



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE DESACTIVACIÓN OXIDATIVA DEL ALGA VERDE
(*Chlorella vulgaris*; BEYERINCK, M.W.) MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN REACTOR
ELECTROLÍTICO DE LECHO FIJO**

César Daniel Saquec Tzuquen

Asesorado por el Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

Guatemala, septiembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE DESACTIVACIÓN OXIDATIVA DEL ALGA VERDE
(*Chlorella vulgaris*; BEYERINCK, M.W.) MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN REACTOR
ELECTROLÍTICO DE LECHO FIJO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CÉSAR DANIEL SAQUEC TZUQUEN

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gomez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortíz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Meré
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE DESACTIVACIÓN OXIDATIVA DEL ALGA VERDE
(*Chlorella vulgaris*; BEYERINCK, M.W.) MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN REACTOR
ELECTROLÍTICO DE LECHO FIJO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de febrero de 2018.



César Daniel Saquec Tzuquen

Guatemala, 25 de abril de 2018

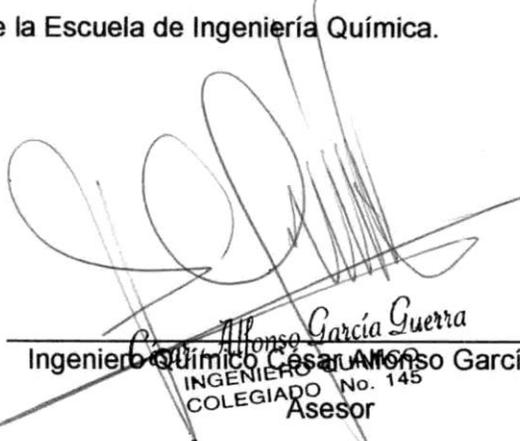
Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ing. Carlos Wong

Le deseo muchos éxitos en sus actividades diarias y en cada una de las actividades en que se desempeña.

Por medio de la presente hago de su conocimiento que el informe final de Graduación titulado: "EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE DESACTIVACIÓN OXIDATIVA DEL ALGA VERDE (*Chlorella vulgaris*; BEYERINCK, M.W.) MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN REACTOR ELECTROLÍTICO DE LECHO FIJO", del estudiante de Ingeniería Química César Daniel Saquec Tzuquen, identificado con el CUI 2100 74302 0401 y registro académico 201212646, ha sido revisado y aprobado por mi persona bajo los criterios que considero adecuados para el informe final de Graduación según los requerimientos de la Escuela de Ingeniería Química.

Atentamente,



Ingeniero Químico Alfonso García Guerra
INGENIERO QUÍMICO Alfonso García Guerra
COLEGIADO No. 145
Asesor



Guatemala, 09 de agosto de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.028.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **025-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-**

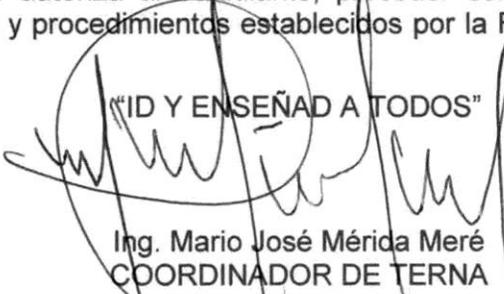
Solicitado por el estudiante universitario: **César Daniel Saquec Tzuquen**.
Identificado con número de carné: **2100 74302 0401**.
Identificado con registro académico: **2012-12646**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE DESACTIVACIÓN OXIDATIVA DEL ALGA VERDE (*Chlorella vulgaris*; BEYERINCK, M.W.) MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN REACTOR ELECTROLÍTICO DE LECHO FIJO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **César Alfonso García Guerra**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Mario José Mérida Meré
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.025.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del (la) estudiante, **CÉSAR DANIEL SAQUEC TZUQUEN** titulado: **"EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE DESACTIVACIÓN OXIDATIVA DEL ALGA VERDE (*Chlorella vulgaris*; BEYERINCK, M.W.) MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN REACTOR ELECTROLÍTICO DE LECHO FIJO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, septiembre de 2018

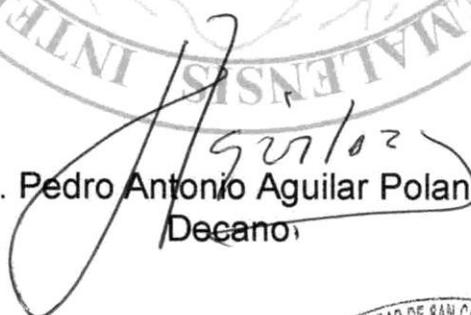
FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE DESACTIVACIÓN OXIDATIVA DEL ALGA VERDE (*Chlorella vulgaris*; BEYERINCK, M.W.) MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN REACTOR ELECTROLÍTICO DE LECHO FIJO**, presentado por el estudiante universitario: **César Daniel Saquec Tzuquen**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, Septiembre de 2018



ACTO QUE DEDICO A:

Mi abuela

Cristina Caal (q. e. p. d.) por haber sido mi segunda madre, mi protectora, un ejemplo de mujer y por todo su amor incondicional. Su recuerdo siempre será una gran motivación para mí. Este acto está dedicado especialmente a ella.

Mi Madre

Olga Marina Tzuquen Caal por su gran amor, paciencia, apoyo moral, económico, dedicación y lucha incansable. Este también es su logro.

Mi padre

Daniel Saquec por brindarme la oportunidad de estudiar, por su apoyo y ánimos para lograr mis metas. Este también es su logro.

Mis hermanos

Oscar, Ana Raquel y Daniel Enrique Saquec Tzuquen, por su apoyo, ánimos y porque sin ellos, mi vida no sería igual.

Mis padrinos

Mario Sincal y Carmela Guoron, por tenerme presente siempre en su vida y por su cariño hacía mí y mi familia.

Mis amigos más cercanos

Por las alegrías, aventuras, ánimos y por todo el apoyo incondicional que me han brindado.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de alcanzar la educación superior y por tantas experiencias gratas para mi formación personal y profesional.
Facultad de Ingeniería	Por darme las herramientas necesarias para realizar mis estudios universitarios.
Mi familia	Por creer en mí y por apoyarme desde los inicios de mi vida universitaria. Son mi gran inspiración y motivación.
Mis abuelos	Porque sin su amor, lucha y esfuerzo constante no podría estar culminando mi carrera universitaria.
Mis amigos de la universidad	Marlon Méndez, David Noj, Guillermo Cúmez, Luis Velázquez, Carlos Chicojay, Moisés López, Ivan Chanchavac, Ángel Ajcabul, José Interiano, Estuardo Maczul, Mariano Cap, Byron Carcuz, Edy Méndez, Luis Cruz, Elder Villatoro, Francisco Catalán, Franklin Ajcholon, Rodrigo Arévalo, Angy Yoc, Ingrid y Arlene Leiva por ser parte importante en el desarrollo de mi carrera.

Mis amigos más cercanos

Wilson Vicente, Alejandra Sipac, Robinson Tejaxún, Luisa Castellanos, Aldo Suria, Cecilia Sinaj, Fredy Tol, Glendy Pecher, Franklin Tian, Claudia Chopen, Ivanna Reyes y Juan Miculax por las aventuras, risas, compañía durante los desvelos y apoyo a lo largo de los años.

Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

Por ser mi asesor y por haber compartido todo su conocimiento y profesionalismo para la realización de este proyecto.

Los profesionales

Inga. Thelma Cano, Ing. Mario Mérida y Lic. Sandra Velásquez por la formación y apoyo que me brindaron.

C.E.M.A.

Por haber donado la materia prima para la realización de este proyecto. Especialmente al Lic. Josué García.

Universidad de Cagliari

Por haberme permitido obtener los conocimientos necesarios para la realización de este proyecto. Especialmente a Anna Aloï, Fabrizio Lai, Sara Monasterio y Michele Mascia.

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
3.1.	Variables	31
3.1.1.	Descripción de variables manipuladas.....	31
3.2.	Delimitación del campo de estudio	32
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	32
3.4.	Recursos materiales disponibles	32
3.4.1.	Materiales para la construcción del reactor.....	32
3.4.2.	<i>Chlorella vulgaris</i>	33
3.4.3.	Instrumentos de medición.....	33
3.4.4.	Cristalería	33
3.4.5.	Equipo auxiliar	34
3.5.	Técnica cuantitativa.....	35
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	35
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	36
3.7.1.	Variables utilizadas para el análisis de resultados ..	36
3.7.2.	Tabulación y ordenamiento de resultados	36
3.7.3.	Plan de análisis de los resultados.....	93
3.7.3.1.	Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables	93
3.7.3.2.	Programas por utilizar para análisis de datos.....	94
3.8.	Análisis estadístico.....	94
3.8.1.	Media aritmética	94
3.8.2.	Error de precisión	94
3.8.2.1.	Desviación estándar	94
3.8.2.2.	Error de precisión	95
3.8.3.	Error de incertidumbre	95
3.8.4.	Análisis de varianzas (ANOVA)	95

	3.8.4.1.	Varianza de cada muestra.....	95
	3.8.4.2.	Estimación interna de varianzas.....	96
	3.8.4.3.	Varianza de las medias muestrales.....	96
	3.8.4.4.	Parámetro F de Fisher	96
	3.8.4.5.	Grados de libertad.....	96
	3.9.	Diagramas para construcción del reactor electrolítico continuo y esquema para fase experimental.....	97
4.		RESULTADOS.....	101
	4.1.	Adaptación y construcción del reactor electrolítico de lecho fijo.....	101
	4.2.	Efecto de la densidad de corriente en el tratamiento electroquímico estudiado	105
	4.3.	Efecto sobre el porcentaje de remoción total a diferentes condiciones de densidad de corriente y flujo volumétrico	109
	4.4.	Efecto de la transmitancia inicial sobre el porcentaje de remoción total a diferentes condiciones de densidad de corriente y flujo volumétrico	113
	4.5.	Comportamiento de la absorbancia respecto a la duración del tratamiento aplicado.....	115
5.		INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	117
		CONCLUSIONES.....	125
		RECOMENDACIONES.....	127
		BIBLIOGRAFÍA.....	129
		APÉNDICES.....	139
		ANEXOS	187

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ejemplo de lago eutrofizado.....	5
2.	Ejemplo de eutrofización natural y acelerada	7
3.	Contaminación de ríos y lagos	8
4.	Alga <i>Chlorella vulgaris</i>	11
5.	Ultraestructura esquemática de <i>Chlorella v.</i> (Beyerinck, M.W.) representando diferentes organelos	13
6.	Celda electroquímica, modelo con electrodos de Zn/Zn ²⁺ y Fe ²⁺ /Fe ³⁺	23
7.	Electrolisis de cloruro de sodio.....	24
8.	Reacción redox de NAD (coenzima celular en algas).....	26
9.	Mecanismo de inactivación de la <i>E. coli</i>	28
10.	Morfología de inactivación de la spora <i>B. subtilis</i>	29
11.	Diagrama del reactor electrolítico y sus componentes.....	97
12.	Diagrama del reactor electrolítico y medidas.....	98
13.	Esquema de fase experimental.....	99
14.	Reactor electrolítico continuo vista frontal.....	101
15.	Reactor electrolítico continuo vista lateral.....	102
16.	Tapones del reactor electrolítico.....	103
17.	Acoplamiento final del tubo, adaptador, tapón del reactor electrolítico y conector de bronce a presión	104
18.	Remoción total promedio en función del tiempo a flujo volumétrico constante (550 mL min ⁻¹) con absorbancia inicial alta (ABS = 0,165 – 0,177; λ = 680 nm)	105

19.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente graficada en la Figura 18	106
20.	Remoción total promedio en función del tiempo a flujo volumétrico constante (300 mL min ⁻¹) con absorbancia inicial baja (ABS = 0,102 – 0,119; λ = 680 nm).....	107
21.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente graficada en la Figura 20	108
22.	Remoción total promedio para absorbancia inicial alta en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y flujo volumétrico.....	109
23.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a flujo volumétrico de 300 y 550 mL min ⁻¹ , graficados en la Figura 22	110
24.	Remoción total promedio para absorbancia inicial baja en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y flujo volumétrico.....	111
25.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a flujo volumétrico de 300 y 550 mL min ⁻¹ , graficados en la Figura 24	112
26.	Remoción total promedio en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y absorbancia inicial (λ = 680 nm), con flujo volumétrico constante (300 mL min ⁻¹).....	113
27.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a Absorbancia Inicial Alta y Baja, graficadas en la Figura 26.....	114
28.	Absorbancia en función del tiempo con absorbancia inicial alta (ABS = 0,169; λ = 680 nm; Q = 550 mL min ⁻¹ ; ρ_i = 7,15 A m ⁻²).....	115

29.	Absorbancia en función del tiempo con absorbancia inicial baja (ABS = 0,117; $\lambda = 680 \text{ nm}$; $Q = 550 \text{ mL min}^{-1}$; $\rho_i = 4,29 \text{ A m}^{-2}$).....	116
30.	Remoción total promedio en función del tiempo a flujo volumétrico constante (550 mL min^{-1}) con absorbancia inicial alta (ABS = 0,165 – 0,177; $\lambda = 680 \text{ nm}$)	140
31.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente graficada en la Figura 18.....	143
32.	Remoción total promedio en función del tiempo a flujo volumétrico constante (300 mL min^{-1}) con absorbancia inicial baja (ABS = 0,102 – 0,119; $\lambda = 680 \text{ nm}$)	145
33.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente graficada en la Figura 20.....	148
34.	Remoción total promedio para Absorbancia Inicial Alta en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y flujo volumétrico	150
35.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a flujo volumétrico de 300 y 550 mL min^{-1} , graficados en la Figura 22.....	156
36.	Remoción total promedio para Absorbancia Inicial Baja en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y flujo volumétrico	161
37.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a flujo volumétrico de 300 y 550 mL min^{-1} , graficados en la Figura 24.....	167
38.	Remoción total promedio en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y absorbancia inicial ($\lambda = 680 \text{ nm}$), con flujo volumétrico constante (300 mL min^{-1}).....	172

39.	Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a Absorbancia Inicial Alta y Baja, graficadas en la Figura 26.....	178
40.	Absorbancia en función del tiempo con absorbancia inicial alta (ABS = 0,169; λ = 680 nm; Q = 550 mL min ⁻¹ ; ρ_i = 7,15 A m ⁻²).....	183
41.	Absorbancia en función del tiempo con absorbancia inicial alta (ABS = 0,117; λ = 680 nm; Q = 550 mL min ⁻¹ ; ρ_i = 4,29 A m ⁻²).....	185
42.	Empaques tipo anillos Raschig, vista superior.....	187
43.	Empaques tipo anillos Raschig, vista frontal.....	187
44.	Empaques tipo anillos en espiral, vista superior.....	188
45.	Empaques tipo anillos en espiral, vista frontal.....	188

TABLAS

I.	Variables de control	31
II.	Descripción de variables manipuladas.....	31
III.	Prueba No. 1 realizada el 18/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [300 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm ⁻²].....	36
IV.	Prueba No. 2 realizada el 18/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [400 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm ⁻²].....	38
V.	Prueba No. 3 realizada el 19/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [500 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm ⁻²].....	39

VI.	Prueba No. 4 realizada el 19/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [550 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm ⁻²].	41
VII.	Prueba No. 5 realizada el 19/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [300 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente [0,57; 0,69 mA cm ⁻²].	43
VIII.	Prueba No. 6 realizada el 23/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [300 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm ⁻²].	45
IX.	Prueba No. 7 realizada el 23/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm ⁻²].	46
X.	Prueba No. 8 realizada el 23/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [500 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm ⁻²].	48
XI.	Prueba No. 9 realizada el 24/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [550 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm ⁻²].	50
XII.	Prueba No. 10 realizada el 24/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [300 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm ⁻²].	51
XIII.	Prueba No. 11 realizada el 24/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm ⁻²].	53
XIV.	Prueba No. 12 realizada el 25/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400, 500 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente [0,43 mA cm ⁻²].	55

XV.	Prueba No. 13 realizada el 25/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [550 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm ⁻²].	57
XVI.	Prueba No. 14 realizada el 25/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [300 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm ⁻²].	59
XVII.	Prueba No. 15 realizada el 26/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm ⁻²].	61
XVIII.	Prueba No. 16 realizada el 26/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [500 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm ⁻²].	63
XIX.	Prueba No. 17 realizada el 26/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [550 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm ⁻²].	65
XX.	Prueba No. 18 realizada el 27/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [300 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,72 mA cm ⁻²].	67
XXI.	Prueba No. 19 realizada el 27/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,72 mA cm ⁻²].	68
XXII.	Prueba No. 20 realizada el 27/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400; 500 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente [0,72 mA cm ⁻²].	70
XXIII.	Prueba No. 21 realizada el 27/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [550 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,72 mA cm ⁻²].	72

XXIV.	Prueba No. 22 realizada el 30/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [400 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente [0,57; 0,69 mA cm ⁻²].	74
XXV.	Prueba No. 23 realizada el 30/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [500 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm ⁻²].	76
XXVI.	Prueba No. 24 realizada el 30/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [550 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente [0,57; 0,69 mA cm ⁻²].	78
XXVII.	Prueba No. 25 realizada el 31/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [550 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm ⁻²].	79
XXVIII.	Prueba No. 26 realizada el 31/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [500, 550 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente [0,43 mA cm ⁻²].	81
XXIX.	Prueba No. 27 realizada el 31/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [400 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm ⁻²].	83
XXX.	Prueba No. 28 realizada el 02/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm ⁻²].	84
XXXI.	Prueba No. 29 realizada el 02/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,72 mA cm ⁻²].	86
XXXII.	Prueba No. 30 realizada el 02/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300, 400 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente [0,72 mA cm ⁻²].	88

XXXIII.	Prueba No. 31 realizada el 03/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300, 500 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente [0,72 mA cm ⁻²].	90
XXXIV.	Prueba No. 32 realizada el 03/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300, 550 mL min ⁻¹] e intensidad de corriente [0,43; 0,57 mA cm ⁻²].	91
XXXV.	Descripción de cada curva de la Figura 18	141
XXXVI.	Condiciones de la experimentación para la Figura 18	141
XXXVII.	Descripción de cada curva de la Figura 20	146
XXXVIII.	Condiciones de la experimentación para la Figura 20	146
XXXIX.	Descripción de cada curva de la Figura 22	151
XL.	Condiciones de la experimentación para la Figura 22	151
XLI.	Descripción de cada curva de la Figura 24	162
XLII.	Condiciones de la experimentación para la Figura 24	162
XLIII.	Descripción de cada curva de la Figura 26	173
XLIV.	Condiciones de la experimentación para la Figura 26	173
XLV.	Descripción de la curva de la Figura 28	184
XLVI.	Condiciones de la experimentación para la Figura 28	184
XLVII.	Descripción de la curva de la Figura 29	186
XLVIII.	Condiciones de la experimentación para la Figura 29	186

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ABS	Absorbancia
ABS₀	Absorbancia inicial
A_{0A}	Absorbancia inicial alta
A_{0B}	Absorbancia inicial baja
A	Amperio
ANOVA	Análisis de varianza
cm²	Centímetro cuadrado
dm²	Decímetro cuadrado
ρ_i	Densidad de corriente
F	Factor F de Fisher
F_c	Factor F crítico de Fisher
Q̇	Flujo volumétrico
°C	Grados centígrados
g	Gramo
Hz	Hertz
H₀	Hipótesis nula
H₁	Hipótesis alternativa
I	Intensidad de corriente
Kg	Kilogramo
λ	Longitud de onda
m²	Metros cuadrados
m³	Metros cúbicos
μm	Micrómetro

mA	Mili amperio
mL	Mililitro
mV	Mili voltio
min	Minuto
nm	Nanómetro
PVC	Policloruro de vinilo
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrogeno

GLOSARIO

Absorbancia	Medida de la atenuación de una radiación al atravesar una sustancia, se expresa como el logaritmo de la relación entre la intensidad saliente y la entrante.
ANOVA	Análisis estadístico de varianzas para las medias.
Espectrofotometría	Medición de la cantidad de energía radiante que absorbe un sistema químico en función de la longitud de onda de la radiación.
Lecho fijo	Se refiere a la sección del reactor que se mantiene inmóvil en el reactor, en este caso se refiere a los electrodos.
Oxidación	Proceso mediante el cual se degrada la materia orgánica e inhibe su crecimiento.
pH	En una escala de 1 a 14, indica el grado de acidez del agua a 25°C.
Remoción total	Cantidad, en porcentaje, de rendimiento del tratamiento aplicado.

Temperatura

Es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.

RESUMEN

Para evaluar la efectividad del tratamiento electroquímico para la desactivación biológica del alga *Chlorella vulgaris* se utilizó un reactor electrolítico de lecho fijo adaptado y construido para variaciones de densidad de corriente, flujo volumétrico y absorbancia inicial.

Se construyó y adaptó el reactor utilizando material de PVC, se realizaron pruebas de funcionamiento previo a iniciar la recolección de datos con los diferentes tratamientos propuestos. El reactor trabajó con efectividad y estabilidad durante toda la fase experimental.

Se realizaron 3 repeticiones de los tratamientos aplicados, los cuales incluyeron cuatro variaciones de flujo volumétrico y densidad de corriente, también, dos variaciones de absorbancia inicial (absorbancia inicial alta y baja).

Al finalizar la recolección de datos, se analizaron gráficamente según cada objetivo específico propuesto. Para darle validez estadística se realizaron análisis de varianza de 1 y 2 factores determinando así la existencia o no de diferencia significativa entre los datos.

Se determinó que para una absorbancia inicial alta [0,165; 0,177] se lograron oxidaciones más efectivas cuando la densidad de corriente directa era máxima [7,15 A m⁻²]. Mientras que para los tratamientos para una absorbancia inicial baja [0,102; 0,119] no existe diferencia significativa entre los datos.

También, se determinó que para una absorbancia inicial alta [0,165; 0,193] se lograron oxidaciones más efectivas cuando el flujo volumétrico era mínimo [300 mL min⁻¹]. Mientras que para los tratamientos para una absorbancia inicial baja [0,102; 0,120] no existe diferencia significativa entre los datos.

Además, se determinó que a las condiciones de flujo volumétrico [300 mL min⁻¹] y densidad de corriente [4,29; 7,15 A m⁻²] trabajadas, se lograron oxidaciones más efectivas cuando la absorbancia inicial era alta [0,177; 0,193].

Finalmente, se comprobó que el mecanismo del tratamiento electrolítico evaluado ocurre en tres etapas, para todos los tratamientos aplicados. Siendo la etapa I, correspondiente a los primeros 20 min, en la que ocurre la oxidación electrolítica más efectiva.

OBJETIVOS

General

Evaluar el tratamiento electroquímico mediante la oxidación constitutiva de los componentes del alga verde *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.) contenida en soluciones acuosas, efectuando la electrolisis en un reactor de lecho fijo con electrodos tridimensionales a nivel laboratorio.

Específicos

1. Construir una celda electrolítica continua tipo reactor de lecho fijo (electrodos inoxidables) para evaluar el tratamiento electroquímico.
2. Determinar el efecto en la reducción en la transmitancia por efecto de la oxidación electroquímica en función de las variaciones en la densidad de corriente (mA dm^{-2}), en base a un flujo volumétrico y transmitancia inicial de las suspensión de alga *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.).
3. Determinar el efecto en la reducción en la transmitancia por efecto de la oxidación electroquímica en función de las variaciones en la flujo volumétrico (mL min^{-2}), en base a la densidad de corriente y transmitancia inicial de las suspensión de alga *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.).
4. Determinar el efecto en la reducción en la transmitancia por efecto de la oxidación electroquímica en función de las variaciones en la

transmitancia inicial de las suspensión de alga *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.), en base a la densidad de corriente y flujo volumétrico.

5. Evaluar la existencia de diferencia significativa entre los datos obtenidos mediante un análisis de varianza simple (ANOVA).

HIPÓTESIS

- Es posible evaluar la oxidación electroquímica del alga verde *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.) en solución acuosa mediante un tratamiento electroquímico.

Hipótesis nulas

- H_0 : No existe diferencia significativa entre los tratamientos realizados en función de la variación de la densidad de corriente directa.
- H_0 : No existe diferencia significativa entre los tratamientos realizados en función de la variación del flujo volumétrico.
- H_0 : No existe diferencia significativa entre los tratamientos realizados en función de la transmitancia inicial de la muestra.

Hipótesis alternativas

- H_1 : Existe diferencia significativa entre los tratamientos realizados en función de la variación de la densidad de corriente directa.
- H_1 : Existe diferencia significativa entre los tratamientos realizados en función de la variación del flujo volumétrico.
- H_1 : Existe diferencia significativa entre los tratamientos realizados en función de la transmitancia inicial de la muestra.

INTRODUCCIÓN

El alga verde (*Chlorella vulgaris*, Beyerinck, M.W.) es conocida debido a la fácil floración en medios de agua dulce y salada en un gran rango de temperaturas y humedad, es capaz de producir y dispersar toxinas en el agua, lo cual es un problema para la salud y el ambiente.

Estudios para el tratamiento y remoción de algas se han llevado a cabo, por ejemplo: métodos de electrocoagulación, electro-floculación, adición de hormonas y prevención.

Respecto al tratamiento electroquímico, los estudios se han llevado a cabo en diferentes condiciones: modelación de reactores, tipos de electrodos, oxidantes utilizados para la remoción, sistemas continuo y discontinuo, densidades de corriente, etc.

En este trabajo se presenta la investigación de un tratamiento electroquímico para la remoción de alga verde, utilizando el alga verde *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.). Para ello se utilizó un reactor de lecho fijo, equipado con lana de acero inoxidable utilizado como ánodo y cátodo. La electrolisis se llevó a cabo en un sistema por lotes con recirculación. La absorbancia del pigmento clorofila-a de la electrolisis fue medida mediante espectrofotometría visible a 680 nm.

Los resultados experimentales obtenidos fueron interpretados mediante técnica estadística y representación gráfica para determinar: la máxima desactivación oxidativa alcanzada luego del tratamiento electroquímico y bajo

condiciones de flujo volumétrico, densidad de corriente y transmitancia inicial en el tratamiento electrolítico estudiado a temperatura ambiente promedio.

1. ANTECEDENTES

Varios estudios se han realizado sobre el tratamiento electroquímico de algas con la finalidad de controlar la calidad y las amenazas en cuerpos de agua. En algunos métodos, la desinfección, inactivación y remoción del alga se realizaron a bajos niveles de concentración de cloro libre, hipoclorito de sodio o ácido hipocloroso producidos en soluciones salinas.

En 2014 la desactivación de la *M. aeruginosa* (KÜTZING, F.T.) por medio del tratamiento electroquímico fue estudiada en sistema continuo utilizando una celda electroquímica cilíndrica de lecho fijo, trabajando en sistema continuo. La celda fue equipada con electrodos tridimensionales de titanio, el cátodo fue recubierto con platino y ánodo fue recubierto con una mezcla de óxidos de Ir/Ru. En dicho proyecto los resultados en la reducción de la transmitancia inicial con mayor eficiencia (33.95%) fueron alcanzados a condiciones de alta densidad de corriente (2 mA cm^{-2}) y a bajo caudal ($0.025 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$). Considerando que a la entrada del reactor el flujo volumétrico debe tener por lo menos 400 mg dm^{-3} de iones de cloruro añadidos como NaCl para alcanzar una desactivación apreciable.¹

Otra investigación fue llevada a cabo sobre el tratamiento electroquímico como paso preoxidativo para la remoción del alga *Chlorella vulgaris* (BEYERINCK, M.W.) utilizando como ánodo el BDD (boron doped diamond – diamante dopado con boro) y cátodo de acero inoxidable. La investigación demostró alta eficiencia de remoción de algas, un 80% a alta densidad de

¹ MONASTERIO et al. *Electrochemical removal of Microcystis Aeruginosa in a fixed bed reactor*. Artículo científico. 2014. Italy. Chemical engineering transactions. Vol. 41.

corriente ($8A\ h\ dm^{-3}$) y a alto flujo de recirculación, agregando $100\ mg\ dm^{-3}$ de iones de cloruro a la solución. Utilizando un reactor comercial (Electro MP-Cell)²

También existen investigaciones sobre la prevención de las aglomeraciones de algas y, como consecuencia, la liberación de toxinas.³

Otros métodos para remoción de algas fueron propuestos, por ejemplo flotación⁴, coagulación⁵ y filtración.^{6 7}

La inhibición del crecimiento de la *Microcystis aeruginosa* (KÜTZING, F.T. 1846) por método electroquímico fue investigada, examinando el efecto de las condiciones operativas, diferentes materiales como electrodos, densidad de corriente y agitación. Se obtuvieron resultados alentadores en los cuales la alta densidad de corriente ($12\ mA\ cm^{-2}$) puede ser utilizada para inhibir el crecimiento orgánico debido a la generación de oxidantes activos. Para ello, se utilizó una celda electrolítica en sistema batch equipada con Ti-RuO₂ y grafito como ánodo y cátodo respectivamente.⁸

² MASCIA, M. et al. *Electrochemical treatment as a pre-oxidative step for algae removal using Chlorella vulgaris as a model organism and BDD anodes*. Artículo científico. 2013. Italy. Chemical engineering journal 219, 512 – 519 p.

³ ZHAO, X. & ZHANG, Y. *Algae-removing and algicidal efficiencies of poly (diallyldimethylammonium chloride) composite coagulants in enhanced coagulation treatment of algae-containing raw water*. Artículo científico. 2011. Chem. Eng. J. 173, 164–170 p.

⁴ CAMPINAS, M. & JOÃO, M. *Evaluation of cyanobacterial cells removal and lysis by ultrafiltration*. Artículo científico. 2010. Sep. Purif. Technol. 70, 345–353 p.

⁵ GHERNAOUT, B. et al. *Algae and cyanotoxins removal by coagulation/flocculation: a review*. Artículo científico. 2010. Desalin. Water Treat. 20, 133–143 p.

⁶ PAN, G. et al. *Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. I. Equilibrium and kinetic screening on the flocculation of Microcystis aeruginosa using commercially available clays and minerals*. Artículo científico. 2006. Environ. Pollut. 141, 195–200 p.

⁷ LAWTON, L.A. et al. *Removal of cyanobacterial toxins (microcystins) and cyanobacterial cells from drinking water using domestic water filters*. Artículo científico. 1998. Water Res. 32, 633–638 p.

⁸ XU, Y. et al. *Study of Microcystis aeruginosa inhibition by electrochemical method*. Artículo científico. 2007. Biochem. Eng. J. 36, 215–220 p.

Respecto a la seguridad ambiental del agua electrolizada, se realizó un estudio en el cual se midió la producción de halógenos orgánicos y derivados. La cual resultó en niveles mucho menores respecto a los valores estándares para agua potable.⁹

Existen muchas investigaciones que tratan la posibilidad de controlar el crecimiento de algas en reservorios y lagos mediante la adición de hormonas de plantas, aluminio, sulfato de cobre o permanganato de potasio.^{10 11}

Estudios de 1999 describen la reducción de más del 99% de algas, bacterias y virus en agua por medio de procesos electrolíticos.¹²

Tratamientos electroquímicos para la inhibición de microorganismos fueron estudiados en ambientes médicos y dentales, también en la industria alimentaria.^{13 14}

⁹ KATAYOSE, M. et al. Safety of electrolyzed seawater for use in aquaculture. Artículo científico. 2007. Japan. Aquaculture 264, 119 – 129 p.

¹⁰ MA, J. & LIU, W.; Effectiveness and mechanism of potassium ferrate (VI) preoxidation for algae removal by coagulation. 2002. Water Res. 36, 871–878 p.

¹¹ BRADLEY, P.M. Plant hormones do have a role in controlling growth and development of algae. Artículo científico. 1991. J. Phycology. 27, 317–321 p.

¹² TSUZUKI, K. et al. Effects of electrochemical treatment on Microcystis extinction. Artículo científico. 1999. Japan. J. Water Environ. Soc. 22, 228– 231 p.

¹³ NIKULIN, V.A. Use of an electrolyzed sodium chloride solution for disinfection in therapeutic and prophylactic institutions. Artículo científico. 1977. Russian. Sov. Med. 12, 105–108 p.

¹⁴ WILK, I.J. et al. Antimicrobial activity of electrolyzed saline solution. Artículo científico. 1987. Sci. Total Environ. 63, 191–197 p.

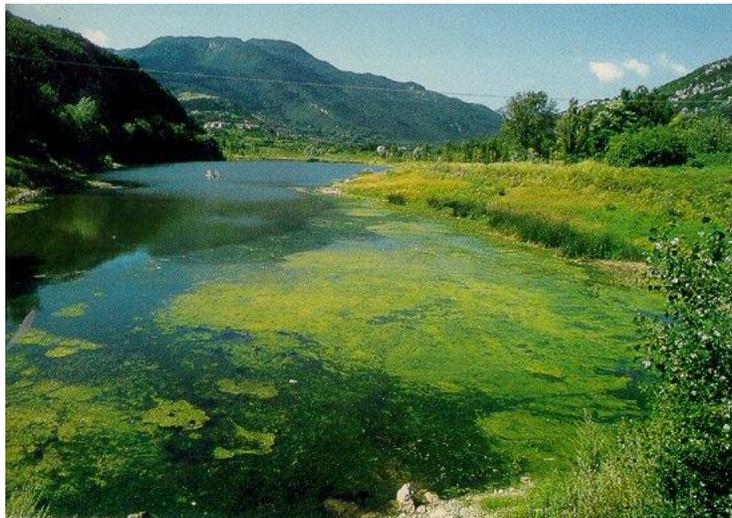
2. MARCO TEÓRICO

2.1. Eutrofización

La eutrofización es un proceso de modificación del equilibrio ecológico de un ambiente acuático. El cuerpo de agua atraviesa 2 fases:

- Un lago de formación reciente, caracterizado por una cierta profundidad, es llamado oligotrófico: agua azul y transparente; el oxígeno disuelto está presente en todo el cuerpo del lago y la biomasa no es muy abundante.
- Al pasar el tiempo, el lago se enriquece de materia orgánica como resultado de la producción fotosintética debida a los organismos vegetales y a la contribución natural del exterior; el lago se convierte en mesotrófico y luego en eutrófico.

