de seguir la dirección del sol con la finalidad de captar la máxima energía  
192 radiante posible. El conjunto se denomina colector parabólico compuesto o CPC, con  
193 capacidad de multiplicar la concentración solar 2,5 veces la radiación del momento; el  
194 equipo parcialmente ensamblado se muestra en la figura 3.

195



196

197

**Figura 3.** Fotorreactor de acero inoxidable brillante.

198

### **Equipos auxiliares**

199

**Bombas:** Se instaló dos bombas; una bomba es utilizada como un sistema de agitación de la celda electrolítica mediante la circulación del fluido dentro de la misma cubeta y la segunda bomba tiene la finalidad de suministrar energía al fluido que se desplaza por el fotorreactor; la fuente de alimentación es de corriente continua de 12 voltios y utiliza la energía del panel solar; capacidad: 3,5 L/min; presión ejercida de 0,48 MPa y consumo de energía de 2 A.

205

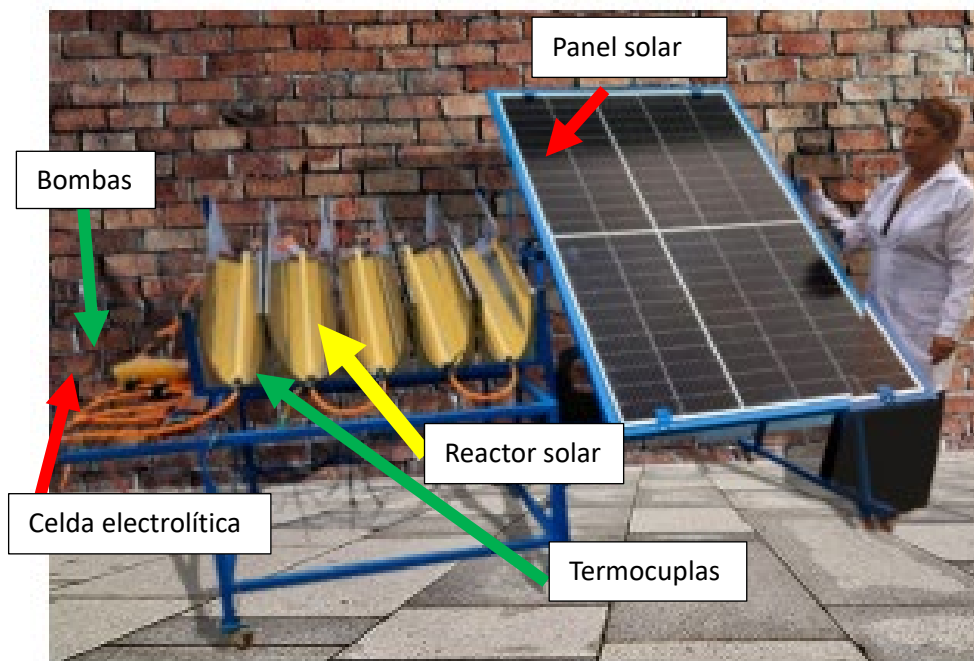
**Termocuplas:** Se instaló una serie de termocuplas para sensar la temperatura del fotorreactor en diferentes puntos durante el proceso de tratamiento con el reactor solar, incluido los puntos de entrada y salida.

208

**Pirómetro:** Se instaló cerca de la zona donde se estuvo llevando a cabo el proceso de degradación en el fotorreactor con la finalidad de conocer el valor medio de la radiación UV y visible que se produce en el espectro electromagnético.

211

El equipo completo instalado se observa en la figura 4.



212

213 **Figura 4.** Equipo completo de electrocoagulación y radiación solar visible.

214 **Métodos**

215 Se realizó el tratamiento de una solución modelo del colorante disperso “taicron-red” de  
 216 concentración de 1 g/L.

217 **Procedimiento de la electrocoagulación**

218 **Primera electrocoagulación**

219 Se preparó 10 L de una solución de colorante disperso “taicron red” de 1g/L. Se observa  
 220 la intensidad de color debido a su concentración elevada la misma que se observa en la  
 221 figura 5.



222

223

**Figura 5.** Solución acuosa de colorante “taicron-red” de 1g/L.

224

Ambas soluciones fueron sometidas a una primera electrocoagulación por 40 min en la celda electrolítica descrita anteriormente, lo cual permitió disminuir la intensidad de color; una parte por flotación debido a la formación de productos de baja densidad y por sedimentación por el hidróxido de aluminio formado durante el proceso de electrólisis.