Figura 1. **Ejemplo de lago eutrofizado**



Fuente: aspectos medioambientales. <http://library.thinkquest.org/...eutrophication.html>.

Consulta: 05 de mayo de 2017.

Cuando el lago es eutrófico surgen los siguientes fenómenos: disminución de la profundidad, agua color verde-marrón, se reduce la transparencia, aumento de biomasa, proliferación de fitoplancton en la superficie, déficit de oxígeno en el fondo del lago, cuerpos de agua ricos en elementos disueltos reducidos (hierro, manganeso, H₂S, etc.) La transición de un estado a otro requiere de miles de años.

Entonces la eutrofización es provocada por la presencia de los organismos vegetales que, con el proceso de fotosíntesis, pueden utilizar en presencia de luz la materia inorgánica para formar materia orgánica. El grupo vegetal que desempeña el mayor rol de la producción primaria de sustancia orgánica son las algas microscópicas que se encuentran en suspensión en el agua a la cual pertenecen un número elevado de organismos entre los cuales se puede citar la *Chlorella vulgaris* (BEYERINCK, M.W.).

Para proliferar, las algas necesitan de una cierta cantidad de sales nutritivas, compuestas de carbono, azufre y fosforo (factores tróficos). La producción de biomasa, en condiciones de escaso intercambio hídrico dependerá principalmente de la disponibilidad de estos compuestos minerales. Cuando estos son deficientes, la producción de nueva biomasa disminuye hasta no producir más. Si la disponibilidad de minerales se tiene de manera descontrolada, puede dar lugar a la formación de gran cantidad de material orgánico, cuya presencia genera una serie de fenómenos degenerativos.

El proceso de eutrofización puede efectuarse en tiempos muy largos, debido a fenómenos naturales, pero también puede ser causada por actividad antropogénica, desarrollándose en este caso en tiempos muy reducidos.

Figura 2. **Ejemplo de eutrofización natural y acelerada**



Fuente: revista Ejemplode.com. http://www.ejemplode.com/58-administracion/4334-ejemplo_de_eutrofizacion.htm. Consulta: 04 de abril de 2017.

De los factores tróficos, el fósforo es el factor limitante para el crecimiento de algas en el cuerpo hídrico.

Un aporte notable a la carga total de fósforo en los cuerpos hídricos es causado por la actividad humana. El fósforo está presente en mayor cantidad en los desechos domésticos y desechos industriales. También aportan fósforo los drenajes de suelo cultivado y las áreas urbanizadas.

Cuando el crecimiento de algas no es controlado, da lugar a la formación de cuerpos grandes de biomasa la cual termina siendo degradada por hongos

microscópicos y bacterias, que operan en condiciones aeróbicas usando el oxígeno disuelto.

Figura 3. Contaminación de ríos y lagos



Fuente: aspectos ambientales, contaminación de ríos lagos.

<http://library.thinkquest.org/...eutrophication.html>. Consulta: 04 de abril de 2017.

Los problemas se manifiestan en el caso en el que los procesos de descomposición de la biomasa que se realizan con consumo excesivo de oxígeno. Si la velocidad de consumo es superior a la cual el oxígeno es regenerado por difusión o por la fotosíntesis de las mismas algas, se tendrá un déficit de oxígeno y se instauran condiciones anaeróbicas. La cantidad excesiva de fitoplancton, también favorece las condiciones anaeróbicas recubriendo la superficie del agua, esto impide la penetración de la luz y la producción fotosintética del oxígeno.

Al llegar a la condición anaeróbica, los organismos aeróbicos se hacen cargo de los organismos anaerobios. Estos realizan el proceso de demolición de la biomasa por la liberación de compuestos que pueden ser tóxicos (especialmente si están presentes cianobacterias) entre los cuales se encuentran el amoníaco, sulfuro de hidrógeno y diversos compuestos orgánicos derivados de la fermentación y los procesos de putrefacción de sustancias proteicas.

Los estudios demuestran la existencia de efectos negativos en la salud humana por contacto o ingestión de células o toxinas de cianobacterias.¹⁵ Estos incluyen irritación de la piel, reacciones alérgicas, dolor en los músculos y las articulaciones, la gastroenteritis, daño al hígado y riñón y varios efectos neurológicos.

Además de la presencia de toxinas peligrosas para la salud humana, la eutrofización tiene serias consecuencias económicas; produce efectos negativos sobre el turismo, aumenta significativamente el costo del tratamiento del agua a causa de los reactivos necesarios para eliminar no sólo los cuerpos, sino también los productos de su metabolismo. Esto causa pérdida de la biodiversidad y tienen efectos negativos sobre la pesca.

2.2. Algas

Son organismos, generalmente, unicelulares que existen en gran variedad de tamaños. Poseen pigmentos como la clorofila, xantofila, etc. Por lo regular, existen sumergidas aunque también viven flotando o creciendo sobre piedras, pantanos o suelo húmedo. Se encuentran en agua dulce y en agua de mar.

¹⁵ CODD, G. A.; Cyanobacterial toxins, the perception of water quality, and the prioritisation of eutrophication control. Artículo científico. Ecological Engineering 16, 2000. 51–60 p.

Abundan en ámbitos con gran cantidad de luz y temperaturas entre 20 y 35°C. En concentraciones abundantes causan problemas en los suministros de agua, como mal olor, obstaculizan filtros, entorpecen la fotosíntesis de otras plantas e impiden la aireación de cuerpos de agua con la consecuente muerte de peces.

Se dividen de acuerdo a los pigmentos que contienen en:

- *Mixophytas o cianophytas.*
- *Chrysophytas*
- *Phaeophytas*
- *Rhodophytas*
- *Chllorophytas*: son las algas verdes, también se llaman cloromicophytas, la mayoría son de agua dulce, unicelulares, móviles, forman colonias filamentosas o aplanadas de color verde, debido a la clorofila.

La *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.) pertenece al grupo de las algas *Chllorophytas*, esta tiene forma esférica, diámetro entre 2 y 10 μm , no posee flagelo, es unicelular, tiene una densidad de 1070 k m^{-3} , impedancia de -10,0 mV, longitud de onda óptima de 680 nm, pH entre 6,5 y 7 (IVES, 1959) y se encuentra en la mayoría de los cuerpos de agua dulce. Contiene los pigmentos verdes fotosintetizadores, clorofila a y b en su cloroplasto. Mediante la fotosíntesis se multiplica rápidamente, requiriendo solo luz solar, dióxido de carbono, agua y pequeñas cantidades de minerales. Para su cultivo se utiliza además la urea, la cal, el fósforo y las mieles finales del proceso azucarero.¹⁶

Su habilidad para adaptarse a grandes cambios climáticos y su poderosa vitalidad se debe a dos características fundamentales:

¹⁶ Enciclopedia colaborativa en la red cubana. Chlorella Vulgaris. Cuba. [en línea] <https://www.ecured.cu/Chlorella_Vulgaris>. 2016.

- Pared celular resistente, la cual es capaz de coexistir en lugares con concentraciones altas de pesticidas, toxinas y metales pesados.
- Tasa de reproducción alta, se rejuvenece en nuevas células en un tiempo de 17 a 20 horas.

Figura 4. **Alga *Chlorella vulgaris***



Fuente: beneficios y efectos secundarios del alga *Chlorella vulgaris*.

<https://www.lasaludvital.com/beneficios-efectos-secundarios-del-alga-chlorella.sdh> Consulta: 04 de abril de 2017.

2.2.1. Estructura del alga *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.)

La célula microscópica de *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.) es esférica con diámetros de 2-10 μm y tiene muchos elementos en su estructura similares a las plantas.

2.2.1.1. Pared celular

La rigidez de la pared celular preserva la integridad de la célula y es una protección contra los invasores y el entorno. Esto varía conforme cada fase de

crecimiento de la célula. Durante el inicio del crecimiento es una pared frágil. Durante el crecimiento el grosor de la pared celular incrementa hasta 17 – 21 nm en la madurez de la célula. En la edad madura de la célula el grosor y la composición no es constante porque cambian según el entorno en el que se encuentren. (SAFI, C., et. Al. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. 2014)

2.2.1.2. Citoplasma

Es el gel confinado dentro de la pared celular, compuesto de agua, proteínas solubles y minerales. Hospeda los organelos internos de la célula como la mitocondria, núcleo, vacuolas y cloroplasto.

2.2.1.3. Mitocondria

Cada mitocondria contiene material genético, el aparato respiratorio y tiene membrana de doble capa.

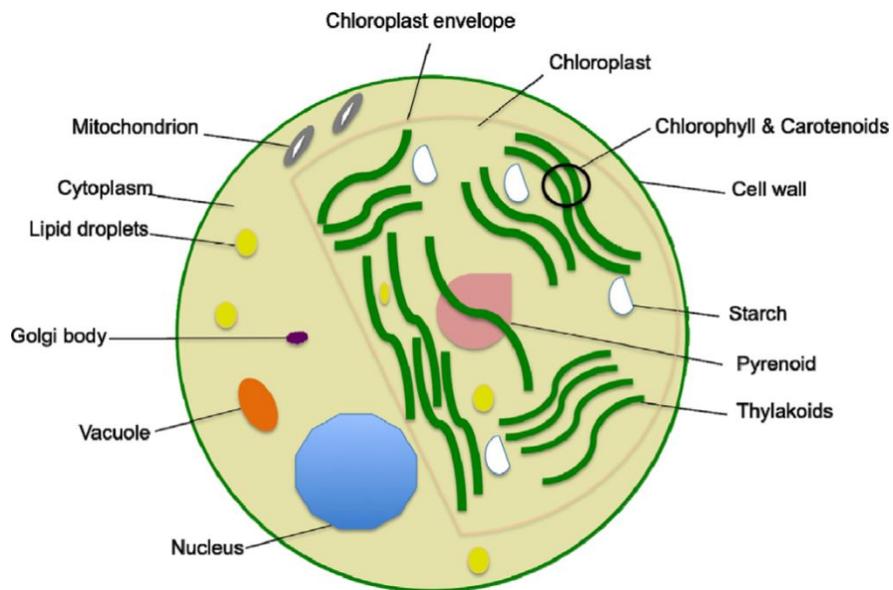
2.2.1.4. Cloroplasto

La *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.) tiene un único cloroplasto envuelto con doble membrana compuesta de fosfolípidos; la membrana exterior es permeable a metabolitos e iones, pero la membrana interna tiene una función más específica de transportar proteínas.

Los gránulos de almidón, compuestos de amilosa y amilopectina, se pueden formar dentro del cloroplasto, especialmente durante condiciones de crecimiento desfavorables. El pirenoide contiene altos niveles de ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa oxigenasa (RuBisCO) y es el centro de la fijación del

dióxido de carbono. El cloroplasto también almacena un grupo de tilacoides fusionados donde se sintetiza la clorofila-a de pigmento dominante enmascarando el color de otros pigmentos como la luteína.

Figura 5. Ultraestructura esquemática de *Chlorella v.* (Beyerinck, M.W.) representando diferentes organelos



Fuente: SAFI, C., et Al. *Morphology, composition, production, processing and applications of Chlorella vulgaris: A review.* 2014.

2.2.2. Control de crecimiento de algas

- Crecimiento: para el cultivo adecuado del alga, se debe mantener en agitación, expuesta a luz natural o artificial y controlar el pH en torno a la neutralidad. Además debe tener la suficiente cantidad de nutrientes para su crecimiento adecuado.
- Eliminación o prevención: existen varios métodos que son utilizados, entre ellos se encuentra la esterilización, desinfección, antisepsia, asepsia, etc.

La antisepsia consta de operaciones o técnicas encaminadas a crear un ambiente que previenen el crecimiento o acción de los microorganismos ya sea destruyéndolos o inhibiendo su crecimiento y actividad. Se refiere a sustancias que se aplican sobre el cuerpo.

2.3. Métodos de desinfección

Los métodos para la desinfección de agua se pueden dividir en los métodos químicos y métodos físicos. La desinfección química implica el uso de un agente desinfectante, cuya acción está directamente vinculada a la naturaleza de los microorganismos y su estructura química.

- Propiedades de los desinfectantes
 - Efecto bactericida: la capacidad desinfectante para destruir los microorganismos durante la etapa de tratamiento específico.
 - Efecto residual: la capacidad del desinfectante a permanecer en el agua en la red de distribución, mantenimiento de la calidad del agua.

La desinfección proporciona una protección contra el recrecimiento bacteriano y un efecto bactericida contra la contaminación ocasional en la red.

Las características principales que definen un buen desinfectante son: alta inactivación de microorganismos, interacción activa con el material orgánico y agentes reductores inorgánicos, solubilidad en medios acuosos, capacidad de penetrar a través de la superficie y de la membrana celular.

- Los mecanismos de inactivación microbianos incluyen
 - En las bacterias, la acción de los oxidantes produce poros en la membrana celular, también modifica la permeabilidad, y tiene efectos sobre el ARN y el ADN, inhibe la síntesis de proteínas y la actividad enzimática.
 - En el caso de los virus, los oxidantes penetran en las proteínas del cápside y cambiar el ADN o ARN.

En el caso de la desinfección física, los microorganismos son removidos a través del uso de la radiación UV, calentamiento a alta temperatura o separaciones entre membranas. La característica principal es la ausencia de residuos.

Existen antisépticos orgánicos como los alcoholes y fenoles, y antisépticos inorgánicos como:

- Metales
- Ácidos y álcalis
- Compuestos inorgánicos oxidantes

Estos actúan oxidando los componentes de la membrana y enzimas. Por ejemplo, el agua oxigenada (H_2O_2) al 6% en volumen se utiliza como antiséptico en pequeñas heridas de la piel.

La interferencia positiva para la remoción es posible en presencia de H_2O_2 y O_3 cuando el método de coloración DPD (N,N-dimethyl-p-phenylenediamine) es usado. Sin embargo, la reacción de H_2O_2 con DPD es lenta y requiere peroxidasa para catalizar la reacción, mientras que el

ozono puede reaccionar rápidamente con el DPD aun si la respuesta no es estable.

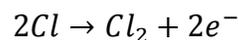
- Cloro

Se emplea, principalmente, en los procesos de desinfección y control de desarrollo de varios organismos. Puede oxidar compuestos responsables del sabor y del olor, oxidar el hierro y el manganeso, mover el color y favorecer la coagulación.

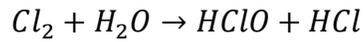
Los halógenos especialmente el cloro y el yodo son componentes de muchos antimicrobianos. Los halógenos son agentes oxidantes fuertes por lo que son altamente reactivos y destructivos para los componentes vitales de las células microbianas.

El cloro se puede utilizar como gas o como hipoclorito de sodio o de calcio. La muerte de los microorganismos por acción del cloro se debe, en parte, a la combinación directa del cloro con las proteínas de las membranas celulares y los enzimas.

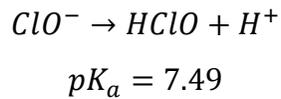
La presencia de iones cloruro en el agua conduce a la formación de ácido hipocloroso e hipoclorito en el ánodo, en una reacción secundaria con respecto a la evolución de oxígeno. En primer lugar, de los iones cloruro, se forma cloro de acuerdo a la reacción:



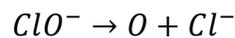
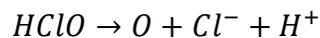
El cloro se hidroliza en el agua para formar ácido hipocloroso:



El ácido hipocloroso está en equilibrio, dependiendo del pH, con el anión hipoclorito:



La suma de ácido hipocloroso e hipoclorito se denominan “cloro activo”; su poder desinfectante se basa en la liberación de oxígeno atómico, de acuerdo con las reacciones:



El cloro activo formado en el proceso se mantiene dentro del sistema por horas o días, asegurando el efecto residual.

La cloración, sin embargo, puede crear compuestos no deseados como responsables del mal olor/sabor, tóxicos (trihalometanos) o potencialmente cancerígenos (organoclorados). La presencia de estos subproductos depende del pH, la cantidad de cloro y el tiempo de reacción.

- Ozono

Tiene una amplia aplicación en los procesos de tratamiento de agua, debido a su alta reactividad. Su presencia en el agua inicia una compleja reacción en cadena, influido por varios solutos que se encuentran en el agua o liberadas durante el tratamiento. El ozono puede reaccionar directamente en forma molecular o se puede producir con una serie de mecanismos que conducen a la formación de radical hidroxilo OH^* , que tiene un mayor poder oxidante del ozono. Se utiliza en las diversas etapas de tratamiento de agua.

En la preoxidación, el ozono se utiliza para destruir la estructura de las partículas coloidales y de las macromoléculas mejorando el rendimiento de la coagulación-floculación y la sedimentación.

En la fase oxidativa su propósito es la oxidación de la materia biológica. Actúa sobre los componentes orgánicos responsables del olor y sabor, sobre plaguicidas, en fenoles, sobre pesticidas, toxinas producidas por algas y productos químicos de los productos farmacéuticos.

En la desinfección el ozono es capaz de destruir los patógenos más comunes. Su acción depende de las condiciones del medio, como el pH, la temperatura, la presencia de otros compuestos oxidables y la concentración de sólidos en suspensión.

- Un aumento en el pH tiene el efecto de reducir la concentración de ozono disuelto, por lo tanto la eficiencia de la desinfección.

- La eficacia del proceso aumenta con la temperatura, aunque tiene un efecto opuesto sobre la solubilidad del ozono y la velocidad de inactivación.
- La materia orgánica contribuye a la demanda de ozono y compite con los microorganismos.
- Los sólidos suspendidos pueden proteger a los microorganismos para hacer más difícil la desinfección.

En el proceso de desinfección con ozono puede haber formación de bromatos debido a la oxidación de los iones bromuro en un mecanismo de reacción compleja que incluye ozono y radicales hidroxilo.

- Rayos UV

Como un método físico para la remoción de microorganismos del agua, un método importante del proceso que conlleva la utilización de los rayos UV.

Los rayos UV – ultra violeta que se utilizan para la desinfección tienen una longitud de onda comprendida en el rango en el cual se tiene absorción de parte de las células, especialmente los ácidos nucleicos.

El mecanismo está basado en la absorción de los fotones de parte de los componentes que contienen el ADN. La radiación aplicada induce a modificaciones a partir de los componentes afectados, destruyendo las cadenas del ADN de modo que la replicación sea inhibida.

La eficacia de la radiación UV se da en un gran número de microorganismos, como bacterias, rotovirus y cepas protozoicas. Además el tiempo para que el tratamiento sea eficaz es muy breve.

La calidad de la desinfección puede ser limitada por algunos microorganismos, el problema surge debido al desarrollo de mecanismos que son capaces de regenerar la estructura del ADN, como la fotoreactivación.

Los rayos UV aplicados a la desinfección del agua no producen subproducto pero los compuestos químicos presentes en el agua que absorben la misma longitud de onda que se aplicó a los microorganismos si pueden generar subproductos.

- Electro-coagulación y electro-floculación

Estos métodos combinados son eficaces en el tratamiento de agua, en muchos casos, como agua con alto contenido de metales pesados, colorantes, etc.

Los electrodos comúnmente utilizados son de aluminio o hierro, estos son disueltos por medio de electrolisis formando una especie de coagulantes e hidróxidos de metales que desestabilizan las partículas suspendidas formando suspensiones de mayor tamaño.

Se han realizado algunos estudios en relación a la remoción de microorganismos aplicando electro-coagulación, los resultados de mayor porcentaje de remoción (90%) con un gasto de consumo eléctrico relativamente bajo.

Como desventaja principal de este método se tiene la sustitución regular del ánodo de sacrificio para evitar el aumento del consumo de corriente eléctrica y la disminución de eficacia del proceso.

2.4. Electrólisis

La desinfección electroquímica de agua es un método conveniente y de alta eficiencia, utilizado desde hace pocos años para la eliminación de microorganismos del agua sin la adición de compuestos químicos. Su uso en los procesos de tratamiento de agua es una alternativa viable respecto a la desinfección con compuestos de cloro, ya que puede garantizar, además de un buen rendimiento en la desinfección primaria, también un efecto residual.

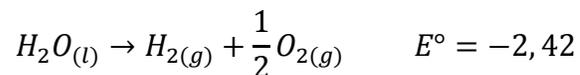
El uso de sistemas electroquímicos se ha discutido desde los años 50, pero la madurez técnica del método llegó en los últimos años debido a varios factores.

En primer lugar, solo recientemente se han desarrollado materiales suficientemente estables y eficientes para la construcción de los electrodos, como los electrodos de titanio recubiertos con óxidos mixtos o electrodos de diamante dopado con boro.

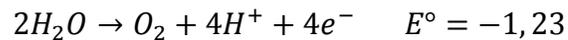
Hasta hace pocos años han sido estudiados en detalle los parámetros, como la relación entre la corriente aplicada, el material del electrodo, la composición del agua y la producción electroquímica de oxidantes, que permiten reconocer los mecanismos de remoción de los microorganismos.

El método electroquímico se basa en el paso de corriente eléctrica que causa la electrólisis del agua, a través del uso de electrodos apropiados, insertados directamente en el volumen de agua a tratar.

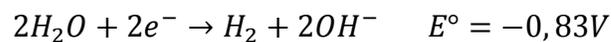
La imposición de un potencial a los electrodos hace que las moléculas de agua se electrolicen, de acuerdo con la reacción general:



En el ánodo, el cual es el terminal positiva, se tiene la oxidación con la producción de oxígeno:



En el cátodo, que actúa como un polo negativo, se tiene la reducción con desprendimiento de hidrógeno



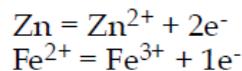
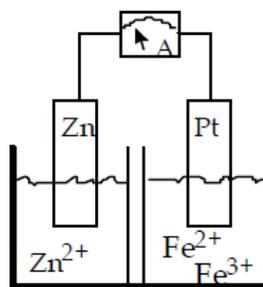
El tratamiento de agua por electrólisis se lleva a cabo a través de dos mecanismos principales que actúan en sinergia:

- El campo eléctrico creado por el paso de la corriente.
- La producción de oxidantes, que actúan como agentes desinfectantes.

El proceso utiliza energía eléctrica (corriente directa) para causar una reacción no espontánea y consiste en dos electrodos separados por una fase

electrolítica (Fig. 1). En dicha separación existe una diferencia de potencial medible entre los dos electrodos. Al existir un campo eléctrico en la interfaz, se espera que produzca efectos sobre el comportamiento cinético de los portadores de carga (electrones y/o iones) en la región intermedia.

Figura 6. **Celda electroquímica, modelo con electrodos de Zn/Zn²⁺ y Fe²⁺/Fe³⁺**

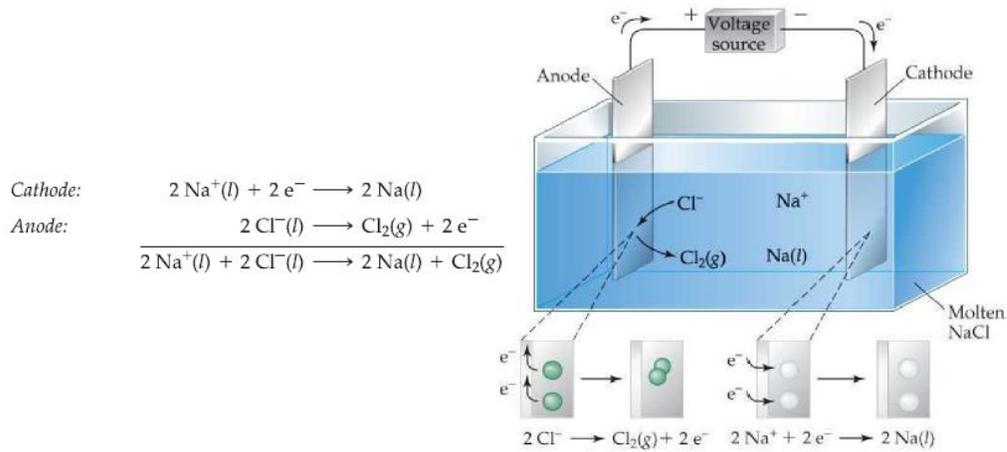


Fuente: VANTE, Nicolás. A. *Electroquímica y electrocatálisis*. 2013.

La fuente de corriente conectada al reactor actúa transfiriendo los electrones hacia un electrodo y expulsándolos del otro electrodo.

Para la reacción no espontánea del NaCl, los iones Na⁺ atraen electrones y son reducidos a Na en el cátodo. Mientras que existe un movimiento de iones Cl⁻ hacia el ánodo donde son oxidados:

Figura 7. **Electrolisis de cloruro de sodio**



Fuente: BROWN, T.L. *Chemistry: the central science*. 2009.

Usar una fuente de energía externa (E_{ext}) para producir la reacción no espontánea da como resultado un cambio de energía libre de Gibbs positiva y una diferencia de potencial negativa. Mediante la ecuación 1, se calcula el trabajo realizado, este será positivo ya que los alrededores realizan trabajo sobre el sistema.

$$w = nFE_{\text{ext}}$$

Ecuación 1

Donde n es el número de moles de electrones forzados en el sistema por el potencial externo y F es la constante de Faraday (96 485 C). El trabajo eléctrico obtenido de la ecuación 1 está dado en unidades de watt (W) = 1 J s⁻¹. Por lo general, se realiza la conversión y el trabajo eléctrico (normalizado por el volumen de trabajo) es expresado en unidades de kilowatt por hora por metro cúbico (kWh m⁻³).

2.4.1. Efecto de la corriente eléctrica

Estudios de 2003 revelaron la acción de daño de las células debido a la aplicación de un campo eléctrico.¹⁷ Este efecto es causado, principalmente, por la permeabilización de las membranas celulares.

Los experimentos realizados en membranas lipídicas artificiales han demostrado que una membrana que se somete a un campo eléctrico externo acumula la carga de manera similar a un condensador e induce un potencial transmembrana. Se establece una corriente transitoria a través de la membrana, induciendo la permeabilidad de la misma a moléculas hidrófilas.

Este fenómeno se puede explicar utilizando un modelo que prevé la formación temporal de poros en la membrana por la exposición al campo eléctrico.

Dos parámetros afectan la reversibilidad de este fenómeno, la magnitud del potencial transmembrana y la duración de la exposición al campo eléctrico externo. Potenciales de más de 1 V y largos tiempos de exposición conducen a la permeabilización irreversible de la membrana, lo que provoca la muerte de la célula.

El potencial transmembrana depende del radio de la membrana de la célula (1 a 5 μm para la *Chlorella vulgaris*, Beyerinck, M.W.); las células más grandes son afectadas proporcionalmente con respecto a la magnitud del campo eléctrico inducido.

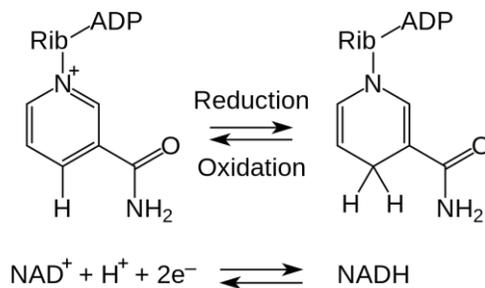
¹⁷ DREES, K.P.; ABBASZADEGAN, M.; MAIER, R.M. Comparative electrochemical inactivation of bacteria and bacteriophage. Artículo científico. 2003. Water Res. 37, 2291–2300 p.

La muerte de la célula se puede producir por dos razones principales, debido a la formación de poros permanentes y la desestabilización de la membrana, o por la pérdida de componentes importantes de la célula y la alteración de los gradientes químicos debido a los poros temporales.

Además, como se discute en el apartado 2.4.2., si hay oxidantes generados electroquímicamente, los poros garantizan acceso al interior de la célula, lo que favorece el proceso de inactivación.

Los campos eléctricos son capaces de destruir las células sin dañar su membrana. Los estudios han demostrado la capacidad de matar las células sin ruptura de la membrana, debido a la oxidación electroquímica de las coenzimas presentes en el interior, lo que demuestra que los campos eléctricos pueden oxidar directamente los constituyentes de las células, causando la muerte de la célula.

Figura 8. **Reacción redox de NAD (coenzima celular en algas)**



Fuente: Nicotinamide adenine dinucleotide – NAD.

https://en.wikipedia.org/wiki/Nicotinamide_adenine_dinucleotide. Consulta: 04 de abril de 2017.

2.4.2. Efecto de los oxidantes

Los oxidantes generados por la corriente eléctrica que circulan en el agua en la que están inmersos los electrodos representan la principal causa de la eficacia del proceso de electrólisis para la eliminación de microorganismos.

En la interfaz entre el agua y los electrodos se tiene una generación de especies oxidantes que surgen de la propia agua, tales como el ozono, o de especies disueltas en ella, como los cloruros. Estos oxidantes actúan de forma sinérgica con la corriente, penetran la célula después de la ruptura de la membrana y reaccionan con los componentes, interrumpiendo las funciones celulares.

En el agua sin cloruros la generación de oxidantes, tales como radicales OH, ozono y peróxido de hidrógeno, se lleva a cabo a partir de la propia agua; estos oxidantes pueden formarse en mayor cantidad con ánodos de Pt, PtO₂, DSA o BDD, como desinfectantes permanecen en el agua durante un tiempo más corto en comparación con los oxidantes derivados de cloruros.

2.5. Modelos de oxidación de la membrana celular

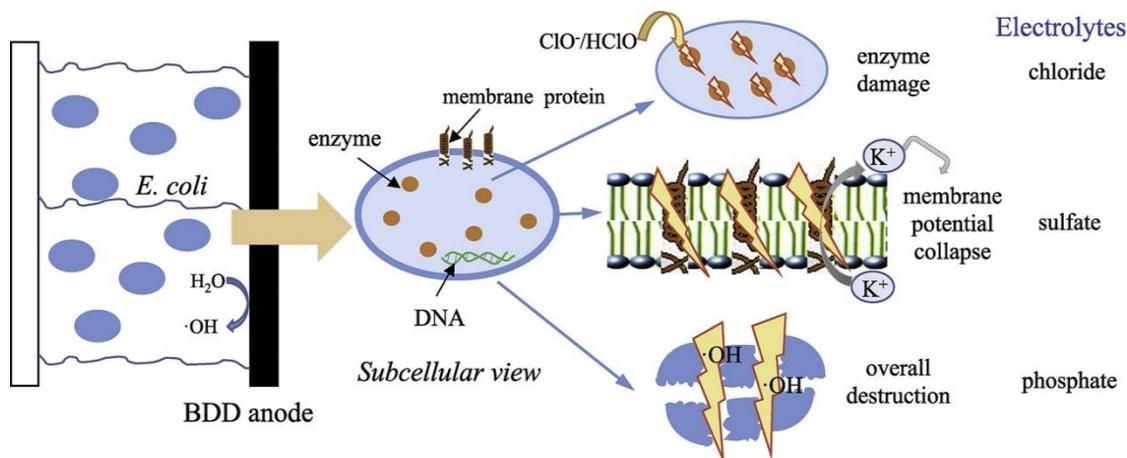
2.5.1. Desinfección electroquímica

Aunque la identificación de especies oxidantes efectivas ha sido ampliamente estudiada, el mecanismo subcelular de inactivación bacteriana nunca se ha dilucidado claramente en los procesos de desinfección electroquímica. Durante un estudio, el mecanismo subcelular de la inactivación de *Escherichia coli* durante la desinfección electroquímica se reveló en términos de factores integrales como morfología celular, componentes orgánicos totales,

permeabilidad de la membrana, peroxidación lipídica, potencial de membrana, proteínas de membrana, enzima intracelular, nivel celular de ATP y NDA. La electrólisis se realizó con un ánodo de diamante dopado con boro en tres electrolitos que incluyen cloruro, sulfato y fosfato.

Los resultados demostraron que la inactivación celular se atribuyó principalmente al daño a los sistemas enzimáticos intracelulares en la solución de cloruro. Este estudio proporcionó una visión completa del mecanismo de inactivación bacteriana a nivel subcelular.

Figura 9. **Mecanismo de inactivación de la *E. coli***



Fuente: LONG, Y.; NI, J.; WANG, Z. *Subcellular mechanism of Escherichia coli inactivation during electrochemical disinfection with boron-doped diamond anode: A comparative study of three electrolytes*. Water Research. 84, 2015. 198 – 206 p.

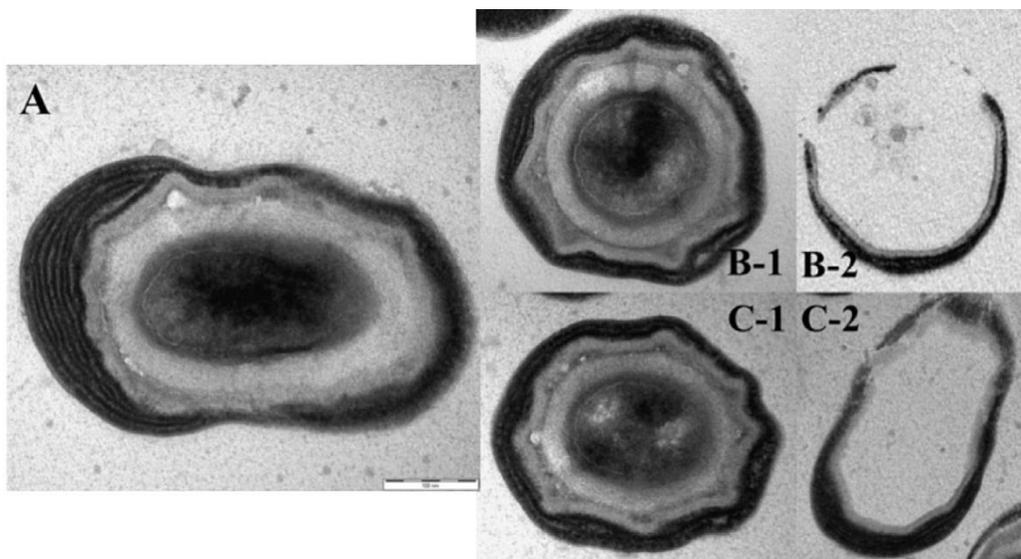
2.5.2. Ataque con bromo y cloro

Para investigar el mecanismo de inactivación con bromo y cloro (Youmi, J, et al.), se utilizó como modelo las esporas de *B. subtilis* se expusieron a bromo y cloro, respectivamente, y la morfología de las especies expuestas se analizó mediante TEM (microscopio electrónico de transmisión). Las Fig. B y C

en la Fig. 9 muestran los cambios en las esporas de *B. subtilis* expuestas al bromo (200 mg/L-min) y cloro (1200 mg/L-min), respectivamente. Tanto el proceso de bromación como el de cloración muestran dos imágenes idénticas representadas por una pared celular corrugada (B-1, C-1) y una capa celular destruida (B-2, C-2).

La célula de *B. subtilis* está cubierta con un recubrimiento de células gruesas (figura 9A) que inhibe la invasión del desinfectante halógeno a través de la presión osmótica (Young y Setlow, 2003). Vale la pena observar que el grado de destrucción celular fue similar entre los dos procesos de inactivación, lo que implica una destrucción celular más clara con bromación sabiendo que la concentración de cloro fue seis veces mayor que la del bromo. La forma de la espora corrugada (B-1, C-1) podría representar un cambio morfológico que puede aparecer durante la fase de retraso de la inactivación.

Figura 10. **Morfología de inactivación de la espora *B. subtilis***



Fuente: JUNG, Y.; YOON Y.; HONG, E.; KWON, M.; KANG, J. *Inactivation characteristics of ozone and electrolysis process for ballast water treatment using *B. subtilis* spores as a probe.*

Marine Pollution Bulletin. V. 72, Issue 1. 2013. 71 – 79 p.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se denotan las variables independiente y dependientes que fueron trabajadas en la experimentación:

Tabla I. **Variables de control**

Variable dependiente	Variabes independientes
<ul style="list-style-type: none">Transmitancia de la muestra durante y al final de la prueba (ABS-absorbancia).	<ul style="list-style-type: none">Transmitancia inicial de la muestra (ABS-absorbancia)Densidad de corriente directa aplicada (ρ_i)Flujo volumétrico aplicado (\dot{Q})

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Descripción de variables manipuladas

Variabes manipuladas y rangos en los que fueron variados para evidenciar su efecto en los resultados obtenidos.

Tabla II. **Descripción de variables manipuladas**

Variable	Dimensional	Rango de variación
Absorbancia inicial	Adimensional	[0,79; 1,98]
Densidad de corriente directa aplicada	A m ⁻²	[2,86; 7,15]
Flujo volumétrico aplicado	mL min ⁻¹	[300, 500]

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Evaluación del efecto de las variables: densidad de corriente, flujo volumétrico y absorbancia inicial de la muestra sobre la reducción en la absorbancia durante el tratamiento electroquímico para la desactivación oxidativa del alga *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.).

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Per. Inform. César Daniel Saquec Tzuquen
- Asesor: Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Materiales para la construcción del reactor

- Tubo de PVC de 2" de diámetro para agua fría.
- Adaptadores con rosca de PVC de 2".
- Tapones con rosca de PVC de 2".
- Lana de acero inoxidable.
- Anillos de plástico tipo Raschig de pared sólida 1,2 cm y en espiral 1,1 cm; de 6 y 3 vueltas.
- Hilos de acero inoxidable.
- Cinta de teflón TRUPER de ½", para ajuste de accesorios en tubo.
- Gel de silicón LOCTITE, SI 595 transparente.
- Pegamento para PVC TANGIT, para toda presión.
- Conectores de bronce a presión de ¼".

3.4.2. *Chlorella vulgaris*

- Alga *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.) proporcionada por el Centro de estudios del mar y acuicultura –CEMA-

3.4.3. Instrumentos de medición

- Pipeta de 1 mL, escala en 0,01 mL.
- Termómetro de mercurio: escala en °C en 0,1°C, rango de 0 a 100.
- pH-metro digital.
- Espectrofotómetro Spectroquant Pharo 300, UV visible, lectura de porcentaje de transmitancia (%T) y absorbancia.
- Potenciostato / Galvanostato Eventek KPS305D, capacidad hasta 30 volts y 5 amperios.
- Bomba peristáltica Thomas scientific Mini-pump variable flow, 120 V, 50/60 Hz, 80 a 600 mL min⁻¹.
- Balanza analítica BOECO, precisión de 0,0001 g.
- Cronómetro, precisión de 0,01 seg.

3.4.4. Cristalería

- Probetas
 - 10 mL, escala en 0,1 mL
 - 25 mL, escala en 1 mL
 - 1 000 mL, escala en 1 mL
- Embudos de 5 cm de diámetro.
- Beakers
 - 1 000 mL de capacidad
 - 2 000 mL de capacidad

- Matraz Erlenmeyer
 - 25 mL de capacidad
 - 500 mL de capacidad
- Cubetas de plástico y de cuarzo de 1,5 mL

3.4.5. Equipo auxiliar

- Manguera flexible AIRFIT de poliuretano de ¼” para conexión entre componentes.
- Manguera flexible CONTROL COMPANY de silicona de ¼” para bomba peristáltica.
- Agitador magnético de teflón.
- Plancha de calentamiento con agitación Fisher Scientific isotemp pyroceramic.
- Propipeta.
- Soporte universal.
- Papel filtro Wathman de 5 cm de diámetro.
- Bomba de vacío.
- Pinzas.
- Parafilm.
- Lámpara fluorescente 1x13 T5 Tipo gabinete LUXLITE, 120 V.
- Mufla Thermolyne 1 400, 120 V y 60 Hz.
- Piedra difusora para peceras.
- Bomba de aire Elite 799, 120 V.
- Pipeta de plástico de 1mL sin graduación.
- Laptop Toshiba Satellite P755-SP5101L.
- Multímetro digital Truper, CA 200 – 500 V, CD 200 mV – 500 V, CA 2 000µA – 10 A, 200 Ohm – 20 MOhm.

3.5. Técnica cuantitativa

La técnica utilizada para la medición de la efectividad del tratamiento electroquímico en la desactivación oxidativa del alga "*Chlorella vulgaris*, (Beyerinck, M.W.)" se basa en la medición del pigmento "clorofila-a" mediante la absorbancia, con la metodología siguiente:

- Utilizado el espectrofotómetro Spectroquant Pharo 300 se fijara el blanco con agua destilada.
- Se medirá la absorbancia inicial de la muestra.
- Al iniciar la prueba se medirá el tiempo con un cronómetro.
- A ciertos intervalos de tiempo se medirá la absorbancia de la muestra.
- A cada medición de absorbancia también se anotaran los siguientes datos:
 - Tiempo (s).
 - Absorbancia (ABS).
 - Intensidad de corriente (I), que se ajuste para valores definidos de 0,15; 0,20; 0,25 y 0,30 amperios.
 - Voltaje (V).
 - pH inicial y final de la muestra.
- Dicha metodología se repetirá modificando las variables de control (variables independientes), según el objetivo específico que se desee cumplir.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

De la experimentación se recolectaron datos de corriente eléctrica (luego convertida a densidad de corriente eléctrica), rpm (luego convertido a flujo volumétrico), tiempo, absorbancia, pH y voltaje; los cuales se presentan en el

apéndice con base en el diseño de recolección y ordenamiento de la información presentado en el diseño de investigación aprobado. Ver Anexos, informe de resultados emitido Laboratorio de Análisis Físicoquímico –LAFIQ– Sección de Química Industrial del Centro de Investigación de Ingeniería.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

3.7.1. Variables utilizadas para el análisis de resultados

Se presentan figuras de Absorbancia (ABS) en función del tiempo y de Remoción total (%) en función del tiempo.

La remoción total se define como:

$$\text{Remoción total} = 100 * \left(1 - \frac{ABS}{ABS_0}\right)$$

Ecuación 2

3.7.2. Tabulación y ordenamiento de resultados

Tabla III. Prueba No. 1 realizada el 18/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [300 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,102; 300 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,09	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,102	15,5	0,00	1	
5	0,087	15,5	14,71		

Continuación Tabla III

10	0,085	15,5	16,67
15	0,083	15,9	18,63
30	0,075	15,9	26,47
45	0,069	15,9	32,35
60	0,066	15,9	35,29
75	0,061	15,9	40,20
100	0,06	15,9	41,18

Descripción de la prueba		ABSo= 0,098; 300 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²		
RPM	44		Flujo volumétrico	300 mL/min
Vol, Inicial	800 mL		Corriente eléctrica aplicada	0,1 A
pHo	7,05		pHf	7,11
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición
0	0,098	15,5	0,00	2
5	0,085	15,5	13,27	
10	0,082	15,5	16,33	
15	0,079	15,5	19,39	
30	0,074	15,5	24,49	
45	0,064	15,5	34,69	
60	0,062	15,5	36,73	
75	0,057	15,5	41,84	
100	0,058	15,5	40,82	

Descripción de la prueba		ABSo= 0,100; 300 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²		
RPM	44		Flujo volumétrico	300 mL/min
Vol, Inicial	800 mL		Corriente eléctrica aplicada	0,1 A
pHo	7,2		pHf	7,09
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición
0	0,1	15,9	0,00	3
5	0,083	15,9	17,00	
10	0,081	15,9	19,00	
15	0,08	15,9	20,00	
30	0,072	15,9	28,00	
45	0,068	15,9	32,00	
60	0,063	15,9	37,00	
75	0,059	15,9	41,00	
100	0,057	15,9	43,00	

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. Prueba No. 2 realizada el 18/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [400 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo=0,110; 400 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,11		pHf	7,25	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,11	15,9	0,00	1	
5	0,099	15,9	10,00		
10	0,093	15,9	15,45		
15	0,088	15,9	20,00		
30	0,081	16	26,36		
45	0,08	16	27,27		
60	0,079	16	28,18		
75	0,076	16	30,91		
100	0,074	16	32,73		
120	0,074	16	32,73		

Descripción de la prueba		ABSo=0,113; 400 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol, Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,11		pHf	7,25	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,113	15,9	0,00	2	
5	0,102	15,9	9,73		
10	0,1	15,9	11,50		
15	0,092	15,9	18,58		
30	0,087	15,9	23,01		
45	0,083	15,9	26,55		
60	0,075	15,9	33,63		
75	0,072	15,9	36,28		
100	0,07	15,9	38,05		
120	0,069	15,9	38,94		

Descripción de la prueba		ABSo=0,106; 400 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,11		pHf	7,25	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,106	16	0,00	3	
5	0,095	16	10,38		
10	0,092	16	13,21		
15	0,091	16	14,15		
30	0,085	16	19,81		
45	0,078	16	26,42		
60	0,076	16	28,30		
75	0,075	16	29,25		
100	0,073	16	31,13		
120	0,072	16	32,08		

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Prueba No. 3 realizada el 19/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [500 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,112; 500 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,11		pHf	7,25	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,112	15,9	0,00	1	
2,5	0,108	15,9	3,57		
5	0,104	15,9	7,14		
7,5	0,101	15,9	9,82		
10	0,0985	16	12,05		
12,5	0,097	16	13,39		
15	0,095	16	15,18		
20	0,091	16	18,75		
25	0,089	16	20,54		
30	0,0875	16	21,88		
40	0,087	16	22,32		
50	0,086	16	23,21		

Continuación Tabla V

60	0,085	16	24,11
75	0,083	16	25,89
100	0,0815	16	27,23
120	0,081	16	27,68

Descripción de la prueba		ABSo=0,111; 500 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,11		pHf	7,25	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,111	15,8	0,00	2	
2,5	0,107	15,8	3,60		
5	0,103	15,8	7,21		
7,5	0,1	15,8	9,91		
10	0,098	15,8	12,16		
12,5	0,096	15,8	13,51		
15	0,094	15,8	15,32		
20	0,09	15,8	18,92		
25	0,088	15,8	20,72		
30	0,087	15,8	22,07		
40	0,086	15,8	22,52		
50	0,085	15,8	23,42		
60	0,084	15,8	24,32		
75	0,082	15,8	26,13		
100	0,081	15,8	27,48		
120	0,08	15,8	27,93		

Descripción de la prueba		ABSo=0,116; 500 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,11		pHf	7,25	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,116	16,1	0,00	3	
2,5	0,112	16,1	3,45		
5	0,108	16,1	6,90		
7,5	0,105	16,1	9,48		
10	0,103	16,1	11,64		
12,5	0,101	16,1	12,93		

Continuación Tabla V

15	0,099	16,1	14,66
20	0,095	16,1	18,10
25	0,093	16,1	19,83
30	0,092	16,1	21,12
40	0,091	16,1	21,55
50	0,09	16,1	22,41
60	0,089	16,1	23,28
75	0,087	16,1	25,00
100	0,086	16,1	26,29
120	0,085	16,1	26,72

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Prueba No. 4 realizada el 19/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [550 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm⁻²]**

Descripción de la prueba		ABSo = 0,114; 550 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol, Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,114	18,5	0,00	1	
2,5	0,111	18,5	2,63		
5	0,109	18,5	4,39		
7,5	0,105	18,5	7,89		
10	0,104	18,5	8,77		
12,5	0,103	18,5	9,65		
15	0,102	19,1	10,53		
20	0,101	19,1	11,40		
25	0,098	19,5	14,04		
30	0,094	19,5	17,54		
40	0,094	19,5	17,54		
50	0,092	19,5	19,30		
60	0,091	19,5	20,18		
75	0,09	19,5	21,05		
100	0,089	19,5	21,93		
120	0,088	19,5	22,81		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,114; 550 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol, Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,111	18,5	0,00	2	
3	0,108	18,5	2,70		
6	0,106	18,5	4,50		
9	0,102	18,5	8,11		
12	0,101	18,5	9,01		
15	0,099	18,5	10,81		
20	0,099	18,5	10,81		
25	0,094	18,5	15,32		
30	0,092	18,5	17,12		
40	0,091	18,5	18,02		
50	0,089	18,5	19,82		
60	0,087	18,5	21,62		
75	0,086	18,5	22,52		
100	0,085	18,5	23,42		
120	0,085	18,5	23,42		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,114; 550 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol, Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,119	19,1	0,00	3	
3	0,115	19,1	3,36		
6	0,114	19,1	4,20		
9	0,111	19,1	6,72		
12	0,108	19,1	9,24		
15	0,107	19,1	10,08		
20	0,105	19,1	11,76		
25	0,103	19,1	13,45		
30	0,100	19,1	15,97		
40	0,099	19,1	16,81		
50	0,097	19,1	18,49		
60	0,095	19,1	20,17		
75	0,094	19,1	21,01		

Continuación Tabla VI

100	0,092	19,1	22,69
120	0,092	19,1	22,69

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Prueba No. 5 realizada el 19/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [300 mL min⁻¹] e intensidad de corriente [0,57; 0,69 mA cm⁻²]**

Descripción de la prueba		ABSo = 0,119; 300 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,119	31,5	0,00	1	
2,5	0,117	31,5	1,68		
5	0,116	31,5	2,52		
7,5	0,115	31,5	3,36		
10	0,115	31,6	3,36		
12	0,114	31,6	4,20		
15	0,111	31,6	6,72		
20	0,109	31,6	8,40		
25	0,107	31,6	10,08		
30	0,107	31,6	10,08		
40	0,102	31,6	14,29		
50	0,1	31,6	15,97		
60	0,098	31,6	17,65		
75	0,096	31,6	19,33		
90	0,095	31,6	20,17		
100	0,095	31,6	20,17		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,119; 300 mL min ⁻¹ , 0,69 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,22	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,111	31,5	0,00	2	
3	0,110	31,5	0,90		

Continuación Tabla VII

6	0,109	31,5	1,80
9	0,108	31,5	2,70
12	0,106	31,5	4,50
15	0,105	31,5	5,41
20	0,103	31,5	7,21
25	0,100	31,5	9,91
30	0,100	31,5	9,91
40	0,098	31,5	11,71
50	0,097	31,5	12,61
60	0,095	31,5	14,41
75	0,090	31,5	18,92
90	0,088	31,5	20,72
100	0,087	31,5	21,62

Descripción de la prueba		ABSo = 0,119; 300 mL min ⁻¹ , 0,69 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol, Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,22	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,120	31,6	0,00	3	
3	0,119	31,6	0,83		
6	0,117	31,6	2,50		
9	0,117	31,6	2,50		
12	0,116	31,6	3,33		
15	0,114	31,6	5,00		
20	0,111	31,6	7,50		
25	0,110	31,6	8,33		
30	0,109	31,6	9,17		
40	0,105	31,6	12,50		
50	0,103	31,6	14,17		
60	0,100	31,6	16,67		
75	0,099	31,6	17,50		
90	0,097	31,6	19,17		
100	0,096	31,6	20,00		
120	0,095	31,6	20,83		

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Prueba No. 6 realizada el 23/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [300 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo=0,176; 300 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,11		pHf	7,23	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,176	15,9	0,00	1	
5	0,165	15,9	6,25		
10	0,159	15,9	9,66		
15	0,144	16,4	18,18		
30	0,136	16,4	22,73		
45	0,130	16,4	26,14		
60	0,120	16,4	31,82		
75	0,116	16,4	34,09		
100	0,109	16,5	38,07		

Descripción de la prueba		ABSo=0,173; 300 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,11		pHf	7,23	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,173	16,3	0,00	2	
5	0,164	16,3	5,20		
10	0,163	16,3	5,78		
15	0,158	16,3	8,67		
30	0,148	16,3	14,45		
45	0,139	16,3	19,65		
60	0,135	16,3	21,97		
75	0,123	16,3	28,90		
100	0,120	16,3	30,64		

Descripción de la prueba		ABSo=0,170; 300 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,11		pHf	7,23	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,170	15,9	0,00	3	
3	0,162	15,9	4,71		
6	0,155	15,9	8,82		
9	0,151	16,4	11,18		
12	0,151	16,4	11,18		
15	0,149	16,4	12,35		
20	0,139	16,4	18,24		
25	0,132	16,4	22,35		
30	0,128	16,4	24,71		
40	0,119	16,4	30,00		
50	0,111	16,4	34,71		
60	0,104	16,4	38,82		
75	0,103	16,4	39,41		
100	0,1	16,4	41,18		

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Prueba No. 7 realizada el 23/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo=0,173; 400 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,09		pHf	7,13	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,173	15,9	0,00	1	
5	0,162	16	6,36		
15	0,141	16,3	18,50		
30	0,126	16,5	27,17		
45	0,117	16,5	32,37		
60	0,111	16,5	35,84		
80	0,109	16,9	36,99		
100	0,109	16,9	36,99		

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,165; 400 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pH ₀	7,09		pH _f	7,13	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,165	15,9	0,00	2	
5	0,154	15,9	6,67		
15	0,140	15,9	15,15		
30	0,129	15,9	21,82		
45	0,125	15,9	24,24		
60	0,118	15,9	28,48		
80	0,111	15,9	32,73		
100	0,106	15,9	35,76		

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,170; 400 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pH ₀	7,09		pH _f	7,13	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,170	15,9	0,00	3	
3	0,163	16	4,12		
6	0,152	16	10,59		
9	0,141	16	17,06		
12	0,138	16	18,82		
15	0,137	16	19,41		
20	0,131	16	22,94		
25	0,129	16	24,12		
30	0,120	16	29,41		
40	0,118	16	30,59		
50	0,111	16	34,71		
60	0,106	16	37,65		
80	0,101	16	40,59		
100	0,095	16	44,12		

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Prueba No. 8 realizada el 23/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [500 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo=0,174; 500 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,09		pHf	7,13	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,174	15,9	0,00	1	
2,5	0,169	16	2,87		
5	0,167	16,3	4,02		
7,5	0,164	16,5	5,75		
10	0,163	16,5	6,32		
12,5	0,156	16,5	10,34		
15	0,152	16,9	12,64		
20	0,149	16,9	14,37		
25	0,145	16,9	16,67		
30	0,143	16,9	17,82		
40	0,14	16,9	19,54		
50	0,136	16,9	21,84		
60	0,131	16,9	24,71		
75	0,125	16,9	28,16		
90	0,122	16,9	29,89		
100	0,119	16,9	31,61		
120	0,118	16,9	32,18		

Descripción de la prueba		ABSo=0,169; 500 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,09		pHf	7,13	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,169	15,9	0,00	2	
2,5	0,164	15,9	2,96		
5	0,162	15,9	4,14		
7,5	0,159	15,9	5,92		
10	0,158	15,9	6,51		
12,5	0,151	15,9	10,65		
15	0,147	15,9	13,02		

Continuación Tabla X

20	0,144	15,9	14,79
25	0,140	15,9	17,16
30	0,138	15,9	18,34
40	0,135	15,9	20,12
50	0,131	15,9	22,49
60	0,126	15,9	25,44
75	0,120	15,9	28,99
90	0,117	15,9	30,77
100	0,114	15,9	32,54
120	0,113	15,9	33,14

Descripción de la prueba		ABSo=0,177; 500 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,09		pHf	7,13	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,177	16,1	0,00	3	
2,5	0,172	16,1	2,82		
5	0,170	16,1	3,95		
7,5	0,167	16,1	5,65		
10	0,166	16,1	6,21		
12,5	0,159	16,1	10,17		
15	0,155	16,1	12,43		
20	0,152	16,1	14,12		
25	0,148	16,1	16,38		
30	0,146	16,1	17,51		
40	0,143	16,1	19,21		
50	0,139	16,1	21,47		
60	0,134	16,1	24,29		
75	0,128	16,1	27,68		
90	0,125	16,1	29,38		
100	0,122	16,1	31,07		
120	0,121	16,1	31,64		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Prueba No. 9 realizada el 24/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [550 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,29 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo=0,177; 550 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,1		pHf	7,18	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,177	16,2	0,00	1	
5	0,163	16,2	7,91		
10	0,154	16,5	12,99		
15	0,152	16,5	14,12		
30	0,147	16,8	16,95		
45	0,139	17,2	21,47		
60	0,139	17,3	21,47		
75	0,134	17,3	24,29		
100	0,128	17,3	27,68		

Descripción de la prueba		ABSo=0,181; 550 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pHo	7,1		pHf	7,18	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,181	16,8	0,00	2	
5	0,167	16,8	7,73		
10	0,158	16,8	12,71		
15	0,156	16,8	13,81		
30	0,151	16,8	16,57		
45	0,143	16,8	20,99		
60	0,143	16,8	20,99		
75	0,138	16,8	23,76		
100	0,138	16,8	23,76		

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,175; 550 mL min ⁻¹ , 0,29 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,1	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,18	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,175	16,9	0,00	3	
2	0,17	16,9	2,86		
4	0,161	16,9	8,00		
6	0,161	16,9	8,00		
8	0,159	16,9	9,14		
10	0,159	16,9	9,14		
12	0,158	16,9	9,71		
15	0,151	16,9	13,71		
20	0,151	16,9	13,71		
25	0,148	16,9	15,43		
30	0,145	16,9	17,14		
40	0,139	16,9	20,57		
50	0,134	16,9	23,43		
60	0,127	16,9	27,43		
75	0,126	16,9	28,00		
90	0,123	16,9	29,71		
100	0,121	16,9	30,86		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Prueba No. 10 realizada el 24/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [300 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,193; 300 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pH ₀	7,11		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,193	22,2	0,00	1	
5	0,177	22,2	8,29		
10	0,168	22,2	12,95		
15	0,152	22,2	21,24		
30	0,139	23	27,98		

Continuación Tabla XII

45	0,125	24,1	35,23
60	0,119	23,2	38,34
75	0,115	23,2	40,41
100	0,105	22,9	45,60
120	0,101	22,9	47,67

Descripción de la prueba		ABSo=0,192; 300 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,11		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,192	23	0,00	2	
5	0,173	23	9,90		
10	0,165	23	14,06		
15	0,160	23	16,67		
30	0,135	23	29,69		
45	0,122	23	36,46		
60	0,111	23	42,19		
75	0,109	23	43,23		
100	0,102	23	46,88		
120	0,099	23	48,44		

Descripción de la prueba		ABSo=0,195; 300 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,11		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,195	22,6	0,00	3	
2	0,192	22,6	1,54		
4	0,185	22,6	5,13		
6	0,179	22,6	8,21		
8	0,175	22,6	10,26		
10	0,174	22,6	10,77		
12	0,174	22,6	10,77		
15	0,164	22,6	15,90		
20	0,158	22,6	18,97		
25	0,149	22,6	23,59		
30	0,141	22,6	27,69		

Continuación Tabla XII

40	0,135	22,6	30,77
50	0,127	22,6	34,87
60	0,121	22,6	37,95
75	0,117	22,6	40,00
100	0,111	22,6	43,08
120	0,105	22,6	46,15

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Prueba No. 11 realizada el 24/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,168; 400 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,168	22,6	0,00	1	
2	0,159	22,7	5,36		
4	0,155	22,7	7,74		
6	0,153	22,7	8,93		
8	0,151	22,7	10,12		
10	0,150	22,7	10,71		
12	0,141	22,7	16,07		
15	0,138	22,7	17,86		
20	0,135	23	19,64		
25	0,131	23	22,02		
30	0,129	23,6	23,21		
40	0,122	23,1	27,38		
50	0,119	23,1	29,17		
70	0,111	23,3	33,93		
80	0,11	23,8	34,52		
100	0,101	24,4	39,88		
120	0,098	24,1	41,67		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,170; 400 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,170	22,7	0,00	2	
2	0,168	22,7	1,18		
4	0,166	22,7	2,35		
6	0,160	22,7	5,88		
8	0,155	22,7	8,82		
10	0,154	22,7	9,41		
12	0,152	22,7	10,59		
15	0,150	22,7	11,76		
20	0,145	22,7	14,71		
25	0,139	22,7	18,24		
30	0,135	22,7	20,59		
40	0,126	22,7	25,88		
50	0,125	22,7	26,47		
70	0,120	22,7	29,41		
80	0,114	22,7	32,94		
100	0,108	22,7	36,47		
120	0,103	22,7	39,41		
130	0,099	22,7	41,76		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,165; 400 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,165	23,1	0,00	3	
2	0,156	23,1	5,45		
4	0,150	23,1	9,09		
6	0,150	23,1	9,09		
8	0,147	23,1	10,91		
10	0,147	23,1	10,91		
12	0,138	23,1	16,36		
15	0,134	23,1	18,79		
20	0,130	23,1	21,21		
25	0,126	23,1	23,64		

Continuación Tabla XIII

30	0,126	23,1	23,64
40	0,118	23,1	28,48
50	0,114	23,1	30,91
60	0,109	23,1	33,94
70	0,106	23,1	35,76
80	0,103	23,1	37,58
90	0,098	23,1	40,61
100	0,095	23,1	42,42
120	0,093	23,1	43,64
130	0,090	23,1	45,45

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Prueba No. 12** realizada el 25/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400, 500 mL min⁻¹] e intensidad de corriente [0,43 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,169; 500 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,15		pHf	7,21	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,169	22,6	0,00	1	
2,5	0,161	22,7	4,73		
5	0,156	22,7	7,69		
7,5	0,15	22,7	11,24		
10	0,147	22,7	13,02		
12,5	0,145	22,7	14,20		
15	0,131	22,7	22,49		
20	0,127	22,7	24,85		
25	0,125	23	26,04		
30	0,12	23	28,99		
40	0,117	23,6	30,77		
50	0,115	23,1	31,95		
60	0,111	23,1	34,32		
75	0,109	23,3	35,50		
90	0,107	23,8	36,69		
100	0,104	24,4	38,46		

Continuación Tabla XIV

120	0,103	24,1	39,05
-----	-------	------	-------

Descripción de la prueba		ABSo = 0,170; 400 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,15		pHf	7,21	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,168	22,6	0,00	2	
2,5	0,160	22,6	4,76		
5	0,155	22,6	7,74		
7,5	0,149	22,6	11,31		
10	0,146	22,6	13,10		
12,5	0,144	22,6	14,29		
15	0,130	22,6	22,62		
20	0,126	22,6	25,00		
25	0,124	22,6	26,19		
30	0,119	22,6	29,17		
40	0,116	22,6	30,95		
50	0,114	22,6	32,14		
60	0,110	22,6	34,52		
75	0,108	22,6	35,71		
90	0,106	22,6	36,90		
100	0,103	22,6	38,69		
120	0,102	22,6	39,29		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,165; 400 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,15		pHf	7,21	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,172	23,1	0,00	3	
2,5	0,164	23,1	4,65		
5	0,159	23,1	7,56		
7,5	0,153	23,1	11,05		
10	0,150	23,1	12,79		
12,5	0,148	23,1	13,95		
15	0,134	23,1	22,09		
20	0,130	23,1	24,42		

Continuación Tabla XIV

25	0,128	23,1	25,58
30	0,123	23,1	28,49
40	0,120	23,1	30,23
50	0,118	23,1	31,40
60	0,114	23,1	33,72
75	0,112	23,1	34,88
90	0,110	23,1	36,05
100	0,107	23,1	37,79
120	0,106	23,1	38,37

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Prueba No. 13** realizada el 25/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [550 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,165; 550 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pH ₀	7,3		pH _f	7,22	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,165	21,8	0,00	1	
2	0,159	21,8	3,64		
4	0,157	21,8	4,85		
6	0,154	21,8	6,67		
8	0,151	21,8	8,48		
10	0,149	22,2	9,70		
12	0,146	22,6	11,52		
17	0,142	23,1	13,94		
20	0,138	23,1	16,36		
25	0,137	23,7	16,97		
30	0,135	23,8	18,18		
35	0,133	23,8	19,39		
40	0,129	23,8	21,82		
50	0,128	24,6	22,42		
60	0,124	25	24,85		
70	0,118	25,3	28,48		
80	0,115	25,3	30,30		

Continuación Tabla XV

100	0,113	25,3	31,52
120	0,112	25,3	32,12

Descripción de la prueba		ABSo = 0,136; 550 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,3		pHf	7,22	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,175	22,6	0,00	2	
2	0,171	22,6	2,29		
4	0,168	22,6	4,00		
6	0,165	22,6	5,71		
8	0,160	22,6	8,57		
10	0,159	22,6	9,14		
12	0,158	22,6	9,71		
15	0,152	22,6	13,14		
20	0,148	22,6	15,43		
25	0,146	22,6	16,57		
30	0,144	22,6	17,71		
35	0,141	22,6	19,43		
40	0,139	22,6	20,57		
50	0,136	22,6	22,29		
60	0,133	22,6	24,00		
70	0,130	22,6	25,71		
80	0,126	22,6	28,00		
100	0,123	22,6	29,71		
120	0,123	22,6	29,71		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,136; 550 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,3		pHf	7,22	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,172	23,1	0,00	3	
2	0,165	23,1	4,07		
4	0,160	23,1	6,98		
6	0,159	23,1	7,56		
8	0,158	23,1	8,14		

Continuación Tabla XV

10	0,158	23,1	8,14
12	0,155	23,1	9,88
17	0,147	23,1	14,53
20	0,144	23,1	16,28
25	0,141	23,1	18,02
30	0,138	23,1	19,77
35	0,136	23,1	20,93
40	0,134	23,1	22,09
50	0,134	23,1	22,09
60	0,129	23,1	25,00
70	0,126	23,1	26,74
80	0,125	23,1	27,33
100	0,118	23,1	31,40
120	0,117	23,1	31,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Prueba No. 14 realizada el 25/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [300 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm⁻²]**

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,164; 300 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²		
RPM	44		Flujo volumétrico	300 mL/min
Vol. Inicial	800 mL		Corriente eléctrica aplicada	0,2 A
pH ₀	7,09		pH _f	7,11
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición
0	0,164	29,9	0,00	1
5	0,140	30,6	14,63	
10	0,133	30,9	18,90	
15	0,131	31,5	20,12	
30	0,113	31,3	31,10	
45	0,102	31	37,80	
60	0,094	31	42,68	
80	0,085	30,4	48,17	
100	0,08	30,3	51,22	
120	0,077	30,3	53,05	

Descripción de la prueba		ABSo=0,170; 300 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,09		pHf	7,11	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,170	30,6	0,00	2	
5	0,149	30,6	12,35		
10	0,143	30,6	15,88		
15	0,140	30,6	17,65		
30	0,137	30,6	19,41		
45	0,121	30,6	28,82		
60	0,105	30,6	38,24		
80	0,098	30,6	42,35		
100	0,086	30,6	49,41		
120	0,084	30,6	50,59		