225

226

227

228

### **Segunda electrocoagulación**

229

El producto obtenido del tratamiento por electrocoagulación fue filtrado convenientemente y se sometió a una segunda electrocoagulación por 40 min con la finalidad de eliminar el colorante remanente y los posibles aditivos que puedan contener; se utilizó el mismo equipo de la primera electrocoagulación y las mismas condiciones de intensidad de corriente de 4 A y 12 V.

230

231

232

233

234

El proceso de electrocoagulación tanto de la primera como de la segunda electrocoagulación de las soluciones de 1 g/L de colorante se realizó por triplicado; luego de la segunda electrocoagulación y filtrado, se mezcló las tres soluciones obteniendo alrededor de 27 L con los cuales se procedió al tratamiento fotofenton heterogéneo mediante el uso del reactor solar (Ribeiro *et al.*, 2017).

235

236

237

238

## 239 **Tratamiento de la solución filtrada en el fotorreactor**

240 El valor medio de radiación solar fue de  $1000\text{W/m}^2$ , los experimentos se realizaron en el  
241 periodo de 11 h a 15 h y fue medido con un piranómetro (Hukseflux Thermal Sensor  
242 Pyranometer, fabricado en Países Bajos) que se dispone para tal fin. Este nivel de  
243 radiación fue apropiado para el desarrollo de esta investigación.

244 La solución mezclada proveniente de la segunda electrocoagulación tiene un pH de 7, la  
245 misma que fue separada en tres partes de 9 L cada una; el pH fue ajustado a 3 para el  
246 proceso de fotooxidación (Gümüş & Akbal, 2011). Se obtiene este valor, agregando una  
247 pequeña proporción de ácido sulfúrico concentrado; se adiciona peróxido de hidrógeno  
248 30% en volumen a una tasa de 12 ml/L de solución del colorante taicron red a tratar;  
249 sulfato ferroso heptahidratado 100 mg/L; nano partículas de dióxido de titanio de 25-50  
250 nm en forma de anatasa a razón de 100 mg/L. Esta mezcla se realizó en una cubeta, la  
251 cual fue succionada con la bomba y se hace circular por el fotorreactor a una tasa de  
252 3L/min durante 180 min y muestreos realizados cada 30 min. Se procedió del mismo  
253 modo con la solución de 0,5 g/L, luego de haber sido sometida a una segunda  
254 electrocoagulación.

255 Las mezclas obtenidas, se someten a un tratamiento alcalino para modificar el pH y a la  
256 vez eliminar el hierro proveniente del tratamiento en el fotorreactor, luego se filtra para  
257 su análisis y evaluación respectiva.

258 En caso de verificar que los valores no están por debajo de los límites máximos  
259 permisibles, se procede a un segundo tratamiento de fotooxidación. Los análisis químicos  
260 de la demanda química de oxígeno, fueron llevados a cabo en la Universidad Nacional  
261 Agraria La Molina, Lima, Perú.

262 **Aspectos éticos:** En la elaboración del proyecto se utilizaron citas y referencias auténticas  
263 y no se realizaron cambios en los resultados obtenidos para no manipular la información  
264 durante el trabajo de investigación. Los datos y resultados fueron obtenidos según el  
265 desarrollo de la investigación y validados en un laboratorio certificado.

## 266 **RESULTADOS**

### 267 **Primera electrocoagulación**

268 Durante el proceso de electrocoagulación se producen una serie de cambios físicos tal  
269 como se observa en la figura 6; una parte del floculo formado (hidróxido de aluminio en  
270 el ánodo) precipita al fondo del tanque y otra parte es arrastrada hacia la parte superior  
271 (por el hidrógeno formado en el cátodo), haciendo que parte del floculo tenga baja  
272 densidad y quedando en la superficie que luego es retirado manualmente.



273

274 **Figura 6.** Proceso de electrocoagulación del colorante taicron-red 1g/L.

275

276 Luego del proceso de electrocoagulación por el periodo antes indicado, se retiran los  
277 electrodos y el floculo sobrenadante se retira manualmente con una espátula tal como se  
278 observa en la figura 7 para permitir que quede solo el floculo sedimentable.