Descripción de la prueba		ABSo=0,172; 300 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,09		pHf	7,11	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,172	31,5	0,00	3	
2	0,169	31,5	1,74		
4	0,158	31,5	8,14		
6	0,150	31,5	12,79		
8	0,145	31,5	15,70		
10	0,140	31,5	18,60		
12	0,140	31,5	18,60		
15	0,139	31,5	19,19		
20	0,131	31,5	23,84		
25	0,128	31,5	25,58		
30	0,121	31,5	29,65		
40	0,110	31,5	36,05		
50	0,108	31,5	37,21		
60	0,102	31,5	40,70		
75	0,093	31,5	45,93		
100	0,088	31,5	48,84		
120	0,074	31,5	56,98		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Prueba No. 15 realizada el 26/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo=0,160; 400 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,08		pHf	7,12	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,161	30,1	0,00	1	
2	0,142	30,1	11,80		
4	0,129	30,1	19,88		
6	0,121	30,9	24,84		
8	0,120	30,8	25,47		
10	0,108	30,8	32,92		
12	0,106	31,3	34,16		
15	0,105	31,3	34,78		
20	0,098	31,3	39,13		
25	0,096	30,9	40,37		
30	0,095	31,1	40,99		
40	0,09	31,4	44,10		
50	0,084	31,6	47,83		
60	0,081	31,3	49,69		
75	0,072	31,6	55,28		
85	0,071	31,4	55,90		
100	0,068	31,1	57,76		

Descripción de la prueba		ABSo=0,165; 400 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,08		pHf	7,12	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,165	30,1	0,00	2	
2	0,149	30,1	9,70		
4	0,136	30,1	17,58		
6	0,130	30,1	21,21		
8	0,124	30,1	24,85		
10	0,121	30,1	26,67		
12	0,115	30,1	30,30		

Continuación Tabla XVII

15	0,111	30,1	32,73
20	0,106	30,1	35,76
25	0,100	30,1	39,39
30	0,099	30,1	40,00
40	0,095	30,1	42,42
50	0,088	30,1	46,67
60	0,080	30,1	51,52
75	0,076	30,1	53,94
85	0,075	30,1	54,55
100	0,074	30,1	55,15

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,168; 400 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²		
RPM	63		Flujo volumétrico	400 mL/min
Vol, Inicial	800 mL		Corriente eléctrica aplicada	0,2 A
pH ₀	7,08		pH _f	7,12
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición
0	0,168	30,8	0,00	3
2	0,162	30,8	3,57	
4	0,151	30,8	10,12	
6	0,142	30,8	15,48	
8	0,131	30,8	22,02	
10	0,123	30,8	26,79	
12	0,121	30,8	27,98	
15	0,120	30,8	28,57	
20	0,118	30,8	29,76	
25	0,112	30,8	33,33	
30	0,110	30,8	34,52	
40	0,097	30,8	42,26	
50	0,095	30,8	43,45	
60	0,089	30,8	47,02	
75	0,085	30,8	49,40	
85	0,078	30,8	53,57	
100	0,078	30,8	53,57	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Prueba No. 16 realizada el 26/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [500 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo=0,165; 500 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,05		pHf	7,16	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,165	30,1	0,00	1	
2,5	0,161	30,1	2,42		
5	0,155	30,1	6,06		
7,5	0,15	30,9	9,09		
10	0,148	30,8	10,30		
12,5	0,143	30,8	13,33		
15	0,136	31,3	17,58		
20	0,13	31,3	21,21		
25	0,127	31,3	23,03		
30	0,125	30,9	24,24		
40	0,123	31,1	25,45		
50	0,119	31,4	27,88		
60	0,117	31,6	29,09		
75	0,109	31,3	33,94		
90	0,101	31,6	38,79		
100	0,097	31,4	41,21		
120	0,095	31,1	42,42		

Descripción de la prueba		ABSo=0,163; 500 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,05		pHf	7,16	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,163	30,1	0,00	2	
2,5	0,159	30,1	2,45		
5	0,153	30,1	6,13		
7,5	0,148	30,1	9,20		
10	0,146	30,1	10,43		
12,5	0,141	30,1	13,50		
15	0,134	30,1	17,79		

Continuación Tabla XVIII

20	0,128	30,1	21,47
25	0,125	30,1	23,31
30	0,123	30,1	24,54
40	0,121	30,1	25,77
50	0,117	30,1	28,22
60	0,115	30,1	29,45
75	0,107	30,1	34,36
90	0,099	30,1	39,26
100	0,095	30,1	41,72
120	0,093	30,1	42,94

Descripción de la prueba		ABSo=0,170; 500 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,05		pHf	7,16	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,17	30,1	0,00	3	
2,5	0,166	30,1	2,35		
5	0,16	30,1	5,88		
7,5	0,155	30,1	8,82		
10	0,153	30,1	10,00		
12,5	0,148	30,1	12,94		
15	0,141	30,1	17,06		
20	0,135	30,1	20,59		
25	0,132	30,1	22,35		
30	0,13	30,1	23,53		
40	0,128	30,1	24,71		
50	0,124	30,1	27,06		
60	0,122	30,1	28,24		
75	0,114	30,1	32,94		
90	0,106	30,1	37,65		
100	0,102	30,1	40,00		
120	0,1	30,1	41,18		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Prueba No. 17 realizada el 26/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [550 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,168; 550 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,168	30	0,00	1	
2,5	0,156	30,2	7,14		
5	0,151	30,9	10,12		
7,5	0,149	31,6	11,31		
10	0,147	31,6	12,50		
12,5	0,143	31,6	14,88		
15	0,140	31,6	16,67		
20	0,139	31,6	17,26		
25	0,136	31,6	19,05		
30	0,131	31,6	22,02		
40	0,127	31,6	24,40		
50	0,123	31,6	26,79		
60	0,121	31,6	27,98		
75	0,113	31,6	32,74		
90	0,11	31,6	34,52		
100	0,108	31,6	35,71		
120	0,106	31,6	36,90		

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,168; 550 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,176	30,2	0,00	2	
2	0,166	30,2	5,68		
6	0,162	30,2	7,95		
8	0,157	30,2	10,80		
10	0,156	30,2	11,36		
12	0,151	30,2	14,20		
15	0,149	30,2	15,34		

Continuación Tabla XIX

20	0,146	30,2	17,05
25	0,144	30,2	18,18
30	0,140	30,2	20,45
40	0,136	30,2	22,73
50	0,130	30,2	26,14
60	0,129	30,2	26,70
75	0,123	30,2	30,11
90	0,120	30,2	31,82
100	0,117	30,2	33,52
120	0,116	30,2	34,09

Descripción de la prueba		ABSo = 0,155; 550 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²		
RPM	91		Flujo volumétrico	550 mL/min
Vol. Inicial	800 mL		Corriente eléctrica aplicada	0,2 A
pHo	7,1		pHf	7,2
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición
0	0,171	30	0,00	3
2,5	0,161	30	5,85	
5	0,155	30	9,36	
7,5	0,154	30	9,94	
10	0,152	30	11,11	
12,5	0,147	30	14,04	
15	0,144	30	15,79	
20	0,142	30	16,96	
25	0,140	30	18,13	
30	0,135	30	21,05	
40	0,133	30	22,22	
50	0,128	30	25,15	
60	0,125	30	26,90	
75	0,119	30	30,41	
90	0,116	30	32,16	
100	0,112	30	34,50	
120	0,111	30	35,09	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Prueba No. 18 realizada el 27/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [300 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,72 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo=0,177; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,09		pHf	7,11	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,177	32	0,00	1	
5	0,169	32	4,52		
10	0,156	32	11,86		
15	0,141	32	20,34		
30	0,130	32	26,55		
45	0,117	32	33,90		
60	0,105	32	40,68		
80	0,095	32	46,33		
100	0,086	32	51,41		
120	0,073	32	58,76		

Descripción de la prueba		ABSo=0,175; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,09		pHf	7,11	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,175	32,5	0,00	2	
5	0,167	32,5	4,57		
10	0,154	32,5	12,00		
15	0,139	32,5	20,57		
30	0,128	32,5	26,86		
45	0,115	32,5	34,29		
60	0,103	32,5	41,14		
80	0,093	32,5	46,86		
100	0,084	32,5	52,00		
120	0,071	32,5	59,43		

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,179; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pH ₀	7,09		pH _f	7,11	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,179	33	0,00	3	
5	0,171	33	4,47		
10	0,158	33	11,73		
15	0,143	33	20,11		
30	0,132	33	26,26		
45	0,119	33	33,52		
60	0,107	33	40,22		
80	0,097	33	45,81		
100	0,088	33	50,84		
120	0,075	33	58,10		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Prueba No. 19 realizada el 27/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,72 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,165; 400 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pH ₀	7,08		pH _f	7,12	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,165	32,6	0,00	1	
2	0,153	32,6	7,27		
4	0,139	32,6	15,76		
6	0,12	32,6	27,27		
8	0,113	32,6	31,52		
10	0,101	32,6	38,79		
12	0,098	32,6	40,61		
15	0,091	32,6	44,85		
20	0,087	32,6	47,27		
25	0,086	32,6	47,88		
30	0,084	32,6	49,09		
40	0,079	32,6	52,12		

Continuación Tabla XXI

50	0,076	32,6	53,94
60	0,069	32,6	58,18
75	0,068	32,6	58,79
85	0,066	32,6	60,00
100	0,064	32,6	61,21

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,163; 400 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pH ₀	7,08		pH _f	7,12	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,163	33,1	0,00	2	
2	0,151	33,1	7,36		
4	0,137	33,1	15,95		
6	0,118	33,1	27,61		
8	0,111	33,1	31,90		
10	0,099	33,1	39,26		
12	0,096	33,1	41,10		
15	0,089	33,1	45,40		
20	0,085	33,1	47,85		
25	0,084	33,1	48,47		
30	0,082	33,1	49,69		
40	0,077	33,1	52,76		
50	0,074	33,1	54,60		
60	0,067	33,1	58,90		
75	0,066	33,1	59,51		
85	0,064	33,1	60,74		
100	0,062	33,1	61,96		

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,169; 400 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pH ₀	7,08		pH _f	7,12	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,169	33,3	0,00	3	
2	0,157	33,3	7,10		
4	0,143	33,3	15,38		
6	0,124	33,3	26,63		

Continuación Tabla XXI

8	0,117	33,3	30,77
10	0,105	33,3	37,87
12	0,102	33,3	39,64
15	0,095	33,3	43,79
20	0,091	33,3	46,15
25	0,090	33,3	46,75
30	0,088	33,3	47,93
40	0,083	33,3	50,89
50	0,080	33,3	52,66
60	0,073	33,3	56,80
75	0,072	33,3	57,40
85	0,070	33,3	58,58
100	0,068	33,3	59,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Prueba No. 20 realizada el 27/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [400; 500 mL min⁻¹] e intensidad de corriente [0,72 mA cm⁻²]**

Descripción de la prueba		ABS ₀ =0,166; 500 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²		
RPM	63		Flujo volumétrico	500 mL/min
Vol. Inicial	800 mL		Corriente eléctrica aplicada	0,25 A
pH ₀	7,08		pH _f	7,12
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición
0	0,166	33,1	0,00	1
2,5	0,161	33,1	3,01	
5	0,156	33,1	6,02	
7,5	0,146	33,1	12,05	
10	0,144	33,1	13,25	
12,5	0,141	33,1	15,06	
15	0,132	33,1	20,48	
20	0,124	33,1	25,30	
25	0,119	33,1	28,31	
30	0,115	33,1	30,72	
40	0,111	33,1	33,13	
50	0,107	33,1	35,54	
60	0,105	33,1	36,75	

Continuación Tabla XXII

75	0,103	33,1	37,95
90	0,101	33,1	39,16
100	0,096	33,1	42,17
120	0,095	33,1	42,77

Descripción de la prueba		ABSo=0,168; 400 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,08		pHf	7,12	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,168	32,7	0,00	2	
2,5	0,163	32,7	2,98		
5	0,158	32,7	5,95		
7,5	0,148	32,7	11,90		
10	0,146	32,7	13,10		
12,5	0,143	32,7	14,88		
15	0,134	32,7	20,24		
20	0,126	32,7	25,00		
25	0,121	32,7	27,98		
30	0,117	32,7	30,36		
40	0,113	32,7	32,74		
50	0,109	32,7	35,12		
60	0,107	32,7	36,31		
75	0,105	32,7	37,50		
90	0,103	32,7	38,69		
100	0,098	32,7	41,67		
120	0,097	32,7	42,26		

Descripción de la prueba		ABSo=0,164; 400 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,08		pHf	7,12	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,164	33,6	0,00	3	
2,5	0,159	33,6	3,05		
5	0,154	33,6	6,10		
7,5	0,144	33,6	12,20		

Continuación Tabla XXII

10	0,142	33,6	13,41
12,5	0,139	33,6	15,24
15	0,13	33,6	20,73
20	0,122	33,6	25,61
25	0,117	33,6	28,66
30	0,113	33,6	31,10
40	0,109	33,6	33,54
50	0,105	33,6	35,98
60	0,103	33,6	37,20
75	0,101	33,6	38,41
90	0,099	33,6	39,63
100	0,094	33,6	42,68
120	0,093	33,6	43,29

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Prueba No. 21 realizada el 27/10/2017 con absorbancia alta, a caudal [550 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,72 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,169; 550 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²		
RPM	91		Flujo volumétrico	550 mL/min
Vol. Inicial	800 mL		Corriente eléctrica aplicada	0,25 A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición
0	0,169	33,4	0,00	1
2,5	0,161	33,4	4,73	
5	0,156	33,4	7,69	
7,5	0,15	33,4	11,24	
10	0,147	33,4	13,02	
12,5	0,145	33,4	14,20	
15	0,131	33,4	22,49	
20	0,127	33,4	24,85	
25	0,125	33,4	26,04	
30	0,12	33,4	28,99	
40	0,117	33,4	30,77	
50	0,115	33,4	31,95	
60	0,111	33,4	34,32	

Continuación Tabla XXIII

75	0,109	33,4	35,50
90	0,107	33,4	36,69
100	0,104	33,4	38,46
120	0,103	33,4	39,05

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,171; 550 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,171	33,5	0,00	2	
2,5	0,163	33,5	4,68		
5	0,158	33,5	7,60		
7,5	0,152	33,5	11,11		
10	0,149	33,5	12,87		
12,5	0,147	33,5	14,04		
15	0,133	33,5	22,22		
20	0,129	33,5	24,56		
25	0,127	33,5	25,73		
30	0,122	33,5	28,65		
40	0,119	33,5	30,41		
50	0,117	33,5	31,58		
60	0,113	33,5	33,92		
75	0,111	33,5	35,09		
90	0,109	33,5	36,26		
100	0,106	33,5	38,01		
120	0,105	33,5	38,60		

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,167; 550 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,167	33	0,00	3	
2,5	0,159	33	4,79		
5	0,154	33	7,78		
7,5	0,148	33	11,38		

Continuación Tabla XXIII

10	0,145	33	13,17
12,5	0,143	33	14,37
15	0,129	33	22,75
20	0,125	33	25,15
25	0,123	33	26,35
30	0,118	33	29,34
40	0,115	33	31,14
50	0,113	33	32,34
60	0,109	33	34,73
75	0,107	33	35,93
90	0,105	33	37,13
100	0,102	33	38,92
120	0,101	33	39,52

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Prueba No. 22 realizada el 30/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [400 mL min⁻¹] e intensidad de corriente [0,57; 0,69 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,112; 400 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²		
RPM	63		Flujo volumétrico	400 mL/min
Vol. Inicial	800 mL		Corriente eléctrica aplicada	0,2 A
pHo	7,1		pHf	7,2
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición
0	0,112	31,5	0,00	1
2,5	0,111	31,5	0,89	
5	0,110	31,5	1,79	
7,5	0,110	31,6	1,79	
10	0,110	31,6	1,79	
12,5	0,108	31,6	3,57	
15	0,107	31,6	4,46	
20	0,105	31,6	6,25	
30	0,101	31,6	9,82	
40	0,097	31,6	13,39	
50	0,097	31,6	13,39	
60	0,092	31,6	17,86	
75	0,089	31,6	20,54	

Continuación Tabla XXIV

90	0,088	31,6	21,43
----	-------	------	-------

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,112; 400 mL min ⁻¹ , 0,69 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,22	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,110	31,5	0,00	2	
2,5	0,108	31,5	1,82		
5	0,108	31,5	1,82		
7,5	0,107	31,5	2,73		
10	0,107	31,5	2,73		
12,5	0,106	31,5	3,64		
15	0,104	31,5	5,45		
20	0,102	31,5	7,27		
30	0,098	31,5	10,91		
40	0,096	31,5	12,73		
50	0,093	31,5	15,18		
60	0,090	31,5	18,18		
75	0,088	31,5	20,00		
90	0,086	31,5	21,82		
100	0,085	31,5	22,73		
120	0,085	31,5	22,73		

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,112; 400 mL min ⁻¹ , 0,69 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,22	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,115	31,6	0,00	3	
3	0,114	31,6	0,87		
6	0,113	31,6	1,74		
9	0,113	31,6	1,74		
10	0,112	31,6	2,61		
12	0,111	31,6	3,48		
15	0,110	31,6	4,35		
20	0,109	31,6	5,22		
30	0,106	31,6	7,83		

Continuación Tabla XXIV

40	0,104	31,6	9,57
50	0,100	31,6	13,04
60	0,097	31,6	15,65
75	0,094	31,6	18,26
90	0,091	31,6	20,87
100	0,091	31,6	20,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. Prueba No. 23 realizada el 30/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [500 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,57 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,112; 500 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,112	31,5	0,00	1	
3	0,1095	31,5	2,23		
6	0,107	31,5	4,46		
12	0,1055	31,6	5,80		
15	0,105	31,6	6,25		
20	0,102	31,6	8,93		
25	0,1	31,6	10,71		
30	0,0985	31,6	12,05		
40	0,0955	31,6	14,73		
50	0,0945	31,6	15,63		
60	0,0915	31,6	18,30		
75	0,089	31,6	20,54		
90	0,0885	31,6	20,98		
100	0,088	31,6	21,43		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,110; 500 mL min ⁻¹ , 0,57mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,110	31,3	0,00	2	
2,5	0,108	31,3	2,27		
5	0,105	31,3	4,55		
7,5	0,104	31,3	5,91		
10	0,103	31,3	6,36		
15	0,098	31,3	10,91		
20	0,097	31,3	12,27		
30	0,094	31,3	15,00		
40	0,093	31,3	15,91		
50	0,090	31,3	18,64		
60	0,087	31,3	20,91		
75	0,087	31,3	21,36		
90	0,086	31,3	21,82		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,115; 500 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,115	31,2	0,00	3	
3	0,113	31,2	2,17		
6	0,110	31,2	4,35		
9	0,109	31,2	5,65		
10	0,108	31,2	6,09		
12	0,105	31,2	8,70		
15	0,103	31,2	10,43		
20	0,102	31,2	11,74		
30	0,099	31,2	14,35		
40	0,098	31,2	15,22		
50	0,095	31,2	17,83		
60	0,092	31,2	20,00		
75	0,092	31,2	20,43		
90	0,091	31,2	20,87		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. Prueba No. 24 realizada el 30/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [550 mL min⁻¹] e intensidad de corriente [0,57; 0,69 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,120; 550 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,120	31,5	0,00	1	
3	0,113	31,6	5,83		
6	0,112	31,6	6,67		
12	0,111	31,6	7,50		
15	0,111	31,6	7,50		
20	0,109	31,6	9,17		
25	0,105	31,6	12,50		
30	0,104	31,6	13,33		
40	0,103	31,6	14,17		
50	0,103	31,6	14,17		
60	0,099	31,6	17,50		
75	0,097	31,6	19,17		
90	0,096	31,6	20,00		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,120; 550 mL min ⁻¹ , 0,69 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,22	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,116	31,5	0,00	2	
3	0,111	31,5	4,31		
6	0,109	31,5	6,03		
12	0,107	31,5	7,76		
15	0,106	31,5	8,62		
20	0,102	31,5	12,07		
25	0,101	31,5	12,93		
30	0,100	31,5	13,79		
40	0,099	31,5	14,66		
50	0,097	31,5	16,38		
60	0,095	31,5	18,10		

Continuación Tabla XXVI

75	0,093	31,5	19,83
90	0,092	31,5	20,69
100	0,092	31,5	20,69

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,120; 550 mL min ⁻¹ , 0,57 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,2	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,112	31,6	0,00	3	
3	0,108	31,6	3,57		
6	0,104	31,6	7,14		
12	0,103	31,6	8,04		
15	0,103	31,6	8,04		
20	0,099	31,6	11,61		
25	0,097	31,6	13,39		
30	0,096	31,6	14,29		
40	0,094	31,6	16,07		
50	0,092	31,6	17,86		
60	0,091	31,6	18,75		
75	0,089	31,6	20,54		
90	0,089	31,6	20,54		
100	0,088	31,6	21,43		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Prueba No. 25 realizada el 31/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [550 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,117; 550 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,117	29,4	0,00	1	
3	0,114	28,9	2,56		
6	0,110	29,6	5,98		

Continuación Tabla XXVII

9	0,105	29,6	10,26
12	0,102	29,6	12,82
15	0,097	30,5	17,09
20	0,097	30,6	17,09
25	0,095	30,7	18,80
30	0,093	30,7	20,51
40	0,091	30,7	22,22
50	0,091	30,6	22,22
60	0,090	30	23,08

Descripción de la prueba		ABSo = 0,117; 550 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,120	29,4	0,00	2	
3	0,118	29,4	1,67		
6	0,115	29,4	4,17		
9	0,111	29,4	7,50		
12	0,110	29,4	8,33		
15	0,105	29,4	12,50		
20	0,101	29,4	15,83		
25	0,099	29,4	17,50		
30	0,097	29,4	19,17		
40	0,096	29,4	20,00		
50	0,094	29,4	21,67		
60	0,093	29,4	22,50		
75	0,093	29,4	22,50		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,117; 550 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,112	29,6	0,00	3	
3	0,107	29,6	4,46		
6	0,104	29,6	7,14		
9	0,102	29,6	8,93		

Continuación Tabla XXVII

12	0,100	29,6	10,71
15	0,095	29,6	15,18
20	0,093	29,6	16,96
25	0,090	29,6	19,64
30	0,089	29,6	20,54
40	0,087	29,6	22,32
50	0,086	29,6	23,21
60	0,085	29,6	24,11
75	0,085	29,6	24,11

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Prueba No. 26 realizada el 31/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [500, 550 mL min⁻¹] e intensidad de corriente [0,43 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,114; 500 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,114	26,5	0,00	1	
3	0,110	26,5	3,52		
6	0,107	26,5	6,17		
9	0,104	26,5	8,37		
12	0,102	26,5	10,13		
15	0,099	26,5	12,78		
20	0,096	26,5	15,42		
25	0,094	26,5	17,18		
30	0,093	26,5	18,50		
40	0,091	26,5	20,26		
50	0,089	26,5	21,59		
60	0,089	26,5	22,03		
75	0,088	26,5	22,47		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,117; 550 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,117	26,3	0,00	2	
3	0,113	26,3	3,42		
6	0,110	26,3	5,98		
9	0,108	26,3	8,12		
12	0,106	26,3	9,83		
15	0,103	26,3	12,39		
20	0,100	26,3	14,96		
25	0,098	26,3	16,67		
30	0,096	26,3	17,95		
40	0,094	26,3	19,66		
50	0,093	26,3	20,94		
60	0,092	26,3	21,37		
75	0,092	26,3	21,79		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,111; 550 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	91		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,111	26,2	0,00	3	
3	0,107	26,2	3,60		
6	0,104	26,2	6,31		
9	0,102	26,2	8,56		
12	0,100	26,2	10,36		
15	0,097	26,2	13,06		
20	0,094	26,2	15,77		
25	0,092	26,2	17,57		
30	0,090	26,2	18,92		
40	0,088	26,2	20,72		
50	0,087	26,2	22,07		
60	0,086	26,2	22,52		
75	0,086	26,2	22,97		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Prueba No. 27 realizada el 31/10/2017 a baja absorbancia, a caudal [400 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,100; 400 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,100	25,8	0,00	1	
3	0,099	25,8	1,00		
6	0,098	25,3	2,00		
12	0,098	25	2,00		
15	0,093	25,4	7,00		
20	0,072	25,4	28,00		
25	0,046	25,7	54,00		
30	0,030	25,7	70,00		
42	0,015	25,1	85,00		
50	0,011	24,8	89,00		
60	0,009	24,8	91,00		
75	0,008	24,8	92,00		
90	0,008	24,8	92,00		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,100; 400 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,110	25,8	0,00	2	
3	0,105	25,8	4,55		
6	0,103	25,8	6,36		
12	0,102	25,8	7,27		
15	0,101	25,8	8,18		
20	0,095	25,8	13,64		
25	0,093	25,8	15,45		
30	0,092	25,8	16,36		
40	0,090	25,8	18,18		
50	0,087	25,8	20,91		
60	0,087	25,8	20,91		

Continuación Tabla XXIX

75	0,086	25,8	21,82
90	0,086	25,8	21,82
100	0,085	25,8	22,73

Descripción de la prueba		ABSo = 0,100; 400 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,106	25,3	0,00	3	
3	0,104	25,3	1,89		
6	0,102	25,3	3,77		
12	0,098	25,3	7,55		
15	0,097	25,3	8,49		
20	0,096	25,3	9,43		
25	0,094	25,3	11,32		
30	0,091	25,3	14,15		
40	0,088	25,3	16,98		
50	0,086	25,3	18,87		
60	0,084	25,3	20,75		
75	0,083	25,3	21,70		
90	0,082	25,3	22,64		
100	0,082	25,3	22,64		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Prueba No. 28 realizada el 02/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,43 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,113; 300 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,113	26	0,00	1	
3	0,111	26	1,77		
6	0,109	26,1	3,54		

Continuación Tabla XXX

12	0,108	26,1	4,42
15	0,108	26,1	4,42
21	0,104	26,5	7,96
25	0,102	26,8	9,73
30	0,102	26,5	9,73
40	0,102	26,5	9,73
50	0,097	26,3	14,16
60	0,095	26,1	15,93

Descripción de la prueba		ABSo = 0,113; 300 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,117	26	0,00	2	
2,5	0,115	26	1,71		
5	0,114	26	2,56		
7,5	0,113	26	3,42		
10	0,113	26	3,42		
12	0,112	26	4,27		
15	0,112	26	4,27		
20	0,109	26	6,84		
25	0,107	26	8,55		
30	0,106	26	9,40		
40	0,103	26	11,97		
50	0,101	26	13,68		
60	0,099	26	15,38		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,113; 300 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,110	26,1	0,00	3	
3	0,107	26,1	2,73		
6	0,106	26,1	3,64		
9	0,105	26,1	4,55		
12	0,104	26,1	5,45		

Continuación Tabla XXX

15	0,103	26,1	6,36
21	0,100	26,1	9,09
25	0,099	26,1	10,00
30	0,097	26,1	11,82
40	0,095	26,1	13,64
50	0,093	26,1	15,45
60	0,092	26,1	16,36

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. Prueba No. 29 realizada el 02/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300 mL min⁻¹] e intensidad de corriente constante [0,72 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,119; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,119	33,1	0,00	1	
2,5	0,118	33,1	0,84		
5	0,117	33,1	1,68		
7,5	0,115	33,1	3,36		
10	0,115	33,1	3,36		
12	0,114	33,1	4,20		
15	0,112	33,1	5,88		
20	0,111	33,1	6,72		
25	0,11	33,1	7,56		
30	0,108	33,1	9,24		
40	0,105	33,1	11,76		
50	0,104	33,1	12,61		
60	0,102	33,1	14,29		
75	0,101	33,1	15,13		
90	0,099	33,1	16,81		
100	0,099	33,1	16,81		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,115; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,115	33,5	0,00	2	
2,5	0,114	33,5	0,87		
5	0,113	33,5	1,74		
7,5	0,111	33,5	3,48		
10	0,111	33,5	3,48		
12	0,110	33,5	4,35		
15	0,108	33,5	6,09		
20	0,107	33,5	6,96		
25	0,106	33,5	7,83		
30	0,104	33,5	9,57		
40	0,101	33,5	12,17		
50	0,100	33,5	13,04		
60	0,098	33,5	14,78		
100	0,097	33,5	15,65		
120	0,095	33,5	17,39		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,120; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,120	33,2	0,00	3	
3	0,119	33,2	0,83		
6	0,118	33,2	1,67		
9	0,116	33,2	3,33		
12	0,116	33,2	3,33		
15	0,115	33,2	4,17		
21	0,113	33,2	5,83		
25	0,112	33,2	6,67		
30	0,111	33,2	7,50		
40	0,109	33,2	9,17		
50	0,106	33,2	11,67		
60	0,105	33,2	12,50		
90	0,103	33,2	14,17		

Continuación Tabla XXXI

100	0,102	33,2	15,00
120	0,100	33,2	16,67

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Prueba No. 30 realizada el 02/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300, 400 mL min⁻¹] e intensidad de corriente [0,72 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,112; 400 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,112	33	0,00	1	
2,5	0,111	33	0,89		
5	0,106	33	5,36		
7,5	0,105	33	6,25		
10	0,104	33	7,14		
12,5	0,102	33	8,93		
15	0,102	33	8,93		
20	0,1	33	10,71		
30	0,098	33	12,50		
40	0,096	33	14,29		
50	0,095	33	15,18		
60	0,094	33	16,07		
75	0,093	33	16,96		
90	0,093	33	16,96		
100	0,092	33	17,86		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,115; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,115	33,6	0,00	2	
2,5	0,114	33,6	0,87		
5	0,109	33,6	5,22		

Continuación Tabla XXXII

7,5	0,108	33,6	6,09
10	0,107	33,6	6,96
12	0,105	33,6	8,70
15	0,105	33,6	8,70
20	0,103	33,6	10,43
25	0,101	33,6	12,17
30	0,099	33,6	13,91
40	0,098	33,6	14,78
50	0,097	33,6	15,65
60	0,096	33,6	16,52
100	0,096	33,6	16,52
120	0,095	33,6	17,39

Descripción de la prueba		ABSo = 0,110; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	63		Flujo volumétrico	400	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,110	33,1	0,00	3	
3	0,109	33,1	0,91		
6	0,104	33,1	5,45		
9	0,103	33,1	6,36		
12	0,102	33,1	7,27		
15	0,100	33,1	9,09		
21	0,100	33,1	9,09		
25	0,098	33,1	10,91		
30	0,096	33,1	12,73		
40	0,094	33,1	14,55		
50	0,093	33,1	15,45		
60	0,092	33,1	16,36		
90	0,091	33,1	17,27		
100	0,091	33,1	17,27		
120	0,090	33,1	18,18		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. Prueba No. 31 realizada el 03/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300, 500 mL min⁻¹] e intensidad de corriente [0,72 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABSo = 0,113; 500 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,113	33,7	0,00	1	
3	0,111	33,7	1,77		
6	0,11	33,7	2,65		
12	0,109	33,7	3,54		
15	0,105	33,7	7,08		
20	0,103	33,7	8,85		
25	0,102	33,7	9,73		
30	0,1	33,7	11,50		
40	0,098	33,7	13,27		
50	0,097	33,7	14,16		
60	0,095	33,7	15,93		
75	0,094	33,7	16,81		
90	0,093	33,7	17,70		
100	0,091	33,7	19,47		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,116; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,116	32,9	0,00	2	
2,5	0,114	32,9	1,72		
5	0,113	32,9	2,59		
7,5	0,112	32,9	3,45		
10	0,108	32,9	6,90		
12	0,106	32,9	8,62		
15	0,105	32,9	9,48		
20	0,103	32,9	11,21		
25	0,101	32,9	12,93		
30	0,100	32,9	13,79		

Continuación Tabla XXXIII

40	0,098	32,9	15,52
50	0,097	32,9	16,38
60	0,096	32,9	17,24
100	0,094	32,9	18,97

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,110; 300 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	82		Flujo volumétrico	500	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,110	33,4	0,00	3	
3	0,108	33,4	1,82		
6	0,107	33,4	2,73		
9	0,106	33,4	3,64		
12	0,102	33,4	7,27		
15	0,100	33,4	9,09		
21	0,099	33,4	10,00		
25	0,097	33,4	11,82		
30	0,095	33,4	13,64		
40	0,094	33,4	14,55		
50	0,092	33,4	16,36		
60	0,091	33,4	17,27		
90	0,090	33,4	18,18		
100	0,088	33,4	20,00		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. Prueba No. 32 realizada el 03/11/2017 a baja absorbancia, a caudal [300, 550 mL min⁻¹] e intensidad de corriente [0,43; 0,57 mA cm⁻²]

Descripción de la prueba		ABS ₀ = 0,112; 550 mL min ⁻¹ , 0,72 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	550	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,25	A
pH ₀	7,1		pH _f	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,112	33,4	0,00	1	
3	0,11	33,4	1,79		

Continuación Tabla XXXIV

6	0,109	33,4	2,68
12	0,107	33,4	4,46
15	0,105	33,4	6,25
20	0,105	33,4	6,25
25	0,103	33,4	8,04
30	0,1	33,4	10,71
40	0,099	33,4	11,61
50	0,096	33,4	14,29
60	0,096	33,4	14,29
75	0,095	33,4	15,18
90	0,092	33,4	17,86
100	0,09	33,4	19,64

Descripción de la prueba		ABSo = 0,117; 300 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,117	33,5	0,00	2	
3	0,115	33,5	1,71		
6	0,114	33,5	2,56		
12	0,112	33,5	4,27		
15	0,110	33,5	5,98		
20	0,110	33,5	5,98		
25	0,108	33,5	7,69		
30	0,105	33,5	10,26		
40	0,104	33,5	11,11		
50	0,101	33,5	13,68		
60	0,101	33,5	13,68		
75	0,100	33,5	14,53		
90	0,097	33,5	17,09		
100	0,095	33,5	18,80		

Descripción de la prueba		ABSo = 0,110; 300 mL min ⁻¹ , 0,43 mA cm ⁻²			
RPM	44		Flujo volumétrico	300	mL/min
Vol. Inicial	800	mL	Corriente eléctrica aplicada	0,15	A
pHo	7,1		pHf	7,2	
Tiempo (min)	ABS	Voltaje (V)	Remoción total (%)	Repetición	
0	0,110	33,8	0,00	3	
3	0,108	33,8	1,82		
6	0,107	33,8	2,73		
12	0,105	33,8	4,55		
15	0,103	33,8	6,36		
20	0,103	33,8	6,36		
25	0,101	33,8	8,18		
30	0,098	33,8	10,91		
40	0,097	33,8	11,82		
50	0,094	33,8	14,55		
60	0,094	33,8	14,55		
75	0,093	33,8	15,45		
90	0,090	33,8	18,18		
100	0,088	33,8	20,00		

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Plan de análisis de los resultados

3.7.3.1. Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables

El análisis de los resultados se realizará a partir de un análisis de varianza (ANOVA) y la normalización de gráficas creadas con datos de absorbancia en función del tiempo y la comparación de dichas gráficas según los valores elegidos para las variables de control.