279

280

**Figura 7.** Flóculo sobrenadante para su retiro manual.

281

Una vez retirado el flóculo sobrenadante se deja en reposo para que la decantación del

282

hidróxido de aluminio unido al colorante por fuerzas electrostáticas (figura 8).



283

284

**Figura 8.** Proceso de decantación del flóculo (hidróxido de aluminio + colorante disperso).

285

286

Luego del proceso de decantación, se somete a la filtración con la finalidad de eliminar

287

los residuos sólidos (flóculo decantado).

288

Durante esta primera electrocoagulación se retira una gran cantidad del colorante; sin

289

embargo, aún quedan restos de colorante que son observables por el ojo humano; por tal

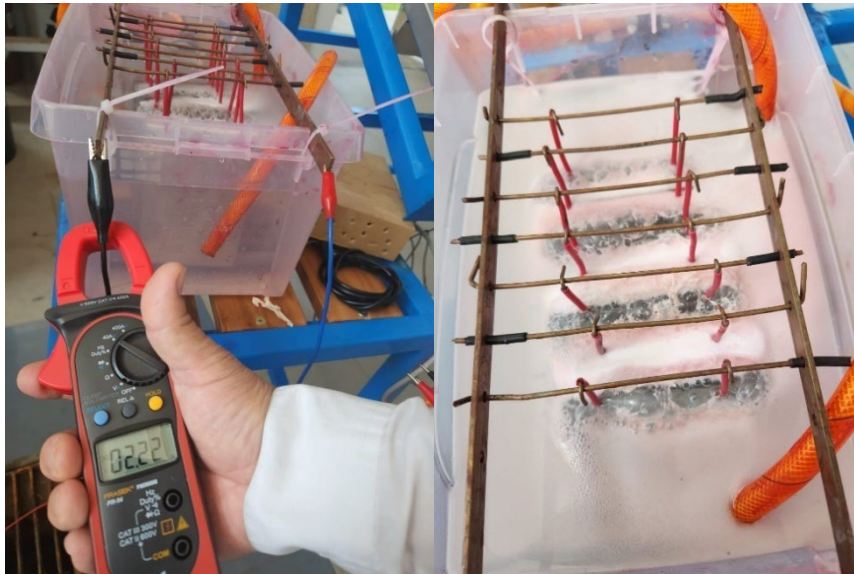
290

motivo la solución filtrada se somete a una segunda electrocoagulación.

291

**Segunda electrocoagulación**

292 Se observa el desarrollo del proceso de la segunda electrocoagulación, donde el agua  
293 tratada visiblemente con menor contenido proveniente de la primera electrocoagulación  
294 es sometida al proceso observándose que aún quedan residuos remanentes (figura 9).



295

296 **Figura 9.** Segunda electrocoagulación del líquido filtrado.

297 Luego de culminado el proceso de electrocoagulación se elimina la espuma sobrenadante  
298 y se deja decantar la solución (figura 10).

299

300

301





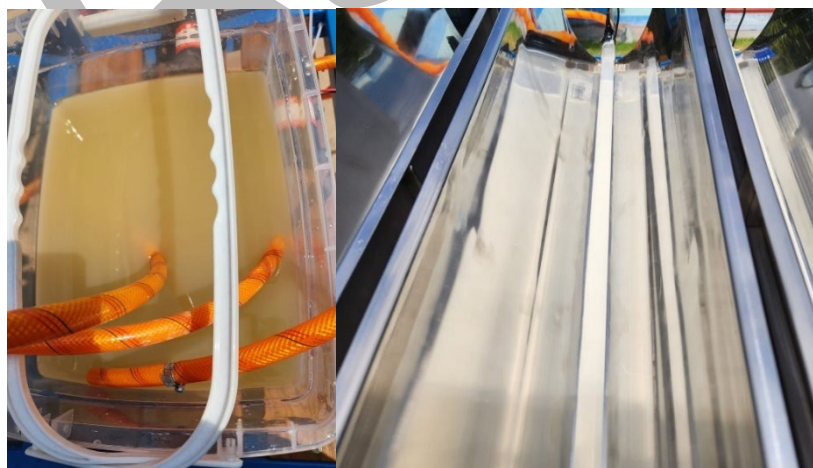
302

303 **Figura 10.** Proceso de decantación proveniente de la segunda electrocoagulación.

304 Luego de la decantación y filtrado, el agua queda visualmente limpia; sin embargo, debido  
305 a los componentes no coloreados, es posible que haya otras sustancias aun sin remover.

#### 306 **Tratamiento en el fotorreactor**

307 Se observa el detalle de la solución circulante a través del fotorreactor, el cual es  
308 alimentado desde un depósito rectangular y recirculado hacia el mismo con la finalidad  
309 que la solución pueda tener un tiempo de residencia apropiado (Figura 11).



310

311 **Figura 11.** Solución circulante sometido a la foto oxidación.

312 Se procede del mismo modo para las otras dos porciones y luego los productos finales se  
313 mezclan y se obtiene una solución cuyas propiedades corresponden a los valores medios  
314 del proceso. La solución final es filtrada y almacenada para los análisis químicos  
315 respectivos.

316 **Tabla 1.** Datos reportados de DQO (Demanda Química de Oxígeno) para la muestra de  
317 1g/L de colorante proveniente de la solución mezclada de la segunda electrocoagulación

Tiempo (min)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)
0	5216,7*
30	4683
60	3950
90	3716,7
120	2383,3
150	2316,7
180	2050

323 (\*) Muestra inicial después de la segunda electrocoagulación

324 Se observa la evolución temporal de la DQO, con una tendencia a la mineralización  
325 continua, hasta llegar a un valor cercano a 2000 ppm., cuyo valor disminuyó desde un  
326 valor por encima de 5000 ppm.

327 Paralelamente fue leída la absorbancia a 530 nm (región visible) en un espectrofotómetro.  
328 Los resultados se muestran en la tabla 2, con un valor decreciente de la intensidad de  
329 coloración tendiente a una cinética de primer orden, reportándose una remoción de  
330 90.68% del color en un periodo de 3 h.

331 **Tabla 2.** Datos registrados de absorbancia a 530 nm para el colorante textil “taicron  
332 red” de concentración inicial 1 g/L y TiO<sub>2</sub>

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	% de Remoción
0	0,098	0,285070	71,49
30	0,084	0,244370	75,56
60	0,079	0,229835	77,01
90	0,064	0,186227	81,37
120	0,055	0,160063	83,99
150	0,04	0,119363	88,06
180	0,03	0,093199	90,68

Como consecuencia de los resultados obtenidos cuyos valores se encuentran por encima de los límites máximos permisibles se procedió a neutralizar el hierro remanente mediante la adición controlada de hidróxido de sodio hasta obtener un pH de 9. La solución filtrada fue sometida a un segundo tratamiento utilizando  $\text{TiO}_2$  a una concentración de 1000 ppm; es decir, la nueva dosificación fue la siguiente: 100 mg de Fe (II), 12ml/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , pH=3,  $\text{TiO}_2=1000$  ppm (tabla 3).

**Tabla 3.** Resultado del análisis luego de un segundo tratamiento por fotooxidación con  $\text{TiO}_2$ .

Tiempo de tratamiento (min)	DQO resultante (ppm)
0	2050
30	1056,7
60	990
90	943,3
120	916,7
150	863,3
180	850

En la tabla 3 se observa que los niveles de DQO a 1 hora de tratamiento se encuentra por debajo de los niveles máximos permisibles.

351 La lectura de la absorbancia en función del tiempo fue leída en un espectrofotómetro UV  
352 a 530 nm cuyo resultado se muestra en la Tabla 4

353 **Tabla 4.** Resultados de análisis de concentración y porcentaje de remoción de colorante

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	% Remoción
0	0,047	0,136806	72,63
30	0,02	0,058313	88,33
60	0,012	0,035056	92,98
90	0,011	0,032149	93,57
120	0,009	0,026335	94,73
150	0,004	0,011799	97,64
180	0,001	0,003078	99,38

354

355 En general se ha observado que a pesar de que las dos electrocoagulaciones eliminan gran  
356 cantidad del colorante cuyo contenido se puede expresar en intensidad de coloración y  
357 niveles de DQO. Luego de la segunda electrocoagulación la DQO tiene un valor mayor a  
358 5000 ppm. Y luego de someterlo al tratamiento en el fotorreactor con 100 ppm de  
359 nanopartícula de dióxido de titanio, luego de 3 h se alcanza un valor de 2050 ppm de  
360 DQO y una remoción de color de 90,68%; al someter a un segundo tratamiento en el  
361 fotorreactor incrementando la concentración de nanopartícula de TiO<sub>2</sub> a 1000 ppm, luego  
362 de 3 h se obtuvo un DQO remanente de 850 ppm y una remoción de color del 99,38%.  
363 Todo esto muestra que este colorante “*taicron red*” es bastante resistente al tratamiento.  
364 Sin embargo, cabe mencionar que un residuo industrial tiene una concentración inicial  
365 mucho menor a la propuesta y se espera que requiera mucho menos tratamientos que los  
366 desarrollados en este trabajo.