También se usarán los datos experimentales obtenidos para calcular los valores estadísticos para dar validez a los resultados.

3.7.3.2. Programas por utilizar para análisis de datos

- Microsoft Word 2017: utilizado para procesamiento de texto.
- Microsoft Excel 2017: utilizado para el procesamiento de datos, realización de gráficas, obtención de modelos matemáticos y análisis estadístico.

3.8. Análisis estadístico

3.8.1. Media aritmética

Para calcular los datos promedio y para calcular la desviación estándar se utilizará la media aritmética.

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

Ecuación 3

3.8.2. Error de precisión

3.8.2.1. Desviación estándar

$$\sigma_{EST} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\tilde{x} - x_i)^2}{n - 1}}$$

Ecuación 4

3.8.2.2. Error de precisión

$$CV = \frac{\sigma_{EST}}{\tilde{x}} * 100 \%$$

Ecuación 5

3.8.3. Error de incertidumbre

Partiendo de diferenciales, se estimará el error de incertidumbre de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{INC} = \frac{\Delta f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)}{f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)} * 100 \% = \left(\frac{1}{f} * \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \right) * 100 \%$$

Ecuación 6

3.8.4. Análisis de varianzas (ANOVA)

Para verificar si existe variación entre los datos recabados al variar densidad de corriente, flujo volumétrico y transmitancia inicial, se utilizará un análisis de varianzas (ANOVA).

3.8.4.1. Varianza de cada muestra

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\tilde{x} - x_i)^2}{n - 1}$$

Ecuación 7

3.8.4.2. Estimación interna de varianzas

$$S_w^2 = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_k}{k}$$

Ecuación 8

3.8.4.3. Varianza de las medias muestrales

$$S_x^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(\tilde{x} - x_i)^2}{k - 1}$$

Ecuación 9

3.8.4.4. Parámetro F de Fisher

$$F = \frac{n * S_x^2}{S_w^2}$$

Ecuación 10

3.8.4.5. Grados de libertad

$$v_1 = k - 1$$

Ecuación 11

$$v_2 = k(n - 1)$$

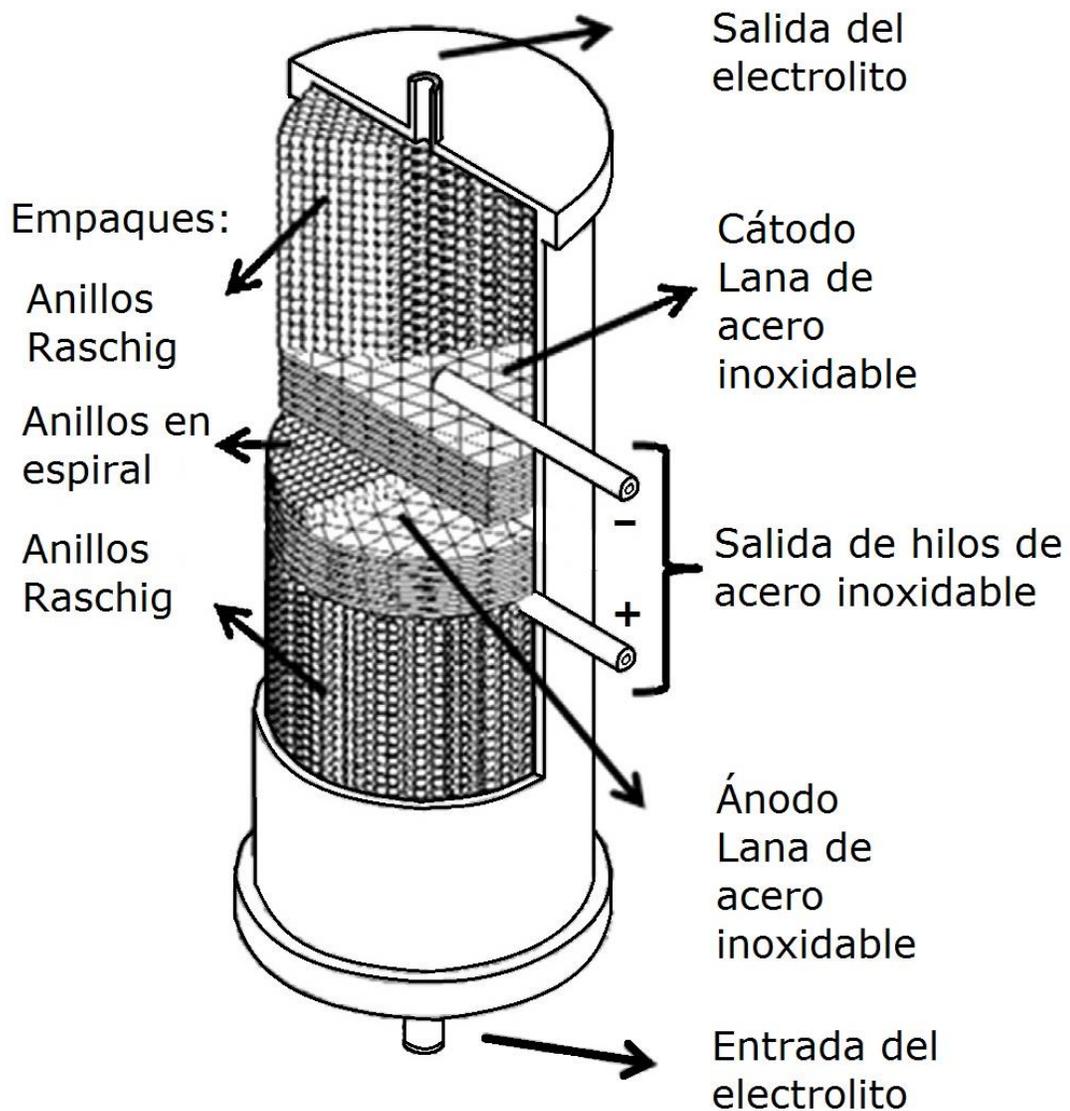
Ecuación 12

Suponiendo que los datos se distribuyen en forma normal y con base en el nivel de confianza del estudio, se determina el valor crítico de F. Si el valor calculado de F es mayor que el valor crítico de F, se rechaza la hipótesis nula.

La hipótesis nula, en este caso, sugiere que la variación de las medias entre un nivel y otro no son significativas; por otra parte, la hipótesis alternativa sugiere que la variación de las medias entre un nivel y otro son significativas.

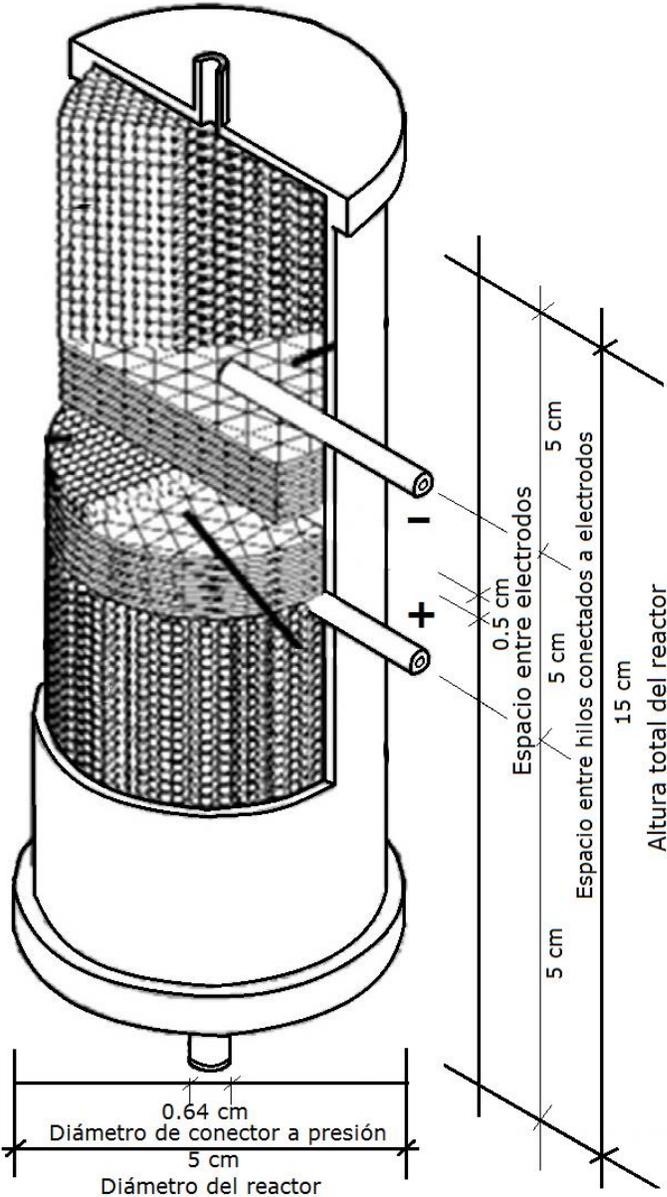
3.9. Diagramas para construcción del reactor electrolítico continuo y esquema para fase experimental

Figura 11. Diagrama del reactor electrolítico y sus componentes.



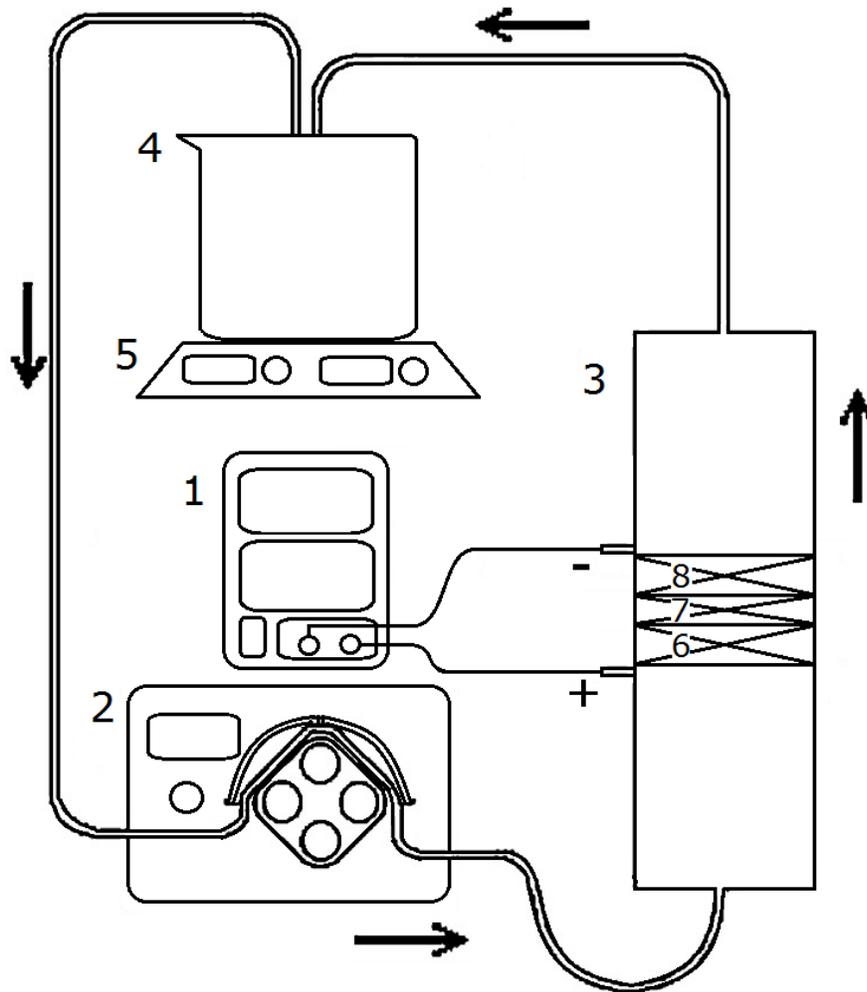
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Diagrama del reactor electrolítico y medidas



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Esquema de fase experimental



1. Potenciostato/Galvanostato
2. Bomba peristáltica
3. Reactor
4. Reservorio
5. Plancha de calentamiento con agitación
6. Cátodo
7. Espacio entre electrodos
8. Ánodo

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la experimentación realizada para definir los efectos que se observan de la transmitancia inicial, la densidad de corriente y el flujo volumétrico sobre el tratamiento para la desactivación oxidativa y eliminación de alga *Chlorella vulgaris* en el reactor construido.

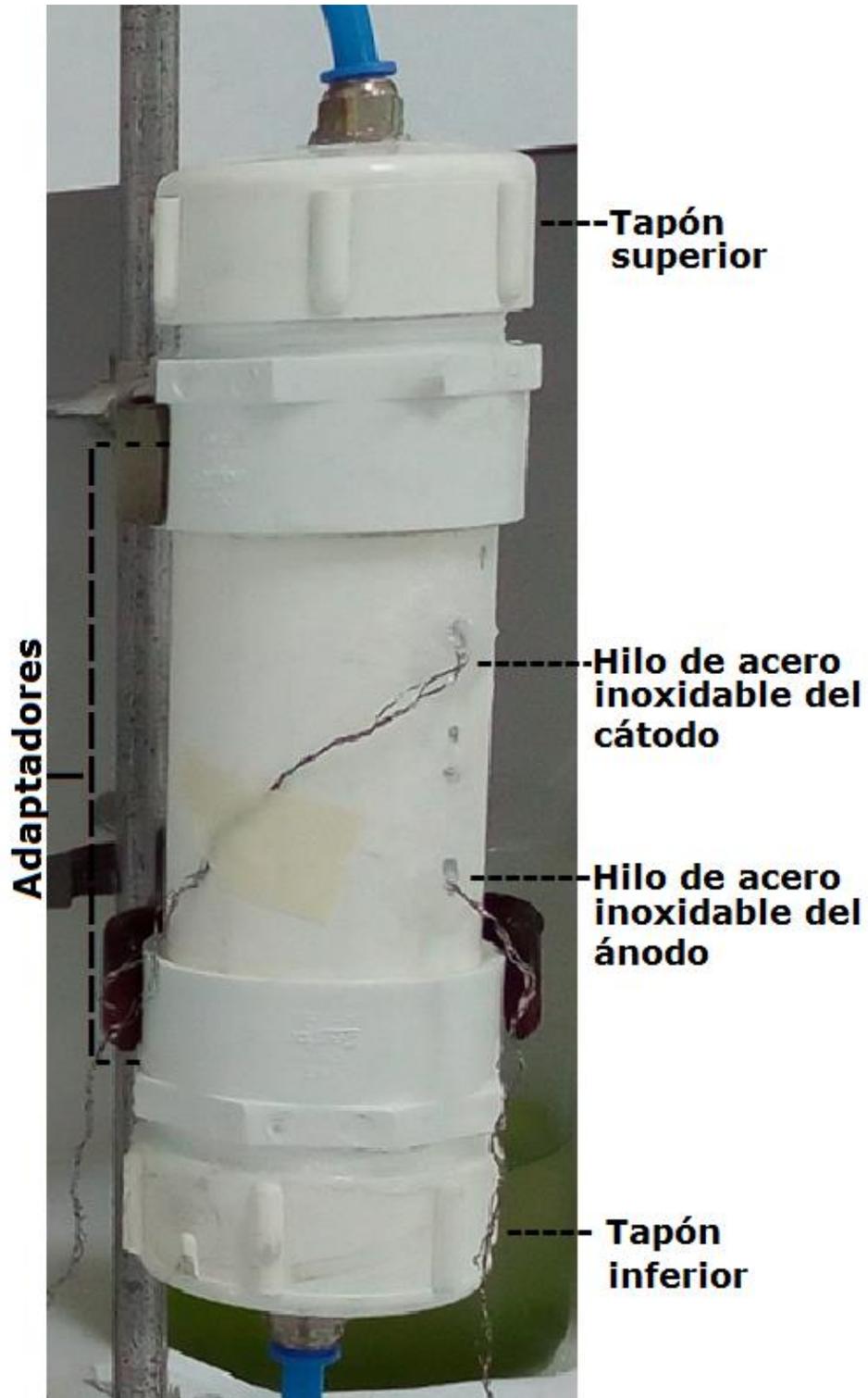
4.1. Adaptación y construcción del reactor electrolítico de lecho fijo

Figura 14. Reactor electrolítico continuo vista frontal



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Reactor electrolítico continuo vista lateral



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Tapones del reactor electrolítico**



Fuente: elaboración propia.

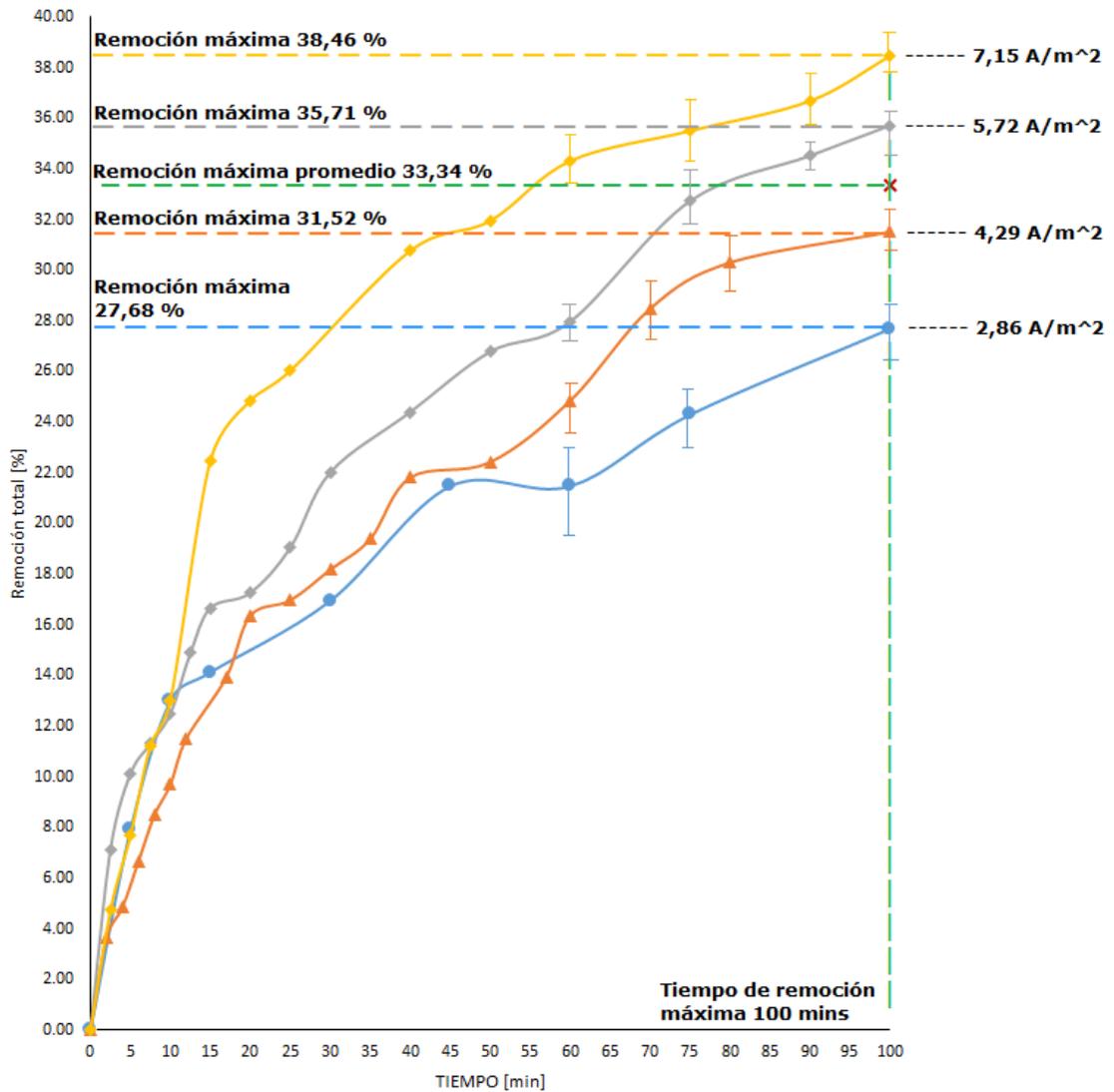
Figura 17. **Acoplamiento final del tubo, adaptador, tapón del reactor
electrolítico y conector de bronce a presión**



Fuente: elaboración propia.

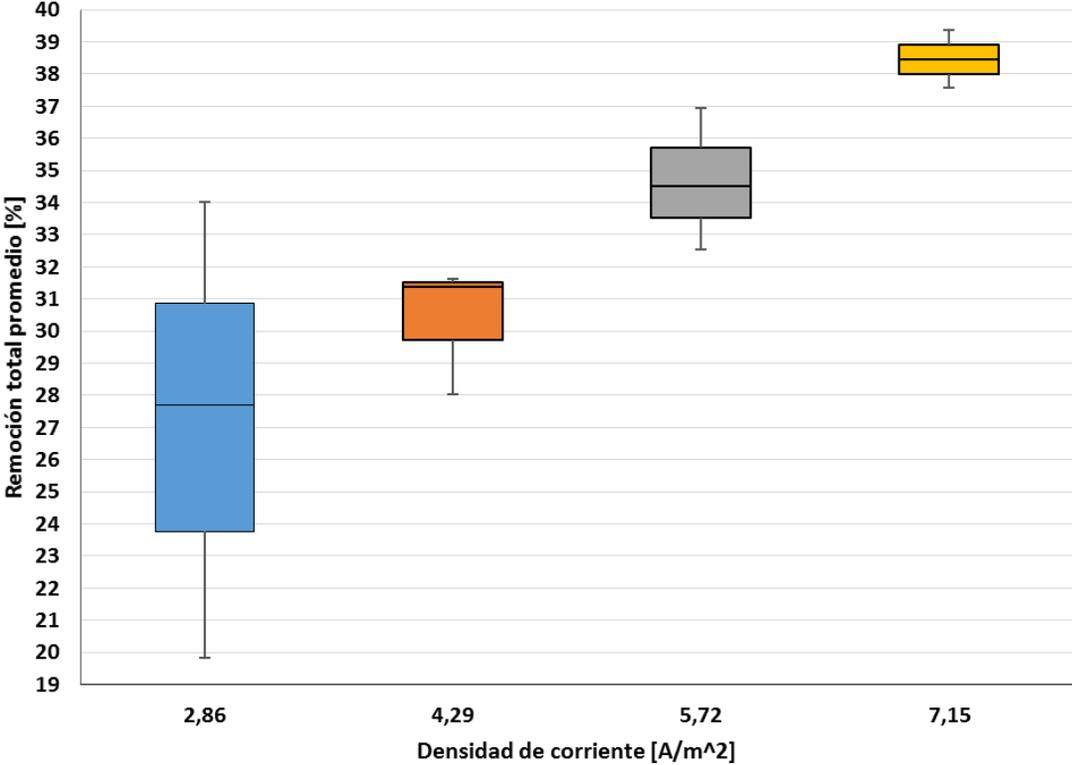
4.2. Efecto de la densidad de corriente en el tratamiento electroquímico estudiado

Figura 18. Remoción total promedio en función del tiempo a flujo volumétrico constante (550 mL min^{-1}) con absorbancia inicial alta ($\text{ABS} = 0,165 - 0,177$; $\lambda = 680 \text{ nm}$)



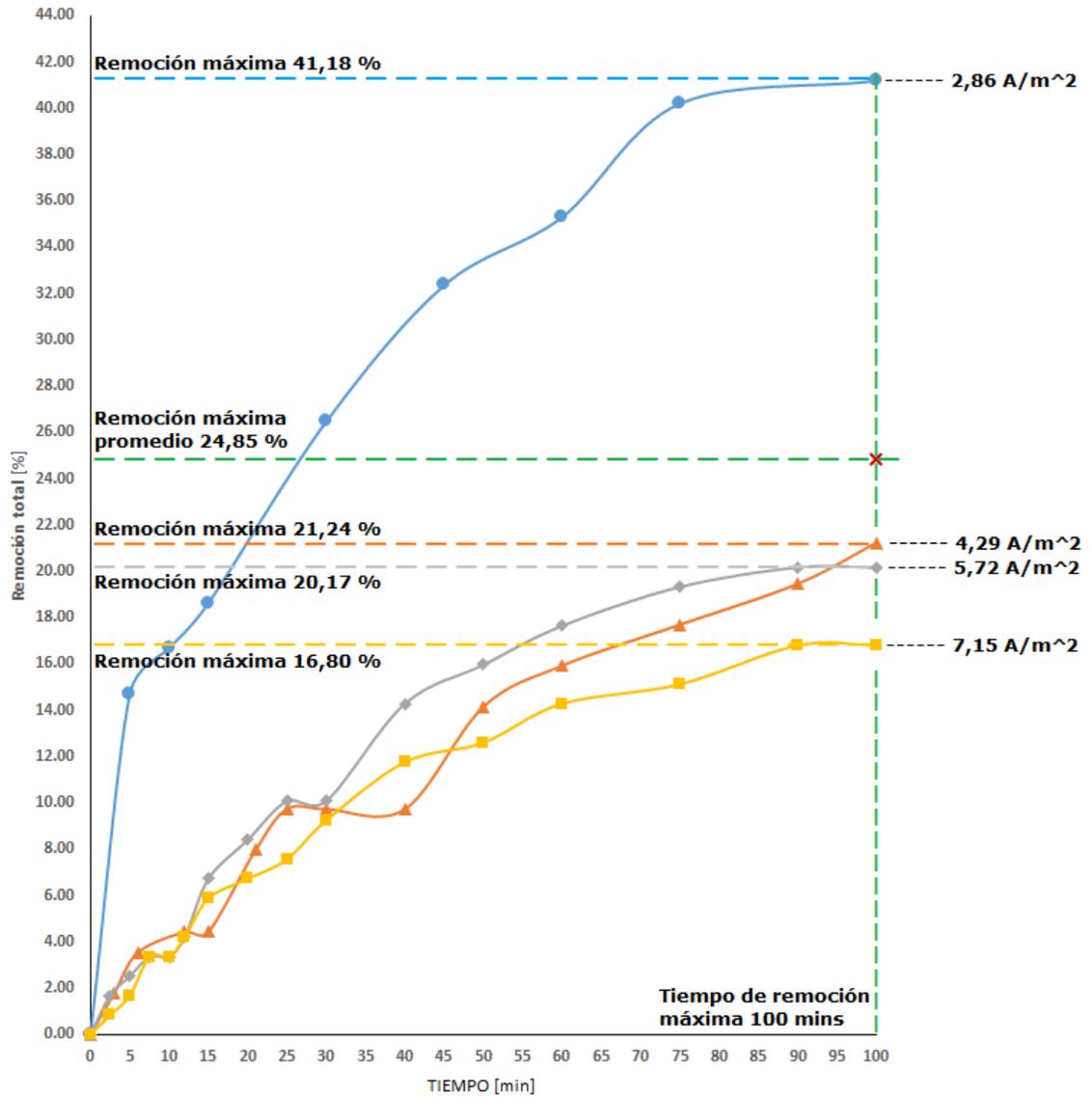
Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 3.

Figura 19. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente graficada en la Figura 18



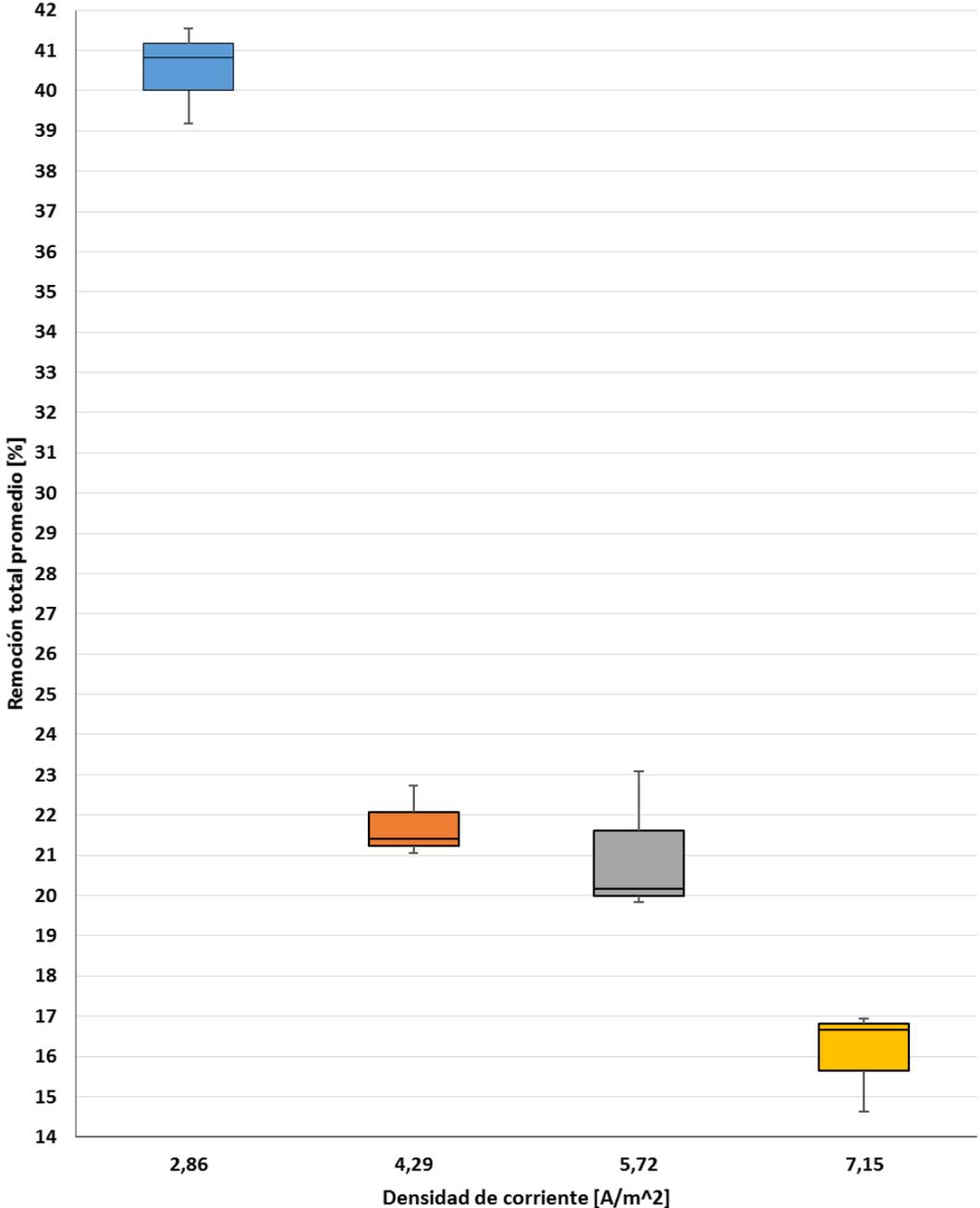
Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 4.

Figura 20. Remoción total promedio en función del tiempo a flujo volumétrico constante (300 mL min^{-1}) con absorbancia inicial baja ($\text{ABS} = 0,102 - 0,119$; $\lambda = 680 \text{ nm}$)



Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 5.

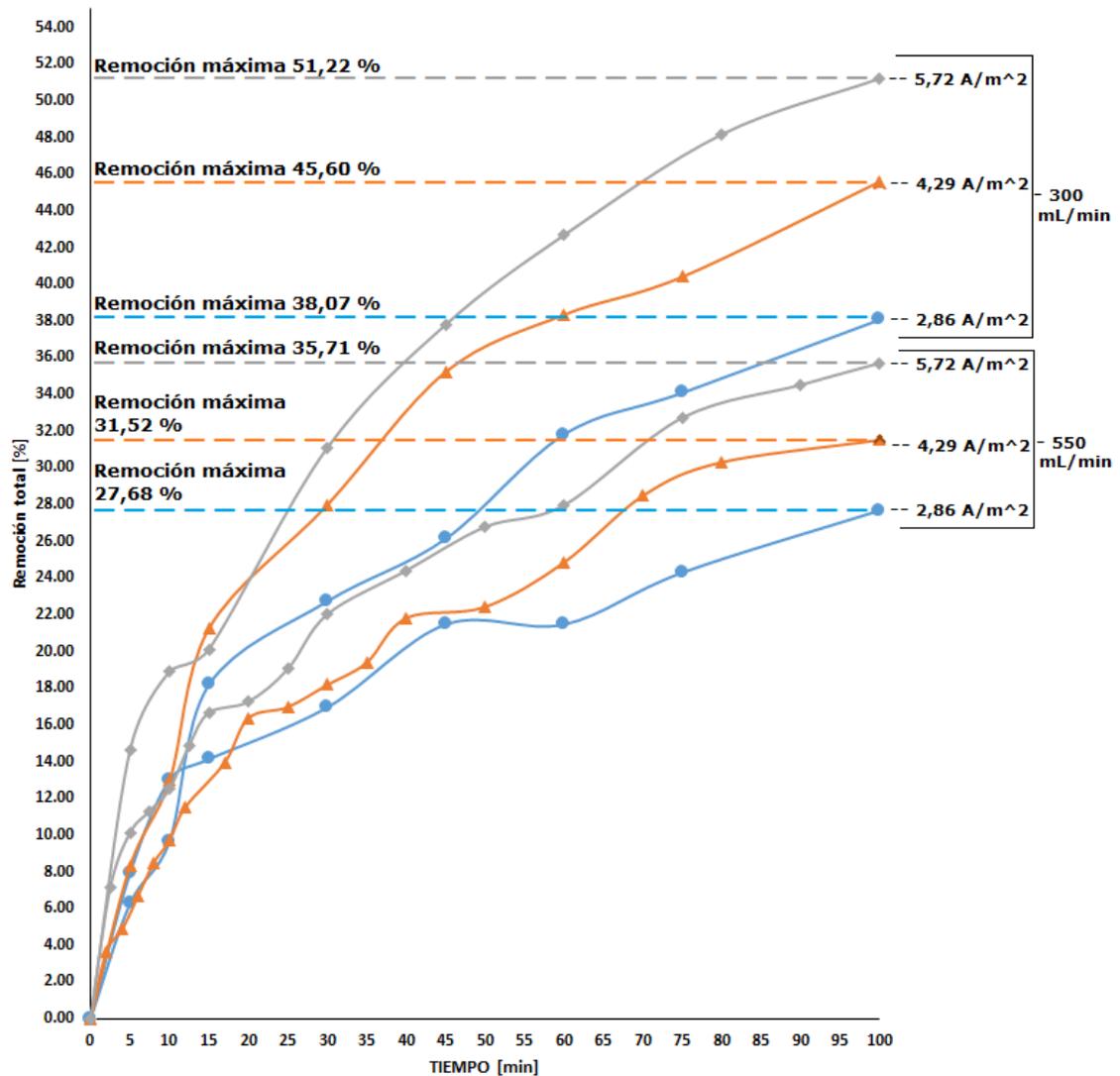
Figura 21. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente graficada en la Figura 20



Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 6.

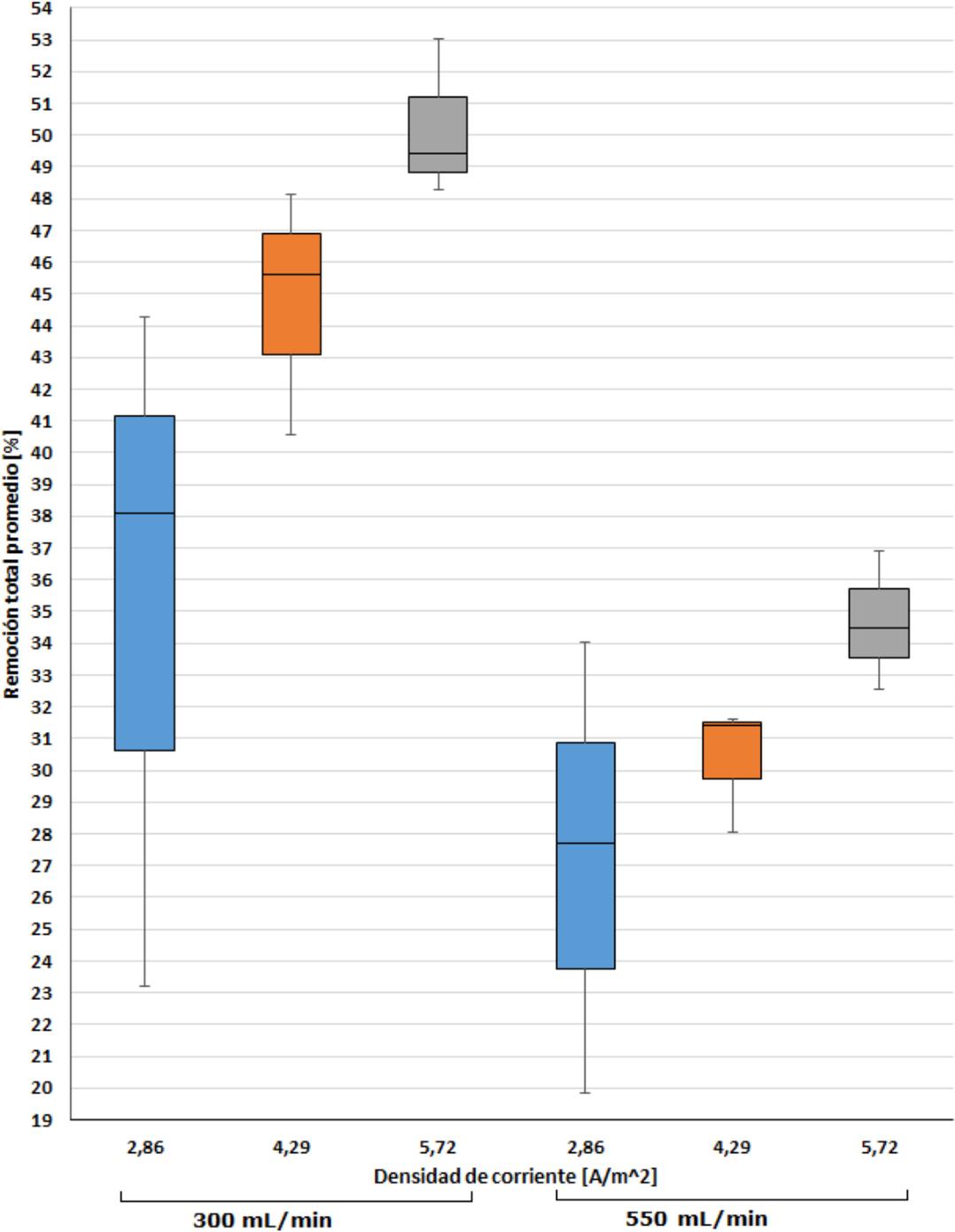
4.3. Efecto sobre el porcentaje de remoción total a diferentes condiciones de densidad de corriente y flujo volumétrico

Figura 22. Remoción total promedio para absorbancia inicial alta en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y flujo volumétrico



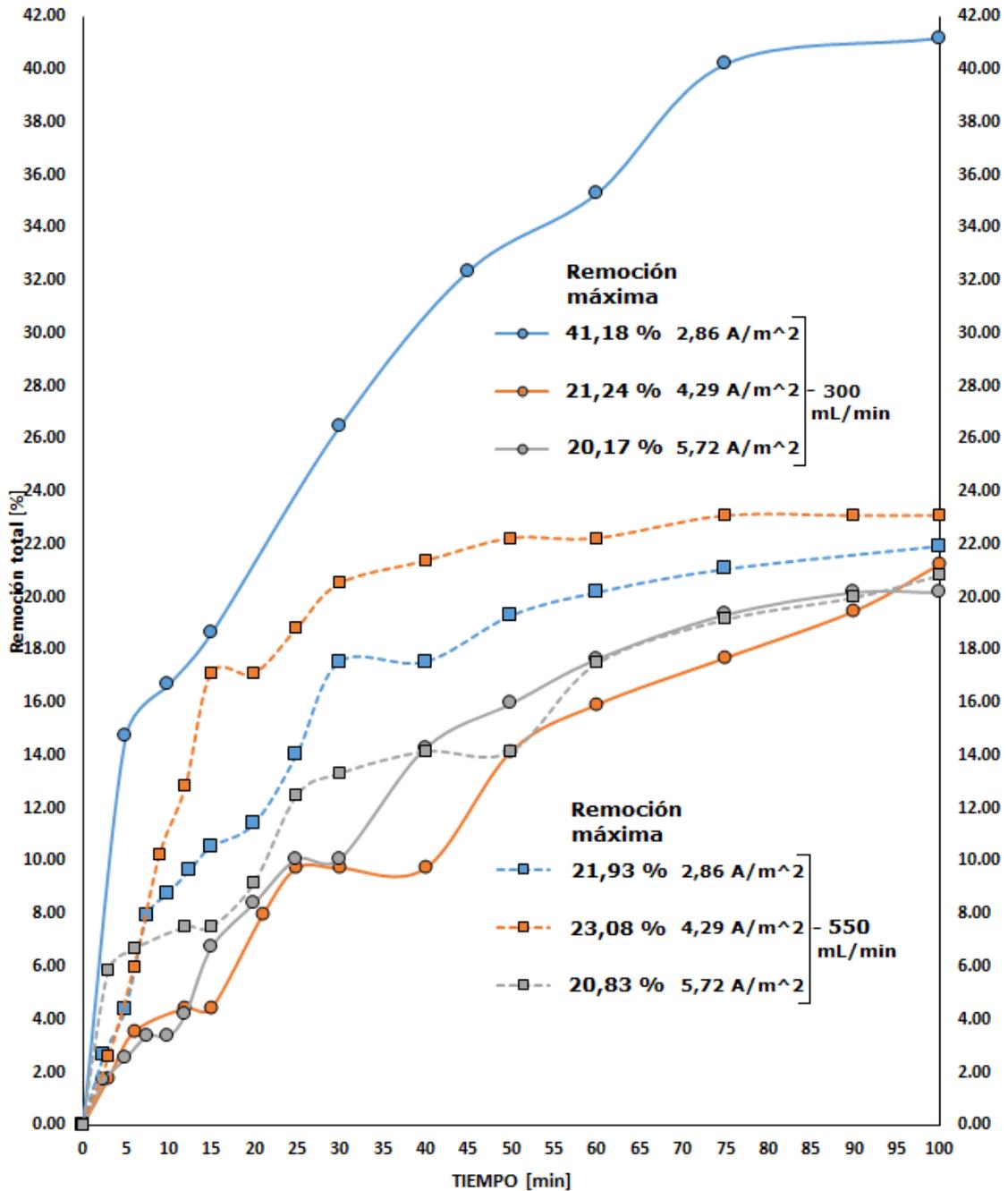
Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 7.

Figura 23. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a flujo volumétrico de 300 y 550 mL min⁻¹, graficados en la Figura 22



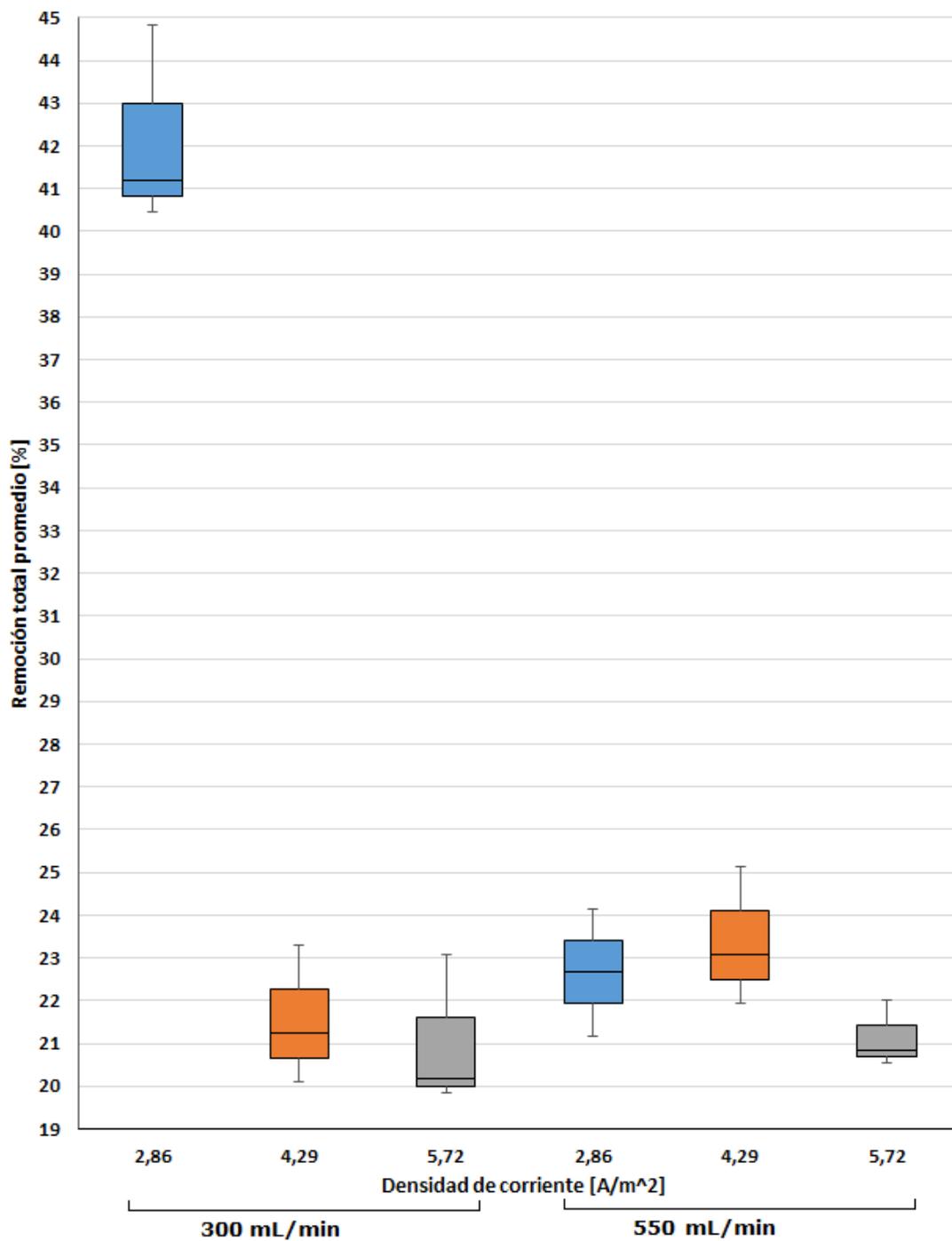
Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 8.

Figura 24. Remoción total promedio para absorbancia inicial baja en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y flujo volumétrico



Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 9.

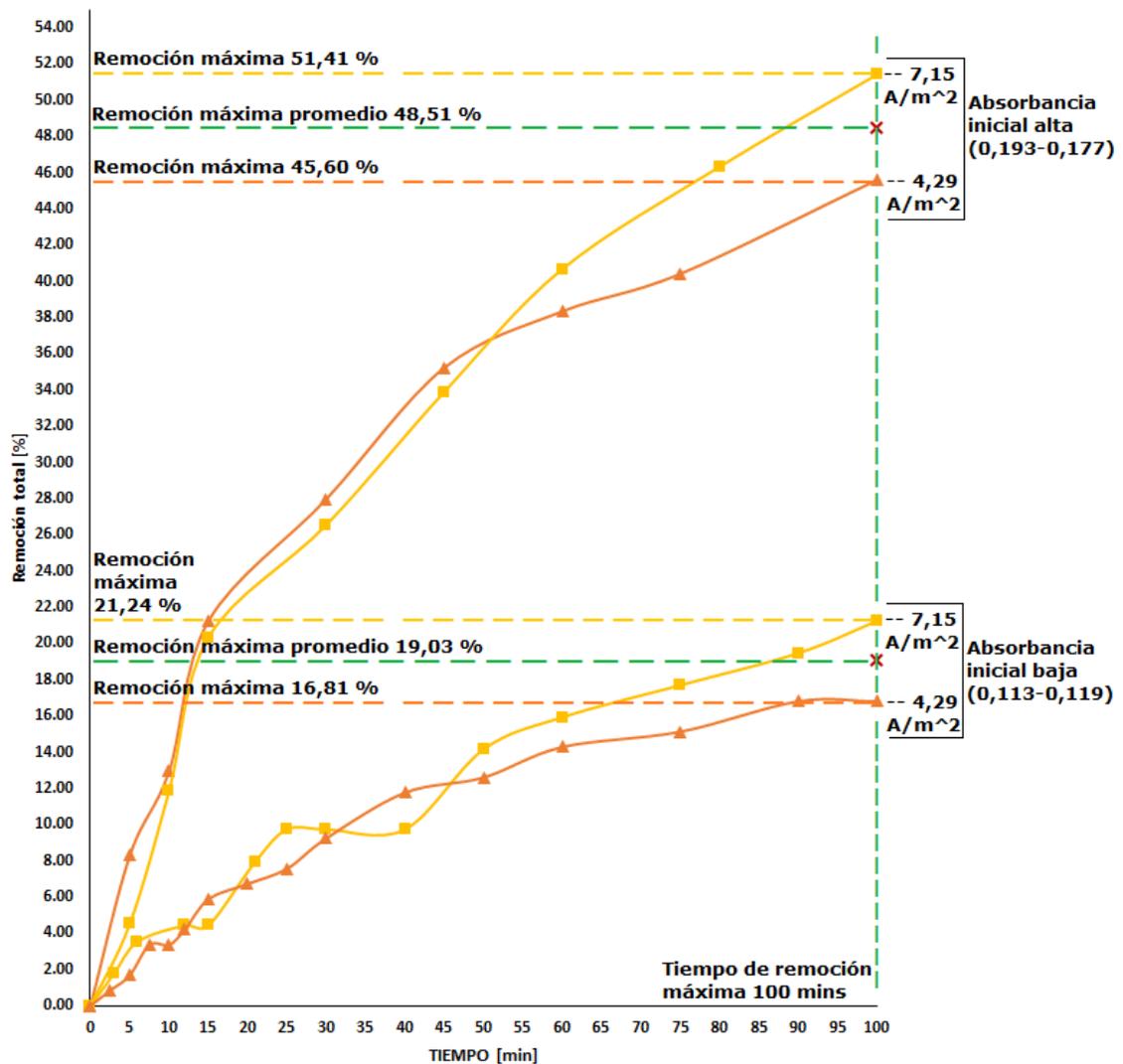
Figura 25. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a flujo volumétrico de 300 y 550 mL min⁻¹, graficados en la Figura 24



Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 10.

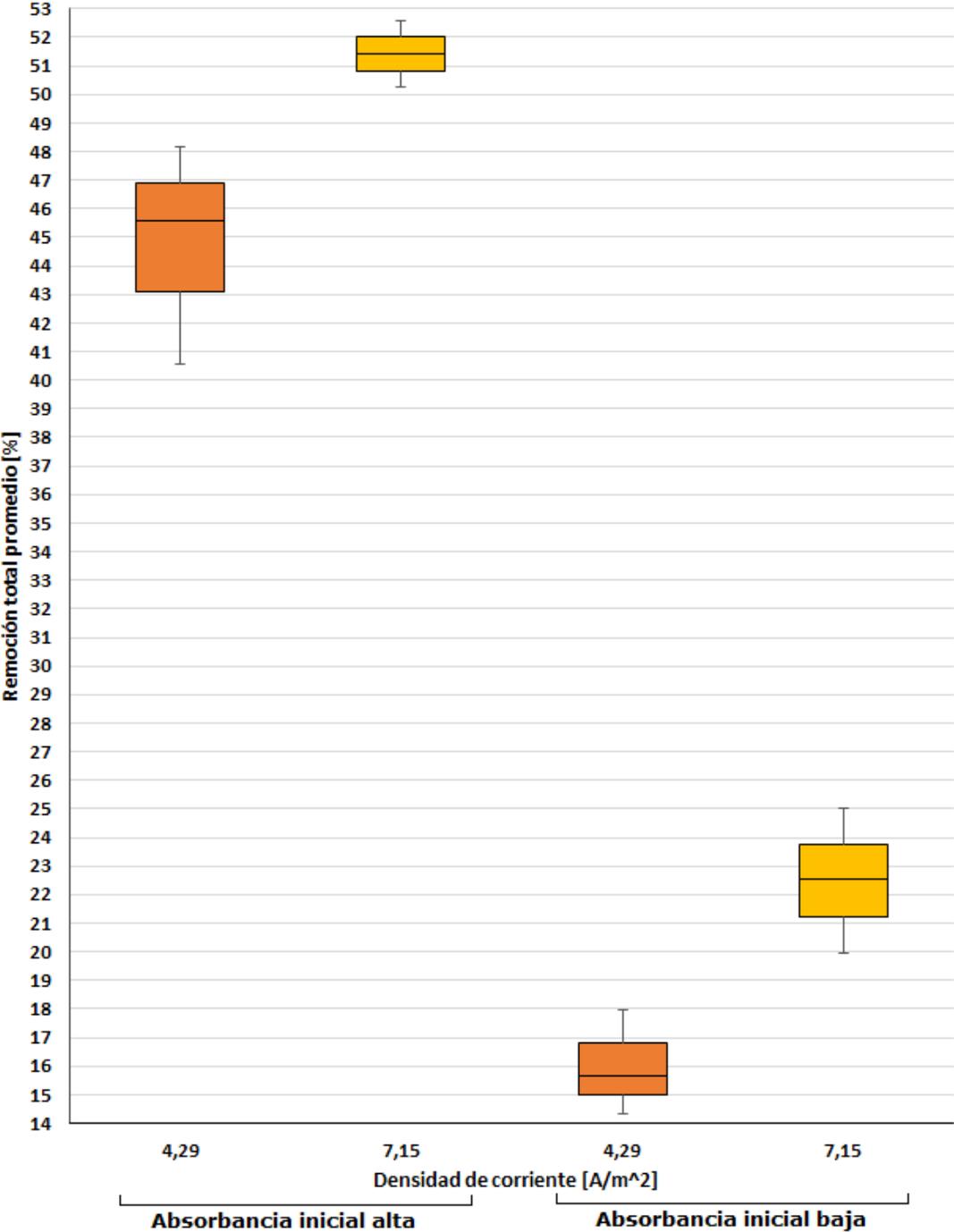
4.4. Efecto de la transmitancia inicial sobre el porcentaje de remoción total a diferentes condiciones de densidad de corriente y flujo volumétrico

Figura 26. Remoción total promedio en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y absorbancia inicial ($\lambda = 680 \text{ nm}$), con flujo volumétrico constante (300 mL min^{-1})



Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 11.

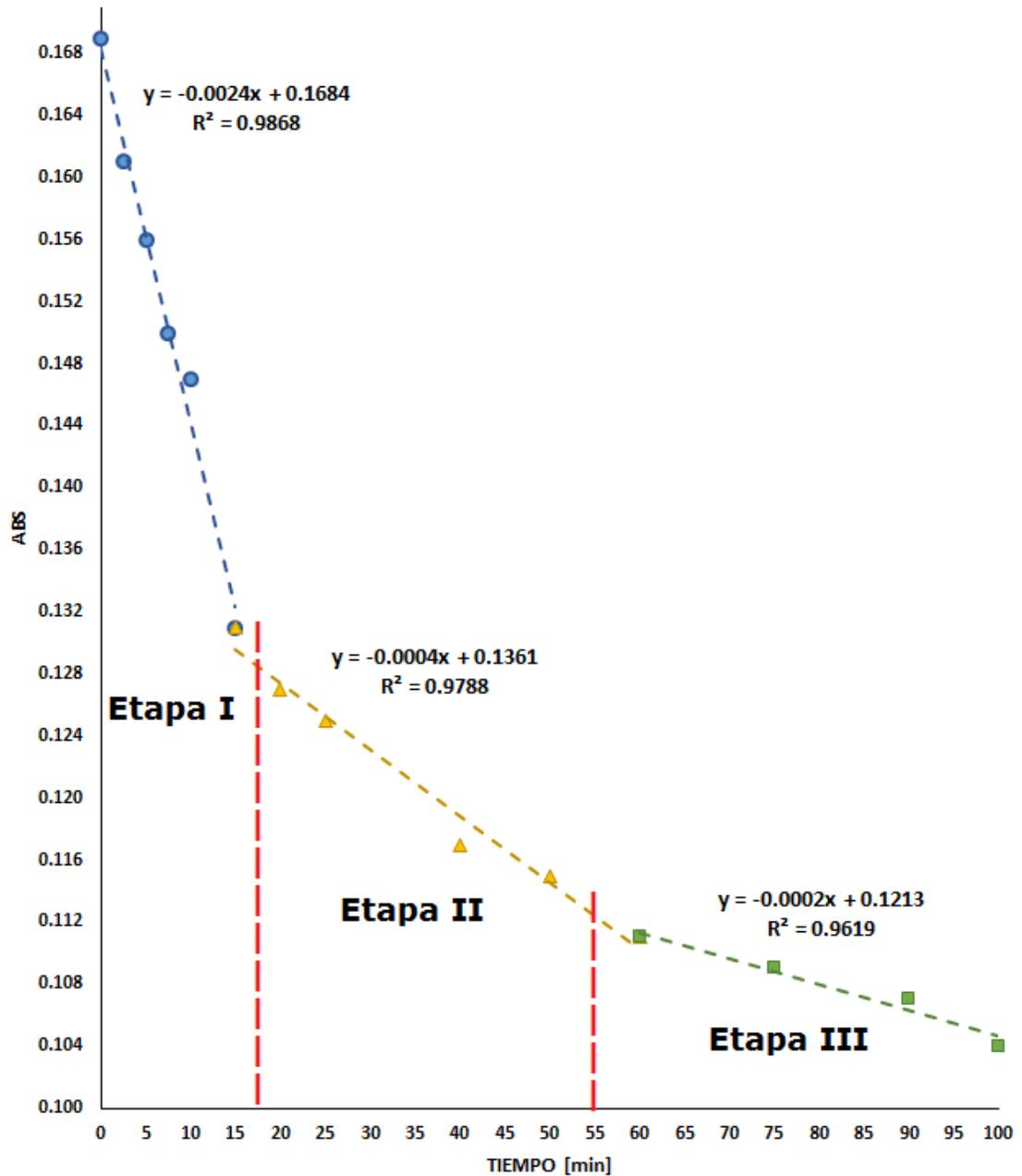
Figura 27. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a Absorbancia Inicial Alta y Baja, graficadas en la Figura 26



Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 12.

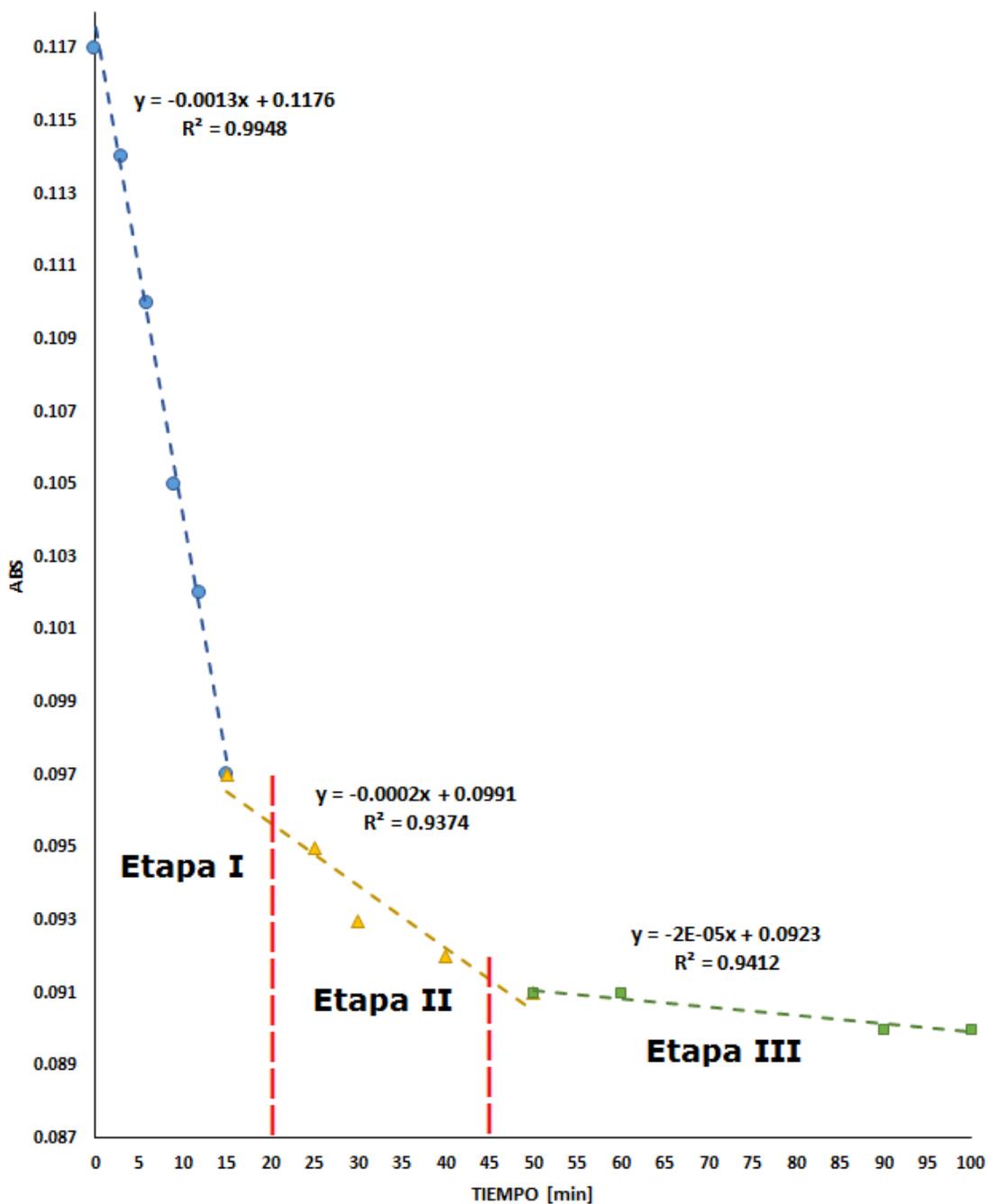
4.5. Comportamiento de la absorbancia respecto a la duración del tratamiento aplicado

Figura 28. Absorbancia en función del tiempo con absorbancia inicial alta
(ABS = 0,169; $\lambda = 680 \text{ nm}$; $Q = 550 \text{ mL min}^{-1}$; $\rho_i = 7,15 \text{ A m}^{-2}$)



Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 13.

Figura 29. Absorbancia en función del tiempo con absorbancia inicial baja
 (ABS = 0,117; $\lambda = 680 \text{ nm}$; $Q = 550 \text{ mL min}^{-1}$; $\rho_i = 4,29 \text{ A m}^{-2}$)



Fuente: elaboración propia, ver tabla de datos en apéndice 14.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con el objetivo general, se logró alcanzar la oxidación constitutiva de los componentes del alga *C. vulgaris* mediante la utilización efectiva del reactor electrolítico de lecho fijo adaptado y construido.

En relación con el objetivo específico 1, la adaptación y construcción del reactor electrolítico continuo logró llevarse a cabo para ejecutar el proyecto como se observa en las Figuras 14 a 17 y Diagramas 11 a 13. Para ello, primero, se procedió a barrenar el tubo y los tapones de PVC; al tubo de PVC se le hicieron dos orificios a lo largo del tubo a cada 5 cm para la salida de los hilos de acero inoxidable, a cada tapón horadado por el centro se le acoplaron los conectores de bronce a presión y se agregó suficiente gel de silicón para descartar fugas (Figura 16). Los adaptadores fueron pegados al tubo, en la rosca se colocó cinta de teflón y se colocó el tapón inferior del reactor (Figuras 15 y 17).

Se colocó aleatoriamente empaques de tipo anillos Raschig (Ver anexos, Figuras 30 y 31) hasta alcanzar una altura de 5 cm. Luego, se colocó el ánodo de lana de acero inoxidable previamente pesado (7,935 g; 0,035 m²) sacando el hilo de acero inoxidable por el orificio ubicado a 5 cm de altura del tubo PVC. A cada electrodo se le amarró un hilo de acero inoxidable trenzado y se verificó mediante el multímetro Truper que toda la superficie de los electrodos tuviera contacto con el extremo libre del hilo al cual se le conectarían los lagartos provenientes de la fuente de poder (Eventek KPS305).

Sobre el ánodo se colocó una capa al azar de empaques tipo anillos en espiral (Ver anexos, Figuras 32 y 33) de aproximadamente 0,5 cm de altura (3 vueltas) para la separación de electrodos. Luego, se colocó el cátodo de lana de acero inoxidable (7,904 g; 0,035 m²) y se sacó el hilo de acero inoxidable amarrado a él, por el orificio ubicado a 10 cm de altura del tubo PVC.

Se verificó, mediante el uso del multímetro Truper, que no existiera contacto entre los dos electrodos, para evitar un corto circuito al pasar corriente eléctrica a los electrodos.

Se colocaron empaques tipo anillos Raschig por encima del cátodo hasta llenar todo el reactor y se colocó el tapón superior.

Finalmente, para asegurar que el reactor no tuviera fugas se conectó todo el sistema (Ver Figura 13. Esquema de fase experimental), sin encender la fuente de poder, colocando agua destilada en el reservorio, se encendió la bomba peristáltica haciendo fluir agua continuamente. Al observar fugas se agregó gel de silicón el cual se dejó secar y endurecer durante 24 horas. Se volvió a realizar la prueba con agua destilada hasta determinar la inexistencia de fugas.

Antes de iniciar cada prueba experimental se comprobó que no existiera contacto entre los electrodos ni taponamiento en las mangueras ni en el reactor.

Además, el reactor trabajó con estabilidad durante los 17 días de experimentación.

Para determinar el efecto que tienen las variables de transmitancia inicial, densidad de corriente y flujo volumétrico sobre el tratamiento de electrolisis que

se le aplicó al electrolito, los resultados se analizaron gráficamente y se comprobaron de manera estadística.