367 **DISCUSION**

368 En la presente discusión se abordan los resultados obtenidos en este trabajo y los  
369 desarrollados por Aquino (2017), Suárez-Escobar (2016), y Shams *et al.* (2021),  
370 comparando los enfoques y hallazgos para el tratamiento de aguas residuales textiles  
371 mediante procesos como la electrocoagulación, fotocátalisis y sus combinaciones. Cada  
372 uno de estos estudios aporta perspectivas valiosas sobre la efectividad de estos métodos,  
373 destacando tanto las similitudes como las diferencias en la eficiencia, los tiempos de  
374 tratamiento, y las condiciones experimentales.

375 El presente estudio se centró en un sistema combinado de electrocoagulación y  
376 fotocátalisis utilizando energía solar, con el objetivo de remover colorantes textiles y  
377 reducir la DQO de las soluciones modelo; se logró una alta eficiencia en la remoción de  
378 color, alcanzando un 99,38% de eliminación del colorante "Taicron Red" y una reducción  
379 de la DQO del 84% al aumentar la concentración de TiO<sub>2</sub> en el fotorreactor. Además, la  
380 combinación de energía solar con estos procesos mejoró la sostenibilidad del tratamiento,  
381 demostrando que el sistema propuesto es eficiente y ecológicamente viable para la  
382 industria textil. Estos resultados fueron superiores a los de estudios previos, y  
383 particularmente a los obtenidos por Aquino, quien utilizó fotocátalisis para tratar un  
384 efluente textil artesanal. Aquino obtuvo una remoción del 93,02% de DQO y del 66,62%  
385 del color en 4 h de tratamiento, lo que sugiere que, aunque la fotocátalisis fue efectiva,  
386 los resultados no fueron tan altos como los de encontrados en este trabajo, posiblemente  
387 debido a las diferentes condiciones experimentales, como la menor concentración de TiO<sub>2</sub>  
388 utilizada por Aquino y las características del efluente real tratado.

389 En cuanto al enfoque de Suárez-Escobar *et al.* (2016), quien empleó un proceso  
390 combinado de electrocoagulación y fotocátalisis para tratar aguas residuales litográficas,  
391 los resultados mostraron una remoción del 65% de carbono orgánico total (TOC) en 30

392 minutos mediante electrocoagulación, y un 25% adicional con fotocátalisis. Aunque  
393 Suárez- Escobar *et al.* (2016) logró una mejora significativa en la calidad del agua tratada,  
394 sus niveles de remoción fueron inferiores a los obtenidos en este trabajo, probablemente  
395 debido a los menores tiempos de tratamiento y a la optimización limitada de las  
396 condiciones experimentales. La investigación de Suárez-Escobar destaca la importancia  
397 de ajustar variables como la concentración de TiO<sub>2</sub> y el pH, pero los resultados sugieren  
398 que, con tiempos de tratamiento más prolongados y un mayor número de ciclos de  
399 tratamiento, la remoción podría haber sido más efectiva.

400 Por su parte, Shams *et al.* (2021) utilizaron un proceso combinado de electrocoagulación  
401 y fotocátalisis con el material dopado Ag/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> para tratar el colorante azo carmoisina,  
402 observando una eficiencia de eliminación del 37% utilizando electrodos de hierro-hierro,  
403 y del 23% con electrodos de aluminio-aluminio. Aunque el sistema propuesto por Shams  
404 *et al.* (2021) fue eficaz para la remoción de contaminantes, los resultados de su  
405 investigación mostraron una eficiencia significativamente menor en comparación con los  
406 obtenidos en este trabajo, lo que podría deberse a la mayor complejidad del material  
407 fotocatalítico utilizado por Shams *et al.* (2021), así como a la diferencia en las técnicas  
408 experimentales y en la naturaleza de los contaminantes tratados. A diferencia de Shams  
409 *et al.* (2021), en este trabajo se empleó un sistema más sencillo con TiO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en  
410 concentraciones más altas, lo que permitió alcanzar una mayor eficiencia en la remoción  
411 del colorante y la DQO en menos tiempo.