En relación al objetivo específico 2, para analizar el efecto de la densidad de corriente sobre el tratamiento electroquímico se caracterizó la remoción total, expresada como porcentaje, en función del tiempo a flujo volumétrico constante (550 mL min^{-1}). Se obtuvieron dos gráficas, una para la transmitancia inicial alta (T_{0A}) y otra para la transmitancia inicial baja (T_{0B}) (Figuras 18 y 20 respectivamente). El porcentaje de remoción total se utiliza como variable de caracterización debido a que permite cuantificar en porcentajes el rendimiento del tratamiento aplicado.

De la figura 18 se puede constatar que la remoción máxima alcanzada por las 4 densidades de corriente es superior al 26%, notando que la curva con la máxima densidad de corriente aplicada ($7,15 \text{ A m}^{-2}$, curva amarilla), al final del tratamiento (tiempo de remoción máxima, 100 min) alcanza un porcentaje máximo de remoción del 38,46 %. No así para la curva con la menor densidad de corriente ($2,86 \text{ A m}^{-2}$, curva azul) que, al final del tratamiento, alcanza un porcentaje máximo de remoción del 27,68%. El análisis de varianza (ANOVA) de 1 factor realizado (Apéndice 3) demuestra que **existe diferencia significativa entre los tratamientos aplicados**.

También se realizó un diagrama de cajas (Figura 19). Para ello, se tomaron en cuenta los valores de las 3 repeticiones realizadas para cada tratamiento en el tiempo de remoción máxima (100 min) a cada densidad de corriente graficada en la Figura 18. El ANOVA de 1 factor realizado para dichos datos demuestra que **no existe diferencia significativa entre las 3 repeticiones de los tratamientos realizados a ese tiempo**.

Por lo tanto la remoción total, para las condiciones de la Figura 18, es directamente proporcional a la densidad de corriente aplicada al sistema electroquímico utilizado, en el rango de [2,86; 7,15] A m⁻².

En las pruebas realizadas con una transmitancia inicial baja (Figura 20) el comportamiento es inverso al de la Figura 18, ya que la curva con la menor densidad de corriente (2,86 A m⁻², curva azul) es la que alcanza el mayor porcentaje de remoción total (41,18 %), teniendo en cuenta que esta fue la primera prueba realizada (día 1) en la fase experimental, la cual duró un aproximado de 17 días. Las demás curvas que alcanzan un porcentaje máximo de remoción entre el 16,80 y 21,24 % se realizaron en los días 16 y 17 por lo cual el comportamiento observado en la Figura 20 se atribuye a la pérdida de efectividad de los electrodos de acero inoxidable utilizados. La pérdida de efectividad sucede por la ruptura de los electrodos, al ensuciamiento o deposición de alga observada en los electrodos al finalizar la experimentación y a la pérdida de lo inerte de los electrodos (oxidación de electrodos).

El ANOVA de un 1 factor realizado para la Figura 20 (Apéndice 5) muestra que **existe diferencia significativa entre los tratamientos realizados.**

El diagrama de cajas (Figura 21) y el ANOVA de 1 factor (Apéndice 6) realizado para las repeticiones a un tiempo de 100 min de los tratamientos representados en la Figura 20 muestran que **no existe diferencia significativa entre los datos obtenidos en las tres repeticiones realizadas de cada tratamiento a dicho tiempo.**

Para el objetivo específico 3, sobre el efecto del flujo volumétrico en el porcentaje de remoción total a absorbancia inicial alta, se obtuvo la Figura 22. En ella se muestran 2 grupos de curvas a 3 diferentes densidades de corriente

(2,86; 4,29 y 5,72 A m⁻²) para 2 flujos volumétricos seleccionados (300 y 550 mL min⁻¹).

La Figura 22 caracteriza el porcentaje de remoción en función del tiempo. Al analizar los datos se observa que las curvas con el flujo volumétrico menor (300 mL min⁻¹) alcanzan mayores porcentajes de remoción total (entre 38,07 y 51,22%), que aquellas que se realizaron con el flujo volumétrico máximo trabajado de 550 mL min⁻¹, 27,68 a 35,71 %. Esto lo confirman los ANOVA de 1 y 2 factores realizados (Apéndice 7). Estos demuestran que **existe diferencia significativa entre los datos a 300 y 550 mL min⁻¹**.

Un diagrama de cajas (Figura 23) y ANOVA de 1 y 2 factores realizados **para los datos de las 3 repeticiones realizadas de los tratamientos en el tiempo 100 min reafirman que existe diferencia significativa entre los datos a 300 y 550 mL min⁻¹**.

En relación al efecto del flujo volumétrico en el porcentaje de remoción total para tratamientos con absorbancia inicial baja, la Figura 24 muestra que **no diferencia significativa entre los datos** (Apéndice 9). Se observa que el tratamiento a 300 mL min⁻¹ y 2,86 A m⁻² que se desvía de todos los demás tratamientos. De esta manera se afirma lo discutido respecto a la Figura 20, en la cual, al inicio de la experimentación, el sistema logró una mayor remoción a dichas condiciones y conforme se realizaron los tratamientos, los electrodos fueron perdiendo su capacidad de remoción.

Al realizar un diagrama de cajas (Figura 25) sobre los datos a 100 min de las 3 repeticiones de los tratamientos graficados en la Figura 24 se obtuvieron valores estadísticos que indican que **no existe diferencia significativa entre dichos datos** (Apéndice 10).

La mayor remoción a menor flujo volumétrico se debe a que permite un mayor tiempo de contacto entre el electrodo y el electrolito, haciendo más efectiva la acción del flujo eléctrico aplicado. La efectividad de la remoción total es entonces inversamente proporcional al flujo volumétrico aplicado.

Respecto al objetivo específico 4, para analizar el efecto de la transmitancia inicial en el tratamiento electroquímico estudiado, se caracterizaron curvas a caudal constante (300 mL min^{-1}) con variación de transmitancia inicial y densidad de corriente (Figura 26).

Analizando dicha gráfica se aprecia que las curvas correspondientes a las pruebas realizadas con transmitancia inicial alta (Absorbancia [0,193; 0,177]) logran un mayor porcentaje de remoción total (45,60 a 51,41 %) que aquellas que se realizaron con transmitancia inicial baja (16,81 a 21,24 %, absorbancia [0,113; 0,119]). Confirmado por los ANOVA de 1 y 2 factores (Apéndice 11) que demuestran que **la absorbancia inicial y la densidad de corriente tienen efecto significativo en el porcentaje de remoción total alcanzado.**

Para el diagrama de cajas realizado (Figura 27) y las 3 repeticiones de los tratamientos aplicados al minuto 100, los ANOVA de 1 y 2 factores (Apéndice 12) demuestran que a ese tiempo solo **la absorbancia inicial tiene efecto significativo en el porcentaje de remoción total.**

Durante la caracterización de los resultados se observó un comportamiento en común entre todos los tratamientos realizados al graficar la absorbancia respecto al tiempo, por ello se describe a continuación el mecanismo mediante el cual se cree que el tratamiento electroquímico procede para la oxidación constitutiva de alga.

Para ello se caracterizaron las Figuras 28 y 29, una para transmitancia inicial alta y otra para transmitancia inicial baja. En ambas figuras se muestran las 3 etapas del perfil de decaimiento de absorbancia a través del tiempo.

En la primera etapa la célula de *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.) se encuentra completa por lo que será más fácil de agrietar. Al comenzar el tratamiento y aplicar la densidad de corriente, la célula comienza a destruirse y a colapsar dejando escapar los cloroplastos que contienen la clorofila-a. Dado que el núcleo de la clorofila es tetracíclica y tiene muchos enlaces dobles, se sospecha que es ahí donde inciden los electrones excitados por la energía aplicada para la destrucción de la misma. La ubicación de los cloroplastos en la célula del alga también es un factor importante ya que se encuentran alrededor de la membrana celular por lo que están más expuestos a la destrucción al aplicar el tratamiento. Esta etapa dura de 15 a 20 minutos y se caracteriza por ser una etapa de velocidad constante durante la cual ocurre la destrucción más efectiva. La velocidad de remoción para las Figuras 28 y 29 durante esta etapa fue de $2,4E-03$ y $1,3E-03$ % min^{-1} respectivamente.

Durante la segunda etapa la velocidad de remoción disminuye, se cree que es debido a que los cloroplastos fragmentados enmascaran células de *Chlorella vulgaris* (Beyerinck, M.W.) y esta no se encuentra en una posición efectiva para la remoción. Además, es posible que se traslapen entre ellas con lo cual disminuye la efectividad del tratamiento. Esta etapa es de transición y dura alrededor de 40 minutos. La velocidad de remoción para las Figuras 28 y 29 durante esta etapa fue de $0,4E-03$ y $0,2E-03$ % min^{-1} respectivamente.

La tercera etapa se caracteriza por alcanzar la remoción máxima posible del tratamiento donde la de velocidad de remoción tenderá a 0, por lo que no se recomienda continuar con el tratamiento porque deja de ser efectivo. Ya que las

mediciones se realizaron mediante espectrofotometría, la absorbancia es un reflejo del color del cloroplasto y en esta etapa ya no cambia porque la clorofila ha sido destruida hasta partículas diminutas. El electrolito contendrá algún porcentaje de cloroplastos sin destruir por lo que se considera al tratamiento estudiado como un pre-tratamiento efectivo y no un tratamiento total.

La velocidad de remoción para las Figuras 28 y 29, durante esta etapa fue de $0,2E-03$ y $2,0E-05$ % min^{-1} respectivamente. Aproximadamente esta etapa inicia luego de 60 minutos de tratamiento.

La marcada disminución de velocidad de remoción durante el tratamiento demuestra la existencia de las 3 etapas del tratamiento, siendo la etapa I, durante los primeros 20 min del tratamiento de oxidación electrolítica, la más efectiva.

CONCLUSIONES

1. La construcción y adaptación del reactor electrolítico de lecho fijo para la oxidación constitutiva del alga *Chlorella vulgaris* logró realizarse con efectividad.

2. El tratamiento electrolítico para una transmitancia inicial alta [0,165; 0,177], se logró, dentro del rango de flujo volumétrico [300, 550 mL min⁻¹], en forma positiva, logrando oxidaciones más efectivas cuando la densidad de corriente directa era máxima en el rango de [2,86; 7,15 A m⁻²]. Se encontró, inclusive, diferencia significativa en las variaciones de datos.

3. El tratamiento electrolítico para una transmitancia inicial baja [0,102; 0,119], se logró, dentro del rango de flujo volumétrico [300, 550 mL min⁻¹] y densidad de corriente directa [2,86; 7,15 A m⁻²], en forma positiva. Se encontró que no existe diferencia significativa en las variaciones de datos.

4. El tratamiento electrolítico para una transmitancia inicial alta [0,165; 0,193], se logró, dentro del rango de densidad de corriente directa [2,86; 7,15 A m⁻²], en forma positiva, logrando oxidaciones más efectivas cuando el flujo volumétrico era mínimo en el rango de [300, 550 mL min⁻¹]. Se encontró, inclusive, diferencia significativa en las variaciones de datos.

5. El tratamiento electrolítico para una transmitancia inicial baja [0,102; 0,120], se logró, dentro del rango de flujo volumétrico [300, 550 mL min⁻¹] y densidad de corriente directa [2,86; 7,15 A m⁻²], en forma positiva.

Encontrándose que no existe diferencia significativa en las variaciones de datos.

6. Para las condiciones de operación del reactor electrolítico, flujo volumétrico [300 mL min^{-1}] y densidad de corriente directa [$4,29; 7,15 \text{ A m}^{-2}$], se lograron oxidaciones más efectivas cuando la transmitancia inicial era alta [$0,177; 0,193$]. Se encontró, inclusive, diferencia significativa en las variaciones de datos.

7. Se comprobó que el mecanismo del tratamiento electrolítico de oxidación constitutiva del alga *Chlorella vulgaris* ocurre en tres etapas, durante los tratamientos aplicados a absorbancia inicial alta y baja.

8. Se comprobó que la oxidación electrolítica más efectiva ocurre durante la etapa I, en los primeros 20 min del tratamiento aplicado.

RECOMENDACIONES

1. Construir un reactor de material transparente o cámara visible de electrodos para verificar la evolución del proceso oxidativo.
2. Utilizar electrodos de acero inoxidable de mejor calidad y resistencia.
3. Sustituir la lana utilizada por lana de acero inoxidable de cedula mayor a 304 como electrodos de un material de mejor calidad por el carbono aleante.
4. Mejorar la geometría de los electrodos utilizados.
5. Verificar, paralelamente a la medición de la absorbancia, la destrucción de células del alga por microscopía.
6. Realizar el estudio del tratamiento electroquímico de oxidación constitutiva aplicado a la planta *Hydrilla Verticillata* (L.F.) Royle.

BIBLIOGRAFÍA

1. BERGMANN, M.E.H.; ROLLIN, J. *Product and by-product formation in laboratory studies on disinfection electrolysis of water using boron-doped diamond anodes*. Artículo científico. Catal. Today 124. 2007. 198–203 p.
2. BRADLEY, P.M. *Plant hormones do have a role in controlling growth and development of algae*. Artículo científico. J. Phycolo. 27, 1991. 317–321 p.
3. BROWN, T. L.; LEMAY; BURSTEN. *Chemistry: the central science*. United States of America. 11th. edition. Pearson education. 2009.
4. CAMPINAS, M.; JOÃO, M. *Evaluation of cyanobacterial cells removal and lysis by ultrafiltration*. Artículo científico. Sep. Purif. Technol. 70, 2010. 345–353 p.
5. CAÑIZARES, P.; SÁEZ, C.; LOBATO, J.; RODRIGO, M.A. *Electrochemical treatment of 2, 4-dinitrophenol aqueous wastes using boron-doped diamond anodes*. Artículo científico. Electrochim Acta 49, 2004. 4641–4650 p.
6. CARMICHAEL, W.W.; BOYER, G. *Health impacts from cyanobacteria harmful algae blooms: Implications for the North American Great Lakes*. Artículo científico. United States. Harmful Algae 54, 2016. 194 – 212 p.

7. CHANDRA, S.; DIX, M.; REJMÁNKOVÁ, E.; MOSQUERA, V.; GIRÓN, N.; HEYVAERT, A. *El estado ecológico actual del lago atitlán y el impacto de las entradas de aguas residuales: recomendación para exportación de las aguas residuales de la cuenca para restaurar el lago*. Artículo científico. USAID. University of Nevada. UVG. URL. DRI. 2013.
8. CHORUS, I.; BARTRAM, J. (Eds.). *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. World Health Organization, EandFN Spon, Routledge, London. 1999.
9. CODD, G. A.; *Cyanobacterial toxins, the perception of water quality, and the prioritisation of eutrophication control*. Artículo científico. Ecological Engineering 16, 2000. 51–60 p.
10. DIX, M.; MEDINILLA, O. y CASTELLANOS, E. *Diagnóstico Ecológico-Social en la Cuenca de Atitlán*. Artículo científico. Publicado por Universidad del Valle de Guatemala/The Nature Conservancy, Guatemala. 2003.
11. DIX, M.; OCHAETA, G.; TOLEDO, A.; DIX, M.; GARCÍA, O.; BOCEL, E.; JAVIER, P. *Florecimiento de cianobacteria en el lago Atitlán: cambios en composición y consecuencias potenciales*. Artículo científico. Asociación de amigos del lago de Atitlán. University of Nevada. UVG. URL. DRI. 2015.

12. DREES, K.P.; ABBASZADEGAN, M.; MAIER, R.M. *Comparative electrochemical inactivation of bacteria and bacteriophage*. Artículo científico. *Water Res.* 37, 2003. 2291–2300 p.
13. Enciclopedia colaborativa en la red cubana. *Chlorella Vulgaris*. Cuba. [en línea] <https://www.ecured.cu/Chlorella_Vulgaris>. 2016.
14. FUNARI, E.; TESTAI, E. *Human health risk assessment related to cyanotoxins exposure*. *Crit. Rev. Toxicol.* 38 (2), 2008. 97–125 p.
15. GHERNAOUT, B.; GHERNAOUT, D.; SAIBA, A.; *Algae and cyanotoxins removal by coagulation/flocculation: a review*. Artículo científico. *Desalin. Water Treat.* 20, 2010. 133–143 p.
16. JOCHIMSEN, E.M.; CARMICHAEL, W.W.; AN, J.S.; CARDO, D.M.; COOKSON, S.T.; HOLMES, C.E.M.; ANTUNES, M.B.; FILHO, D.A.; DE MELO, L.; BURRETO, V.S.T.; AZEVEDO, S.M.F.O.; JARVIS, W.R. *Liver failure and death following exposure to microcystins at a hemodialysis center in Brazil*. Artículo científico. *N. Eng. J. Med.* 338 (13). 1998. 873 – 878 p.
17. JOQUERA, M. A.; VALENCIA, G.; EGUCHI, M.; KATAYOSE, M.; RIQUELME, C. *Desinfection of seawater for hatchery aquaculture systems using electrolytic water treatment*. Artículo científico. *Japan. Aquaculture* 207, 2002. 213 – 224 p.
18. JUNG, Y.; YOON, Y.; HONG, E.; KWON, M.; KANG, J. *Inactivation characteristics of ozone and electrolysis process for ballast water*

treatment using B. subtilis spores as a probe. Artículo científico. Marine Pollution Bulletin. V. 72, Issue 1, 2013. 71-79 p.

19. KATAYOSE, M.; YOSHIDA, K.; ACHIWA, N.; EGUCHI, M. *Safety of electrolyzed seawater for use in aquaculture*. Artículo científico. Japan. Aquaculture 264, 2007. 119 – 129 p.
20. KUHL, A. & LORENZEN, H. *Handling and culturing of Chlorella*. London. Preston, D.M. (ed.): Methods of cell physiology, 1964. Vol. 1: 159-187 p. Academic Press.
21. LAWTON, L.A.; CORNISH, B.J.P.A.; MACDONALD, A.W.R. *Removal of cyanobacterial toxins (microcystins) and cyanobacterial cells from drinking water using domestic water filters*. Artículo científico. Water Res. 32, 1998. 633–638 p.
22. LONG, Y.; NI, J.; WANG, Z. *Subcellular mechanism of Escherichia coli inactivation during electrochemical disinfection with boron-doped diamond anode: A comparative study of three electrolytes*. Artículo científico. Water Research. 84, 2015. 198–206 p.
23. LORIGA, Sonia. “Rimozione elettrochimica della *Chlorella vulgaris* con anodi di diamante conduttore”. Tesis de “Ingegneria chimica e dei processi biotecnologici”. En: Università’ Degli Studi Di Cagliari. Italia. 2015/2016.
24. MA, J.; LIU, W.; *Effectiveness and mechanism of potassium ferrate (VI) preoxidation for algae removal by coagulation*. Water Res. 36, 2002. 871–878 p.

25. MARSELLI, B.; GARCÍA, J.; MICHAUD, P.A.; RODRIGO, M.A.; COMNINELLIS, C.; *Electrogeneration of hydroxyl radicals on boron-doped diamond electrodes*. Artículo científico. J. Electrochem. Soc. 150, 2003. D79–D83 p.
26. MASCIA, M.; VACCA, A.; PALMAS, S.; POLCARO, A.M. *Kinetics of the electrochemical oxidation of organic compounds at BDD anodes: modeling of surface reactions*. Artículo científico. J. Appl. Electrochem. 37, 2007. 71–76 p.
27. MASCIA, M.; VACCA, A.; PALMAS, S. *Fixed bed reactors with three-dimensional electrodes for electrochemical treatment of waters for disinfection*. Artículo científico. Italy. Chem.Eng. J. 211–212, 2012. 479–487 p.
28. MASCIA, M.; VACCA, A.; PALMAS, S. *Electrochemical treatment as a pre-oxidative step for algae removal using *Chlorella vulgaris* as a model organism and BDD anodes*. Artículo científico. Italy. Chemical engineering journal 219, 2013. 512 – 519 p.
29. MASCIA, M.; MONASTERIO, S.; VACCA, A.; PALMAS, S. 2016. *Electrochemical treatment of water containing *Microcystis aeruginosa* in a fixed bed reactor with three-dimensional conductive diamond anodes*. Artículo científico. In: Univesita' degli studi di Cagliari. Publication: Journal of Hazardous Materials. 2016.
30. MONASTERIO, S.; DESSI, F.; MASCIA, M.; VACCA, A.; PALMAS, S. *Electrochemical removal of *Microcystis Aeruginosa* in a fixed bed*

reactor. Artículo científico. Italy. Chemical engineering transactions. Vol. 41. 2014.

31. NAGHAVI, B.; MALONE, R.F.; *Algae removal by fine sand/silt filtration*. Artículo científico. Water Res.20, 1986. 377–383 p.
32. NIKULIN, V.A. *Use of an electrolyzed sodium chloride solution for disinfection in therapeutic and prophylactic institutions*. Artículo científico. Russian. Sov. Med. 12, 1977. 105– 108 p.
33. OLIVA, B.; PÉREZ, J.; DEL CID, M.; GAITÁN, I. *Estudio de contaminantes ecotóxicos en agua y organismos acuáticos del Lago de Atitlán*. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC. AMSCLAE. DIGI. 2010.
34. ORSINI, Alessandro. “Biodegradazione di composti fenolici presenti nelle acque di scarico industriali mediante colture batteriche miste”. Tesis de: “Dottorato di ricerca in ingegneria industriale”. En: Università’ Degli Studi Di Cagliari. Italia. XVIII° Ciclo.
35. PAN, G.; ZHANG, M.M.; CHEN, H.; ZOU, H.; YAN, H. *Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. I. Equilibrium and kinetic screening on the flocculation of Microcystis aeruginosa using commercially available clays and minerals*. Artículo científico. Environ. Pollut. 141, 2006. 195–200 p.
36. POLCARO, A. M.; VACCA, A.; MASCIA, M.; FERRARA, S.; *Product and by-product formation in electrolysis of dilute chloride solutions*.

- Artículo científico. Italia. J. Appl. Electrochem. 38, 2008. 979–984 p.
37. POURIA, S.; ANDRADE, A.; BARBOSA, J.; CAVALCANTI, R.L.; BARRETO, V.S.T.; WARD, C.J.; PREISER, W.; POON, G.K.; NEILD, G.H.; CODD, G.A. *Fatal microcystin intoxication in haemodialysis unit in Caruaru*. Artículo científico. Brazil. Lancet 352, 1998. 21–26 p.
 38. SERRANO, K.; MICHAUD, P.A.; COMNINELLIS, C.; SAVALL, A. *Electrochemical preparation of peroxodisulfuric acid using boron doped diamond thin filmelectrodes*. Artículo científico. Electrochim. Acta 48, 2002. 431–436 p.
 39. TAAMA, W.M.; PLIMEY, E.R.; SCOTT, K. *Influence of supporting electrolyte on ferricyanide reduction at a rotating disc electrode*. Artículo científico. Electrochim. Acta 41, 1996. 549–551 p.
 40. TSUZUKI, K.; TANAKA, T.; TAKAGI, T.; SHIMOMURA, M. *Effects of electrochemical treatment on Microcystis extinction*. Artículo científico. Japan. J. Water Environ. Soc. 22, 1999. 228– 231 p.
 41. VANTE, Nicolás Alonso. *Electroquímica y electrocatálisis*. Argentina. Primera edición. 2003.
 42. WILK, I.J.; ALTMANN, R.S.; BERG, J.D. *Antimicrobial activity of electrolyzed saline solution*. Artículo científico. Sci. Total Environ. 63, 1987. 191–197 p.

43. XU, Y.; YANG, J.; OU, M.; WANG, Y.; JIA, J. *Study of Microcystis aeruginosa inhibition by electrochemical method*. Artículo científico. *Biochem. Eng. J.* 36, 2007. 215–220 p.

44. ZHAO, X.; ZHANG, Y. *Algae-removing and algicidal efficiencies of poly (diallyldimethylammonium chloride) composite coagulants in enhanced coagulation treatment of algae-containing raw water*. Artículo científico. *Chem. Eng. J.* 173, 2011. 164–170 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos

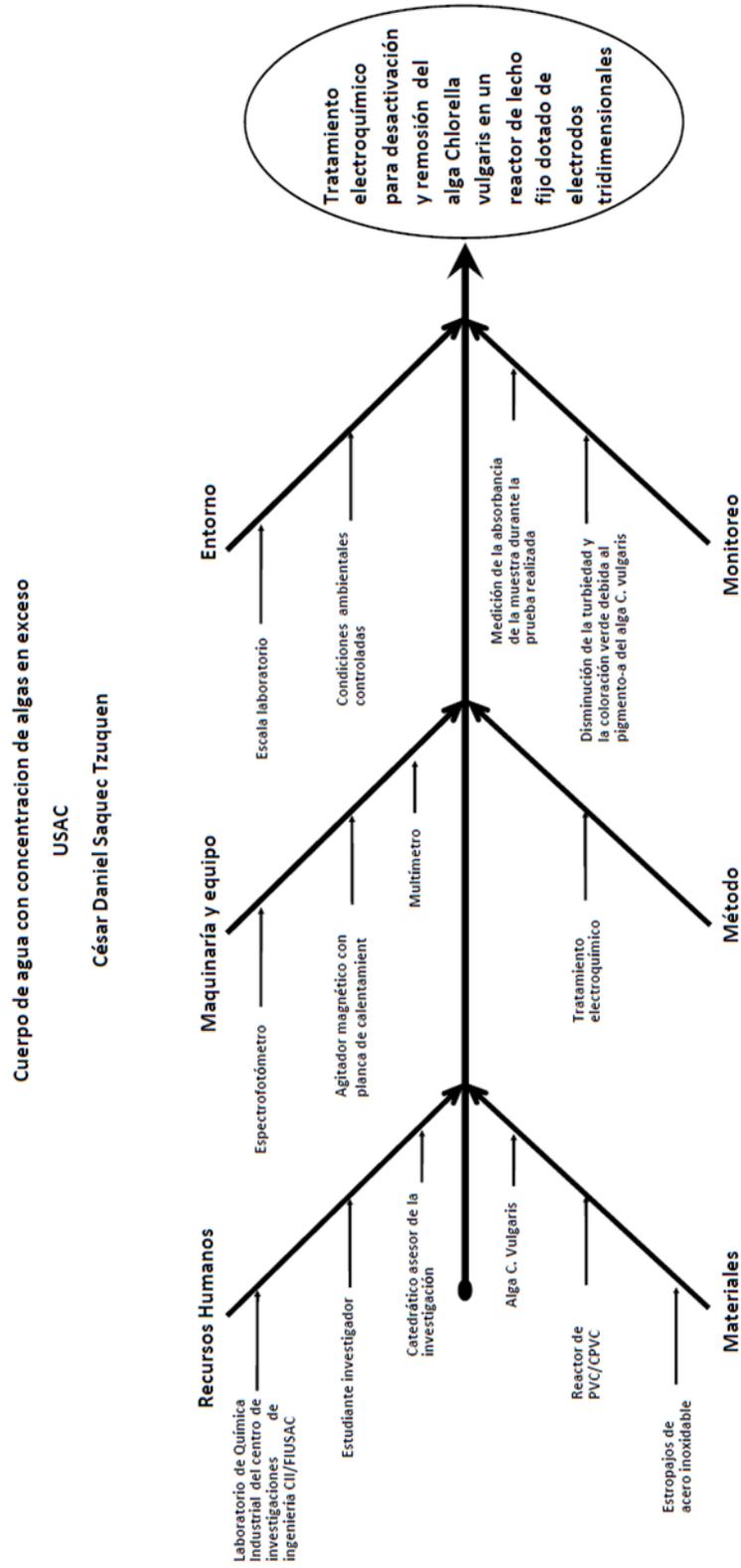
Carrera	Area	Curso	Unidad	Tema	Temas
Ingeniería química	Area de química	Química 3	Estequiometria	Reacciones químicas	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad • Propiedades de disoluciones • Oxido reducción
		Química 4	Electroquímica equilibrio redox	Equilibrio en solución acuosa.	<ul style="list-style-type: none"> • Fundamento y características de los potenciales normales • Potencial redox con la concentración
		Análisis cualitativo	Equilibrio heterogéneo	Equilibrio de solubilidad simple	<ul style="list-style-type: none"> • Solución saturada • Solución insaturada • Solución sobresaturada
		Análisis cuantitativo	Equilibrio iónico en un sistema redox	Sistemas redox dependientes	<ul style="list-style-type: none"> • Relación entre el agente reductor y agente oxidante
		Química ambiental	Saneamiento ambiental	Contaminación ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos ambientales • Eutrofización
		Control de contaminantes industriales	Medidas de control	Características biológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Microbiota • Algas
		Ecología	Conceptos de ecología	Recursos naturales de Guatemala	<ul style="list-style-type: none"> • Factores bióticos y abióticos
		Flujo de fluidos IQ-2	Conceptos y principios fundamentales	Caudal	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo másico • Flujo volumétrico
		Fisicoquímica 2	Electroquímica	Sistemas electroquímicos	<ul style="list-style-type: none"> • Celdas electroquímicas

Continuación Apéndice 1.

	Laboratorio de fisicoquímica 2	Práctica 6	Sistemas electroquímicos	Celdas galvánicas
Área complementaria	Microbiología	Microbiología fundamental	Algas	<ul style="list-style-type: none"> • Conceptos generales • Clasificación
	Estadística 2	Experimentos generales	Análisis de datos	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de varianza de un factor
	Ingeniería eléctrica 1	Conceptos fundamentales	Mediciones	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente • Voltaje • Resistencia

Fuente: elaboración propia.

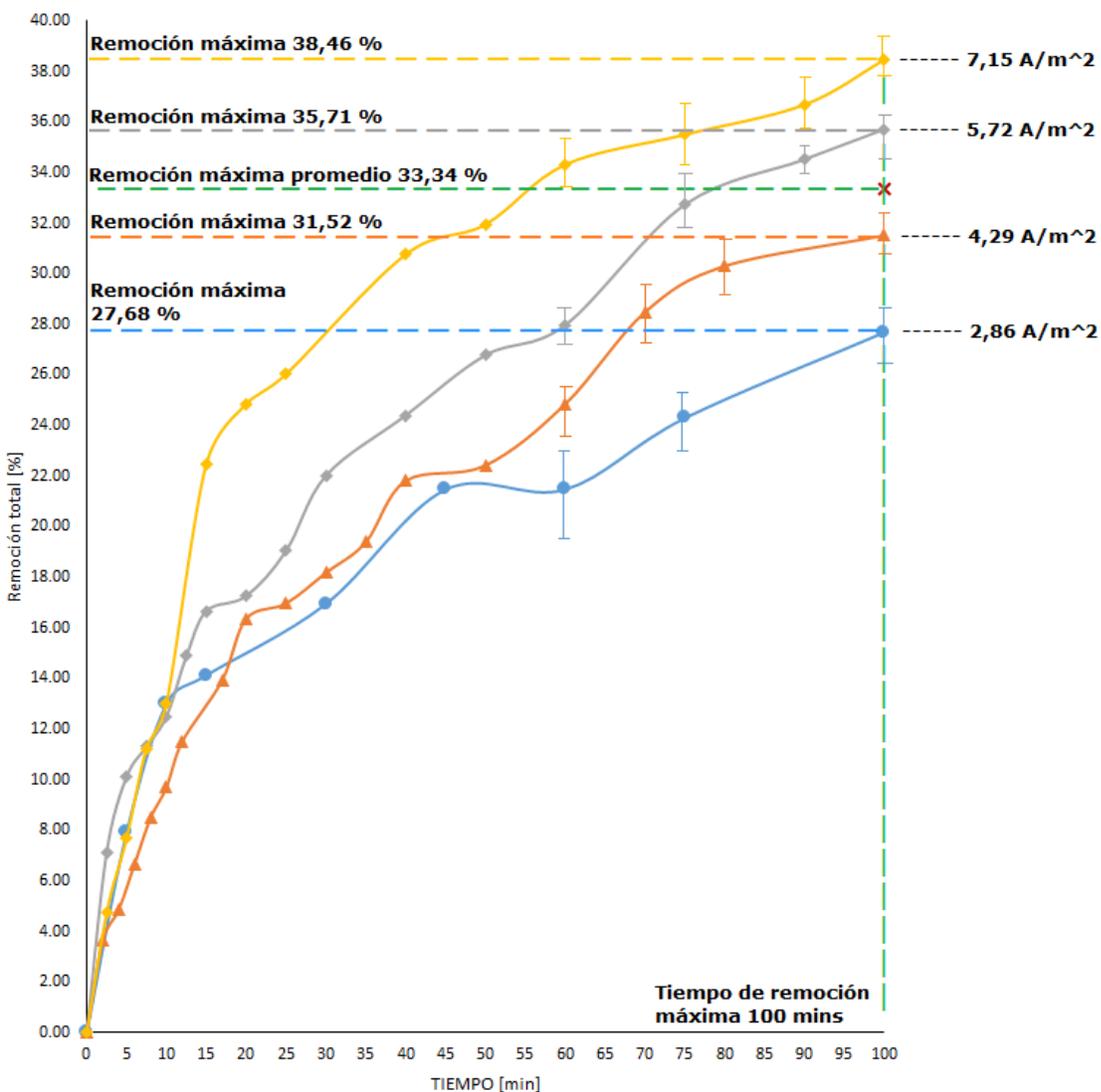
Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3.

Figura 18. Remoción total promedio en función del tiempo a flujo volumétrico constante (550 mL min⁻¹) con absorbancia inicial alta (ABS = 0,165 – 0,177; λ = 680 nm)



Fuente: elaboración propia.