412 **Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)**

**LCG** = Lia Concepción-Gamarra

**LCV** = Luis Carrasco-Venegas

LCP = Luz Castañeda-Pérez

413

**Conceptualization:** LCG,LCP, LCV

**Data curation:** LCG, LCV, LCP

**Formal Analysis:** LCG, LCV

**Funding acquisition:** LCG

**Investigation:** LCG, LCP,LCV

**Methodology:** LCG, LCP,LCV

**Project administration:** LCG, LCP, LCV

**Resources:** LCG, LCV

**Software:** LCV,LECG

**Supervision:** LCP, LCV

**Validation:** LCG, LCV, LCP

**Visualization:** LCG, LCP, LCV

**Writing – original draft:** LCG, LCV, LCP

**Writing – review & editing:** LCG, LCP, LCV

414

## 415 **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

416 Abdul-Rahman, N., Jol, C.J., Linus, A.A., Wan-Borhan, W.W.S., Abdul-Jalal, N.S.,

417 Baharudin, N., Samsul, S.N.A., Mutalip, N.A., Jitai, A.A., & Hamid, D.F.A.A.A.

418 (2023). Continuous electrocoagulation treatment system for partial desalination of

419 tropical brackish peat water in Sarawak coastal peatlands. *Science of the Total*

420 *Environment*, 880, 163517.

421 Ahangarnokolaei, M. A., Attarian, P., Ayati, B., Ganjidoust, H., & Rizzo, L. (2021). Life

422 cycle assessment of sequential and simultaneous combination of

423 electrocoagulation and ozonation for textile wastewater treatment. *Journal of*  
424 *Environmental Chemical Engineering*, 9, 106251.

425 Alizadeh, M., Ghahramani, E., Zarrabi, M., & Hashemi, S. (2015). Efficient de-  
426 colorization of methylene blue by electro-coagulation method: Comparison of  
427 iron and aluminum electrode. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical*  
428 *Engineering*, 34, 39–47.

429 Ambaye, T. G., & Hagos, K. (2020). Photocatalytic and biological oxidation treatment of  
430 real textile wastewater. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5,  
431 Article 28.

432 Aquino, T. (2017). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil artesanal por  
433 fotocatalisis homogénea y heterogénea [Tesis de maestría, Universidad Nacional  
434 del Centro del Perú]. Repositorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

435 Asfaha, Y.G., Tekile, A., & Zewge, F. (2022). Hybrid process of electrocoagulation and  
436 electrooxidation system for wastewater treatment: A review. *Cleaner Engineering*  
437 *and Technology*, 4, 100261.

438 Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S., & Ersöz, G. (2019).  
439 Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of  
440 operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process*  
441 *Safety and Environmental Protection*, 129, 47–54.

442 Bilińska, L., Blus, K., Gmurek, M., & Ledakowicz, S. (2019). Coupling of  
443 electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse. *Chemical*  
444 *Engineering Journal*, 358, 992–1001.

445 Bulca, Ö., Palas, B., Atalay, S., & Ersöz, G. (2021). Performance investigation of the  
446 hybrid methods of adsorption or catalytic wet air oxidation subsequent to



447 electrocoagulation in treatment of real textile wastewater and kinetic  
448 modelling. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101821.

449 Fluence Corp Ltd. (2018). Award acknowledges Fluence's excellence in innovation and  
450 growth. *Membrane Technology*, 2018, 4.

451 Ganesh, R., Boardman, G. D., & Michelsen, D. (1994). Fate of azo dyes in sludges. *Water*  
452 *Research*, 28, 1367–1376.

453 GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez-García, M. Á. (2020). Efficient treatment for  
454 textile wastewater through sequential electrocoagulation, electrochemical  
455 oxidation and adsorption processes: Optimization and toxicity  
456 assessment. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 878, 114578.

457 Gümüş, D., & Akbal, F. (2011). Photocatalytic degradation of textile dye and  
458 wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 216, 117–124.

459 Kalia, S., Dalvi, V., Nair, V. K., Samuchiwal, S., & Malik, A. (2023). Hybrid  
460 electrocoagulation and laccase mediated treatment for efficient decolorization of  
461 effluent generated from textile industries. *Environmental Research*, 228, 115868.

462 Ledakowicz, S., Solecka, M., & Zylla, R. (2001). Biodegradation, decolourisation, and  
463 detoxification of textile wastewater enhanced by advanced oxidation  
464 processes. *Journal of Biotechnology*, 89, 175–184.

465 López, V.G., & Crespi, M.R. (2015). *Gestión de los efluentes de la industria textil*.  
466 Instituto Nacional de Tecnología Industrial, *Cuaderno Tecnológico*, 18: 1–33.  
467 <http://hdl.handle.net/2117/87574>

468 Minero, C. (1995). A rigorous kinetic approach to model primary oxidative steps of  
469 photocatalytic degradations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 38, 421–  
470 430.

471 Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). TiO<sub>2</sub> photocatalysis: Design and  
472 applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry  
473 Reviews*, 13, 169-189.

474 Ribeiro, M.C.M., Starling, M.C.V.M., Leão, M.M.D., & de Amorim, C.C. (2017). Textile  
475 wastewater reuse after additional treatment by Fenton's reagent. *Environmental  
476 Science and Pollution Research*, 24, 6165–6175.

477 Rodríguez, M., Sarria, V., Esplugas, S., & Pulgarin, C. (2002). Photo-fenton treatment of  
478 a biorecalcitrant wastewater generated in textile activities: Biodegradability of the  
479 photo-treated solution. *Journal of Photochemistry and Photobiology A:  
480 Chemistry*, 151, 129–135.

481 Shams, M., Balouchi, H., Alidadi, H., Asadi, F., Goharshadi, E. K., Rezanian, S., Rtimi, S.,  
482 Anastopoulos, I., Bonyadi, Z., Mehranzamir, K., & Giannakoudakis, D. A. (2021).  
483 Coupling electrocoagulation and solar photocatalysis for electro- and photo-catalytic  
484 removal of carmoisine by Ag/graphitic carbon nitride: Optimization by process  
485 modeling and kinetic studies. *Journal of Molecular Liquids*, 340, 116917.

486 Suárez-Escobar, A., Pataquiva-Mateus, A., & López-Vasquez, A. (2016).  
487 Electrocoagulation - Photocatalytic process for the treatment of lithographic  
488 wastewater. Optimization using response surface methodology (RSM) and kinetic  
489 study. *Catalysis Today*, 266, 120–125.

- 490 Tezcan, U.U., & Aytac, E. (2013). Electrocoagulation in a packed bed reactor-complete  
491 treatment of color and cod from real textile wastewater. *Journal of Environmental*  
492 *Management*, *123*, 113–119.
- 493 Torres, N. H., Souza, B. S., Ferreira, L. F. R., Lima, Á. S., dos Santos, G. N., & Cavalcanti,  
494 E.B. (2019). Real textile effluents treatment using coagulation/flocculation  
495 followed by electrochemical oxidation process and ecotoxicological  
496 assessment. *Chemosphere*, *236*, 124309.
- 497 Wang, Y. (2000). Solar photocatalytic degradation of eight commercial dyes in TiO<sub>2</sub>  
498 suspension. *Chinese Journal of Catalysis*, *21*, 327–331.
- 499 Weber, E.J., & Adams, R. L. (1995). Chemical- and Sediment-Mediated Reduction of the  
500 Azo Dye Disperse Blue 79. *Environmental Science and Technology*, *29*, 1163–  
501 1170.
- 502 Zazou, H., Afanga, H., Akhouairi, S., Ouchtak, H., Addi, A. A., Akbour, R. A., Assabbane,  
503 A., Douch, J., Elmchaouri, A., Duplay, J., Jada, A., & Hamdani, M. (2019).  
504 Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with  
505 electrochemical advanced oxidation process. *Journal of Water Process*  
506 *Engineering*, *28*, 214–221.
- 507 Zhang, F., Zhao, J., Shen, T., Hidaka, H., Pelizzetti, E., & Serpone, N. (1998). TiO<sub>2</sub>-  
508 assisted photodegradation of dye pollutants II. Adsorption and degradation  
509 kinetics of eosin in TiO<sub>2</sub> dispersions under visible light irradiation. *Applied*  
510 *Catalysis B: Environmental*, *15*, 147–156.

511 Received October 10, 2024.

512 Accepted December 13, 2024.