Descripción de cada curva de la Figura 18

Símbolo de curva	ABS	Q [mL min ⁻¹]	ρ_i [A m ⁻²]	R ²	Error estándar
	0,177	550	2,86	0,91	6,96E-05
	0,165	550	4,29	0,95	5,90E-05
	0,168	550	5,72	0,94	7,33E-05
	0,169	550	7,15	0,88	1,17E-04

Fuente: elaboración propia.

Condiciones de la experimentación para la Figura 18

Tipo de curvas	Isolíneas de densidad de corriente diferente al mismo flujo volumétrico.
Flujo volumétrico	550 mL min ⁻¹
Longitud de onda	680 nm
Temperatura	24 °C
Rango de densidad de corriente	[2,86; 7,15] A m ⁻²
Transmitancia inicial	Alta
Rango de ABS iniciales	[0,165; 0,177]

Fuente: elaboración propia.

Tabla de datos de la Figura 18

Tiempo [min]	Densidad de corriente [A m ⁻²]			
	2,86	4,29	5,72	7,15
2,5	3,9548	3,9394	7,1429	4,7337
5	7,9096	5,7576	10,1190	7,6923
7,5	10,4520	8,0303	11,3095	11,2426
10	12,9944	9,6970	12,5000	13,0178
15	14,1243	12,9697	16,6667	22,4852
20	15,0659	16,3636	17,2619	24,8521
25	16,0075	16,9697	19,0476	26,0355
30	16,9492	18,1818	22,0238	27,6134
40	19,9623	21,8182	24,4048	30,7692
50	21,4689	22,4242	26,7857	31,9527

Continuación de la Tabla de datos de la figura 18

60	21,4689	24,8485	27,9762	34,3195
75	24,2938	29,3939	32,7381	35,5030
90	26,3277	30,9091	34,5238	36,6864
100	27,6836	31,5152	35,7143	38,4615

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos de la Figura 18

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
2,5	4	19,7708	4,9427	2,2890
5	4	31,4785	7,8696	3,1846
7,5	4	41,0344	10,2586	2,3585
10	4	48,2091	12,0523	2,5225
15	4	66,2459	16,5615	17,9808
20	4	73,5435	18,3859	19,3955
25	4	78,0604	19,5151	20,5054
30	4	84,7682	21,1920	22,9965
40	4	96,9545	24,2386	22,2739
50	4	102,6315	25,6579	22,9667
60	4	108,6131	27,1533	29,8854
75	4	121,9288	30,4822	23,2593
90	4	128,4470	32,1117	20,5491
100	4	133,3746	33,3436	22,3974

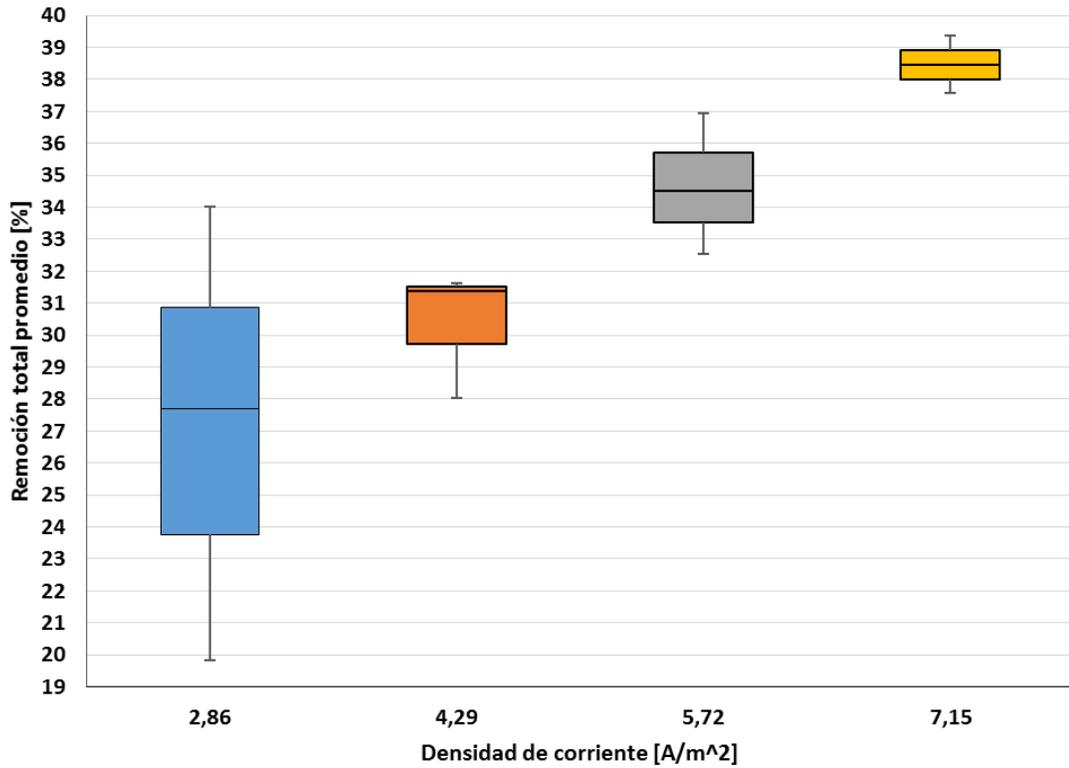
ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4331,0909	13	333,1608	20,0557	6,2934E-14	1,9612
Dentro de los grupos	697,6933	42	16,6117			
Total	5028,7841	55				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4.

Figura 19. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente graficada en la Figura 18



Fuente: elaboración propia.

Tabla de datos de la Figura 19

Tiempo [min]	Repetición	Densidad de corriente [A m ⁻²]			
		2,86	4,29	5,72	7,15
100	1	27,6836	31,5152	35,7143	38,4615
	2	23,7569	29,7143	33,5227	38,0117
	3	30,8571	31,3953	34,5029	38,9222

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos de la Figura 19

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	4	133,3746	33,3436	22,3974
2	4	125,0056	31,2514	36,4636
3	4	135,6776	33,9194	13,7054

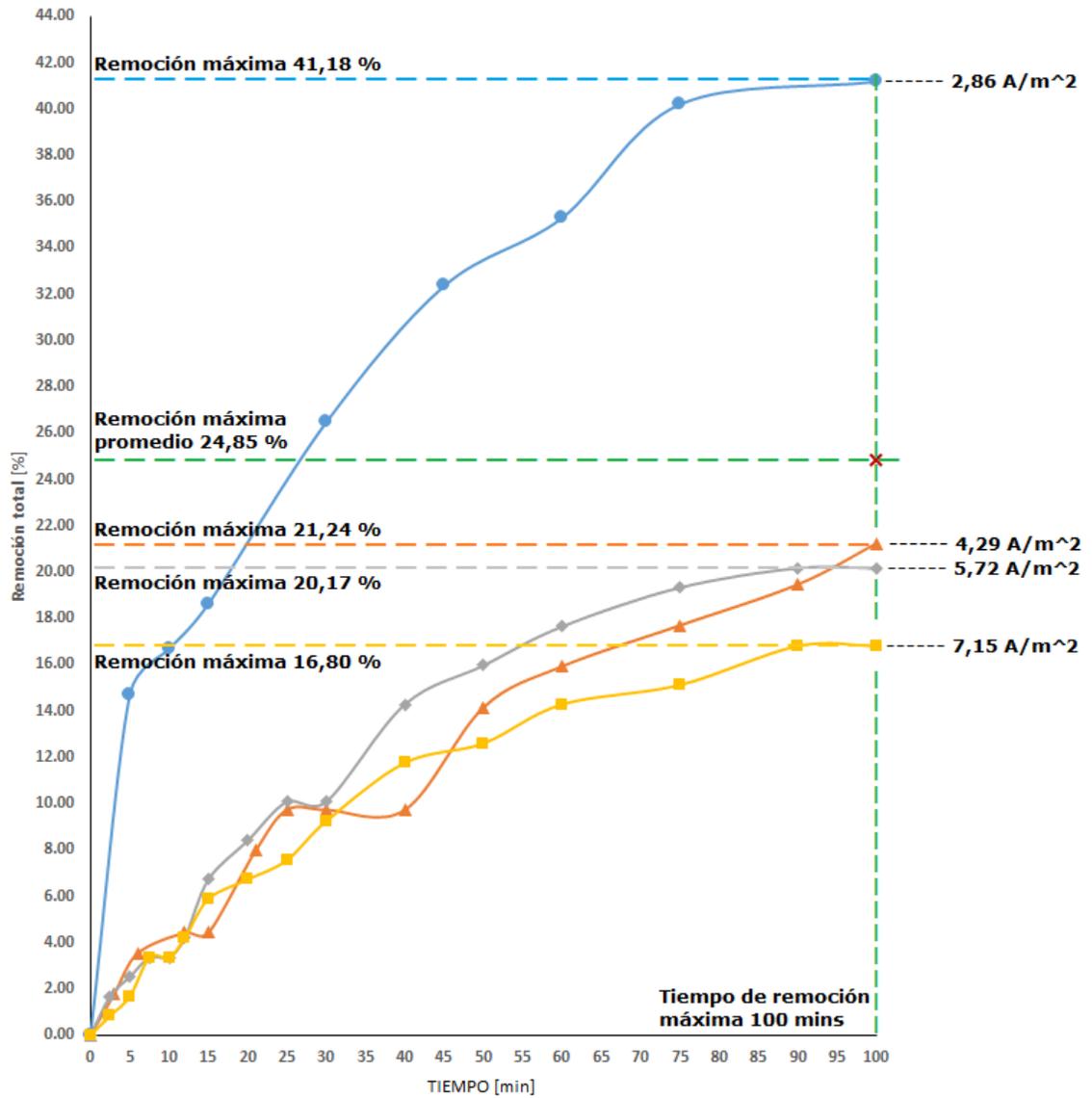
ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	15,7695	2	7,8848	0,3260	0,7300	4,2565
Dentro de los grupos	217,6991	9	24,1888			
Total	233,4686	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5.

Figura 20. Remoción total promedio en función del tiempo a flujo volumétrico constante (300 mL min⁻¹) con absorbancia inicial baja (ABS = 0,102 – 0,119; λ = 680 nm)



Fuente: elaboración propia.

Descripción de cada curva de la Figura 20

Símbolo de curva	ABS	Q [mL min ⁻¹]	ρI [A m ⁻²]	R ²	Error estándar
●	0,102	300	2,86	0,92	5,90E-05
▲	0,113		4,29	0,99	1,46E-05
◆	0,119		5,72	0,96	2,90E-05
■	0,119		7,15	0,95	2,45E-05

Fuente: elaboración propia.

Condiciones de la experimentación para la Figura 20

Tipo de curvas	Isolíneas de densidad de corriente diferente al mismo flujo volumétrico,
Flujo volumétrico	300 mL min ⁻¹
Longitud de onda	680 nm
Temperatura	24 °C
Rango de densidad de corriente	[2,86; 7,15] A m ⁻²
Transmitancia inicial	Baja
Rango de ABS iniciales	[0,102; 0,119]

Fuente: elaboración propia.

Tabla de datos de la Figura 20

Tiempo [min]	Densidad de corriente [A m ⁻²]			
	2,86	4,29	5,72	7,15
2,5	7,3529	1,4749	1,6807	0,8403
5	14,7059	2,9499	2,5210	1,6807
7,5	15,6863	3,7611	3,3613	3,3613
10	16,6667	4,1298	3,3613	3,3613
15	18,6275	4,4248	6,7227	5,8824
20	23,2026	7,0796	8,4034	6,7227
25	27,7778	9,7345	10,0840	7,5630
30	32,3529	9,7345	10,0840	9,2437
40	33,3333	9,7345	14,2857	11,7647
50	34,3137	14,1593	15,9664	12,6050
60	35,2941	15,9292	17,6471	14,2857
75	40,1961	17,6991	19,3277	15,1261
90	40,7843	19,4690	20,1681	16,8067

Continuación Tabla de datos de la Figura 20

100	41,1765	21,2389	20,1681	16,8067
-----	---------	---------	---------	---------

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos de la Figura 20

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
2,5	4	11,3489	2,8372	9,1909
5	4	21,8574	5,4644	38,2360
7,5	4	26,1700	6,5425	37,1948
10	4	27,5191	6,8798	42,7015
15	4	35,6573	8,9143	42,8323
20	4	45,4083	11,3521	62,9384
25	4	55,1593	13,7898	88,2048
30	4	61,4152	15,3538	128,5503
40	4	69,1183	17,2796	118,0094
50	4	77,0444	19,2611	102,5894
60	4	83,1561	20,7890	95,3935
75	4	92,3490	23,0872	133,0862
90	4	97,2281	24,3070	122,7643
100	4	99,3902	24,8475	122,0694

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2 911,8224	13	223,9863	2,7417	6,71E-03	1,9612
Dentro de los grupos	3 431,2835	42	81,6972			
Total	6 343,1060	55				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6.

Figura 21. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente graficada en la Figura 20

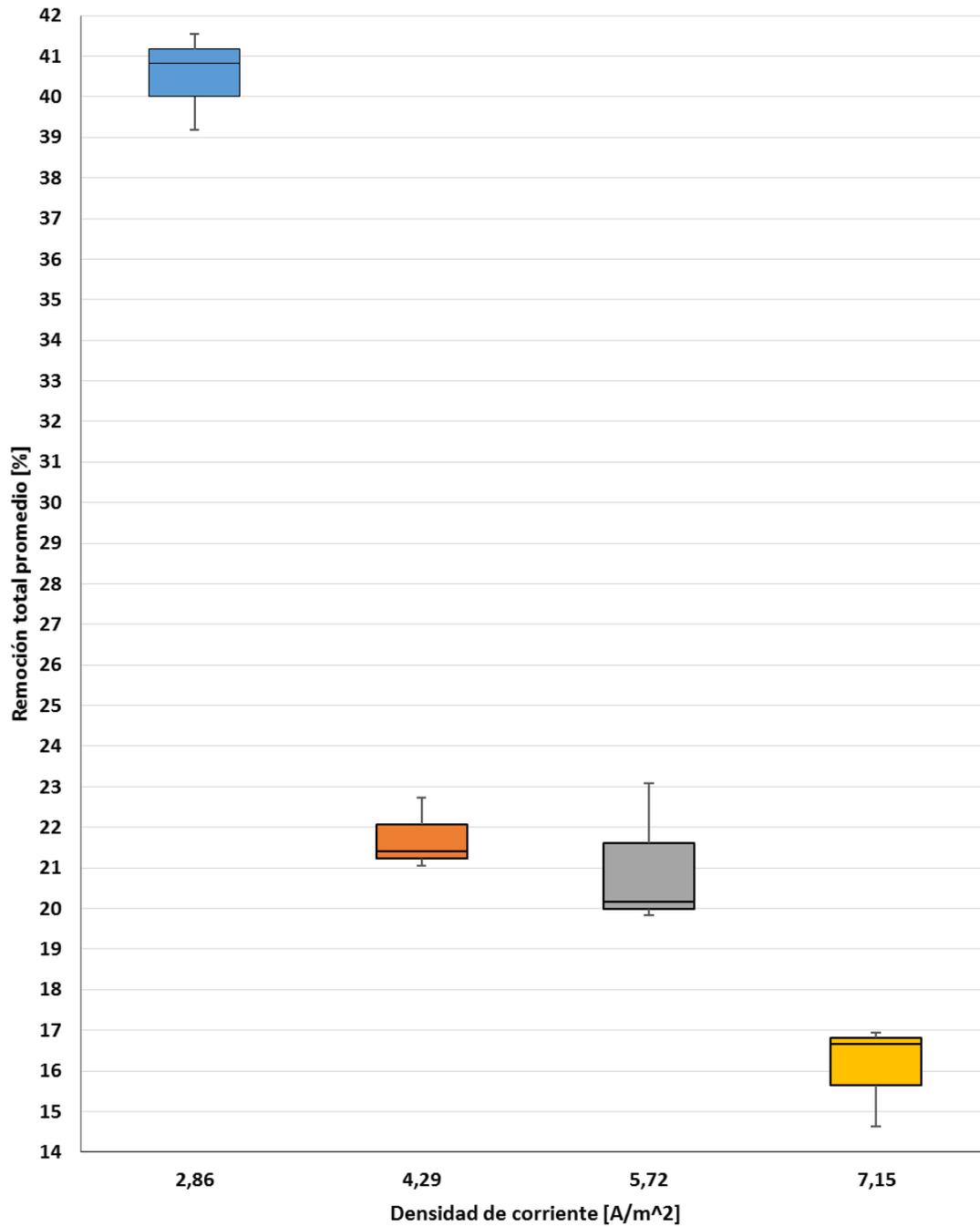


Tabla de datos de la Figura 21

Tiempo [min]	Repetición	Densidad de corriente [A m ²]			
		2,86	4,29	5,72	7,15
100	1	41,1765	21,2389	20,1681	16,8067
	2	40,0000	22,0720	20,0000	15,6522
	3	40,8163	21,4207	21,6216	16,6667

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos de la Figura 21

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
1	4	99,3902	24,8475	122,0694
2	4	97,7241	24,4310	114,8868
3	4	100,5253	25,1313	114,5855

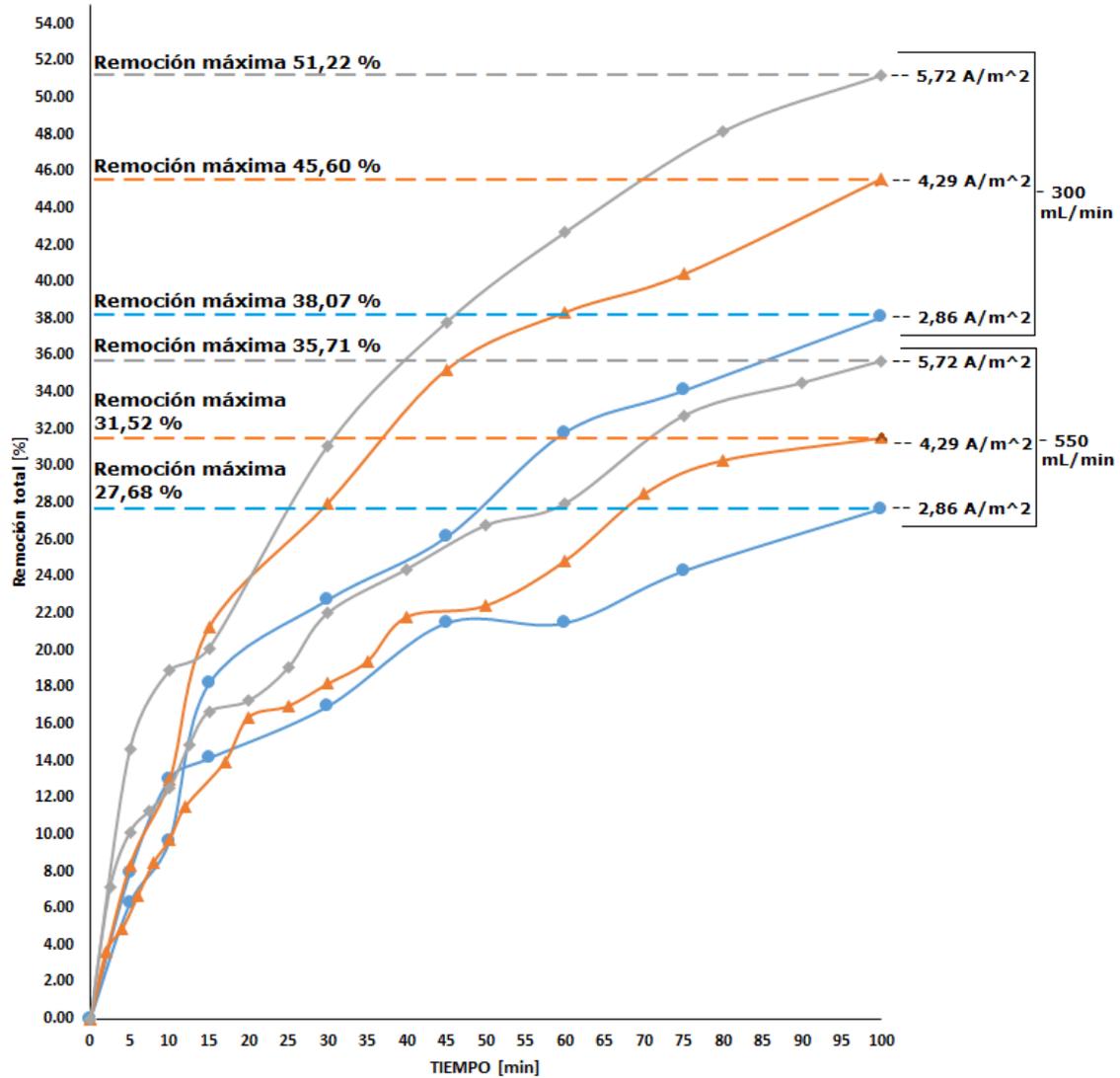
ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,9926	2	0,4963	0,0042	0,9958	4,2565
Dentro de los grupos	1 054,6249	9	117,1805			
Total	1 055,6175	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7.

Figura 22. Remoción total promedio para Absorbancia Inicial Alta en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y flujo volumétrico



Fuente: elaboración propia.

Descripción de cada curva de la Figura 22

Símbolo de curva	ABS	Q [mL min ⁻¹]	ρI [A m ⁻²]	R ²	Error estándar
—●—	0,176	300	2,86	0,94	8,49E-05
—▲—	0,193		4,29	0,93	1,20E-04
—◆—	0,164		5,72	0,94	1,02E-04
—●—	0,177	550	2,86	0,91	6,96E-05
—▲—	0,165		4,29	0,95	5,90E-05
—◆—	0,168		5,72	0,94	7,34E-05

Fuente: elaboración propia.

Condiciones de la experimentación para la Figura 22

Tipo de curvas	Isolíneas de densidad de corriente diferente a dos flujos volumétricos.
Flujo volumétrico	300 y 550 mL min ⁻¹
Longitud de onda	680 nm
Temperatura	24 °C
Rango de densidad de corriente	[2,86; 5,72] A m ⁻²
Transmitancia inicial	Alta
Rango de ABS iniciales	[0,164; 0,193]

Fuente: elaboración propia.

Tabla de datos de la Figura 22

Tiempo [min]	Flujo volumétrico [mL min ⁻¹]					
	300			550		
	Densidad de corriente eléctrica [A m ⁻²]					
	2,86	4,29	5,72	2,86	4,29	5,72
0	0	0	0	0	0	0
5	6,2500	8,2902	14,6341	7,9096	5,7576	10,1190
10	9,6591	12,9534	18,9024	12,9944	9,6970	12,5000
15	18,1818	21,2435	20,1220	14,1243	12,9697	16,6667
30	22,7273	27,9793	31,0976	16,9492	18,1818	22,0238
45	26,1364	35,2332	37,8049	21,4689	22,1212	25,5952
60	31,8182	38,3420	42,6829	21,4689	24,8485	27,9762
75	34,0909	40,4145	45,8841	24,2938	29,3939	32,7381
100	38,0682	45,5959	51,2195	27,6836	31,5152	35,7143

Fuente: elaboración propia,

**Análisis de varianza de un factor para los datos a 300 mL min⁻¹ de la
Figura 22**

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	6	0	0	0
5	6	52,9605	8,8268	10,5169
10	6	76,7062	12,7844	11,3767
15	6	103,3080	17,2180	10,6980
30	6	138,9589	23,1598	30,2131
45	6	168,3598	28,0600	46,9808
60	6	187,1367	31,1894	65,7351
75	6	206,8154	34,4692	59,6170
100	6	229,7966	38,2994	77,1249

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	F	<i>Probabilidad</i>	Valor crítico para F
Entre grupos	7843,3547	8	980,4193	28,2576	4,1349E-15	2,1521
Dentro de los grupos	1561,3119	45	34,6958			
Total	9404,6666	53				

Fuente: elaboración propia.

**Análisis de varianza de un factor para los datos a 550 mL min⁻¹ de la
Figura 22**

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	3	0	0	0
5	3	23,7862	7,9287	4,7559
10	3	35,1913	11,7304	3,1623
15	3	43,7607	14,5869	3,5774
30	3	57,1548	19,0516	7,0054
45	3	69,1854	23,0618	4,9201
60	3	74,2936	24,7645	10,5914

Continuación Tabla Análisis de varianza de un factor para los datos a 550 mL min⁻¹ de la Figura 22

75	3	86,4258	28,8086	18,0836
100	3	94,9131	31,6377	16,1342

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2 554,9961	8	319,3745	42,1275	4,2343E-10	2,5102
Dentro de los grupos	136,4606	18	7,5811			
Total	2 691,4567	26				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de dos factores para los datos de la Figura 22

RESUMEN	5	10	15	30	45	60	75	100	Total
<i>Flujo volumétrico 300 mL min⁻¹</i>									
Cuenta	3	3	3	3	3	3	3	3	24
Suma	29,1743	41,5149	59,5473	81,8041	99,1744	112,8431	120,3896	134,8835	679,3312
Promedio	9,7248	13,8383	19,8491	27,2680	33,0581	37,6144	40,1299	44,9612	28,3055
Varianza	19,1171	21,9472	2,3993	17,8948	37,5866	29,9077	34,8309	43,5415	168,4892
<i>Flujo volumétrico 550 mL min⁻¹</i>									
Cuenta	3	3	3	3	3	3	3	3	24
Suma	23,7862	35,1913	43,7607	57,1548	69,1854	74,2936	86,4258	94,9131	484,7108
Promedio	7,9287	11,7304	14,5869	19,0516	23,0618	24,7645	28,8086	31,6377	20,1963
Varianza	4,7559	3,1623	3,5774	7,0054	4,9201	10,5914	18,0836	16,1342	69,7283
<i>Total</i>									
Cuenta	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Suma	52,9605	76,7062	103,3080	138,9589	168,3598	187,1367	206,8154	229,7966	1164,0420
Promedio	8,8268	12,7844	17,2180	23,1598	28,0600	31,1894	34,4692	38,2994	48,5000
Varianza	10,5169	11,3767	10,6980	30,2131	46,9808	65,7351	59,6170	77,1249	438,2171

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	789,1059	1	789,1059	45,8357	1,1912E-07	4,1491
Columnas	4706,7948	7	672,3993	39,0567	6,4943E-14	2,3127
Interacción	221,2952	7	31,6136	1,8363	1,1422E-01	2,3127
Dentro del grupo	550,9109	32	17,2160			
Total	6268,1068	47				

Fuente: elaboración propia.

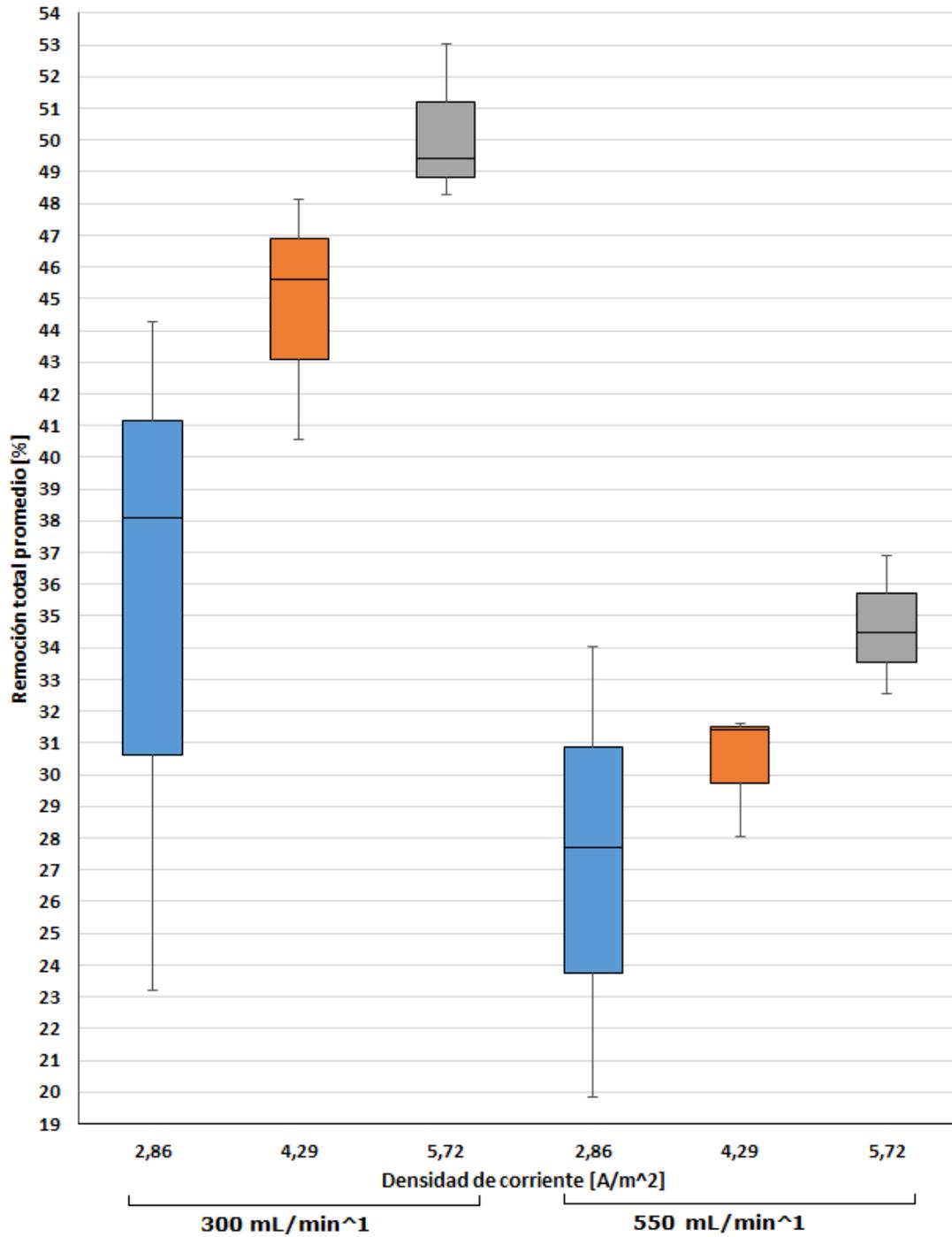
Matriz de datos para la realización del ANOVA de 2 Factores

Flujo volumétrico [mL min ⁻¹]	Densidad de corriente [A m ⁻²]	Tiempo [min]									
		5	10	15	30	45	60	75	100		
300	2,86	6,2500	9,6591	18,1818	22,7273	26,1364	31,8182	34,0909	38,0682		
	4,29	8,2902	12,9534	21,2435	27,9793	35,2332	38,3420	40,4145	45,5959		
	5,72	14,6341	18,9024	20,1220	31,0976	37,8049	42,6829	45,8841	51,2195		
550	2,86	7,9096	12,9944	14,1243	16,9492	21,4689	21,4689	24,2938	27,6836		
	4,29	5,7576	9,6970	12,9697	18,1818	22,1212	24,8485	29,3939	31,5152		
	5,72	10,1190	12,5000	16,6667	22,0238	25,5952	27,9762	32,7381	35,7143		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8.

Figura 23. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a flujo volumétrico de 300 y 550 mL min⁻¹, graficados en la Figura 22



Fuente: elaboración propia.

Tabla de datos de la Figura 23

Tiempo [min]	Repetición	Flujo volumétrico [mL min ⁻¹]					
		300			550		
		Densidad de corriente [A m ⁻²]					
		2,86	4,29	5,72	2,86	4,29	5,72
100	1	38,0682	45,5959	51,2195	27,6836	31,5152	35,7143
	2	30,6358	46,8750	49,4118	23,7569	29,7143	33,5227
	3	41,1765	43,0769	48,8372	30,8571	31,3953	34,5029

Fuente: elaboración propia,

Análisis de varianza de un factor para los datos a 300 mL min⁻¹ de la Figura 23

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
1	3	134,8835	44,9612	43,5415
2	3	126,9226	42,3075	103,7802
3	3	133,0906	44,3635	15,9133

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	11,6262	2	5,8131	0,1068	0,9003	5,1433
Dentro de los grupos	326,4698	6	54,4116			
Total	338,0960	8				

Fuente: elaboración propia.

**Análisis de varianza de un factor para los datos a 550 mL min⁻¹ de la
Figura 23**

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	94,9131	31,6377	16,1342
2	3	86,9939	28,9980	24,2276
3	3	96,7554	32,2518	3,8731

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	17,9326	2	8,9663	0,6081	0,5748	5,1433
Dentro de los grupos	88,4698	6	14,7450			
Total	106,4024	8				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de dos factores para los datos de la Figura 23

RESUMEN	1	2	3	Total
<i>300</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	134,8835	126,9226	133,0906	394,8968
Promedio	44,9612	42,3075	44,3635	43,8774
Varianza	43,5415	103,7802	15,9133	42,2620
<i>550</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	94,9131	86,9939	96,7554	278,6624
Promedio	31,6377	28,9980	32,2518	30,9625
Varianza	16,1342	24,2276	3,8731	13,3003
<i>Total</i>				
Cuenta	6	6	6	6
Suma	229,7966	213,9165	229,8460	229,8460
Promedio	38,2994	35,6528	38,3077	38,3077
Varianza	77,1249	104,3464	51,9227	51,9227

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	750,5793	1	750,5793	21,7067	0,0006	4,7472
Columnas	28,1071	2	14,0536	0,4064	0,6749	3,8853
Interacción	1,4517	2	0,7258	0,0210	0,9793	3,8853
Dentro del grupo	414,9396	12	34,5783			
Total	1195,0777	17				

Fuente: elaboración propia.

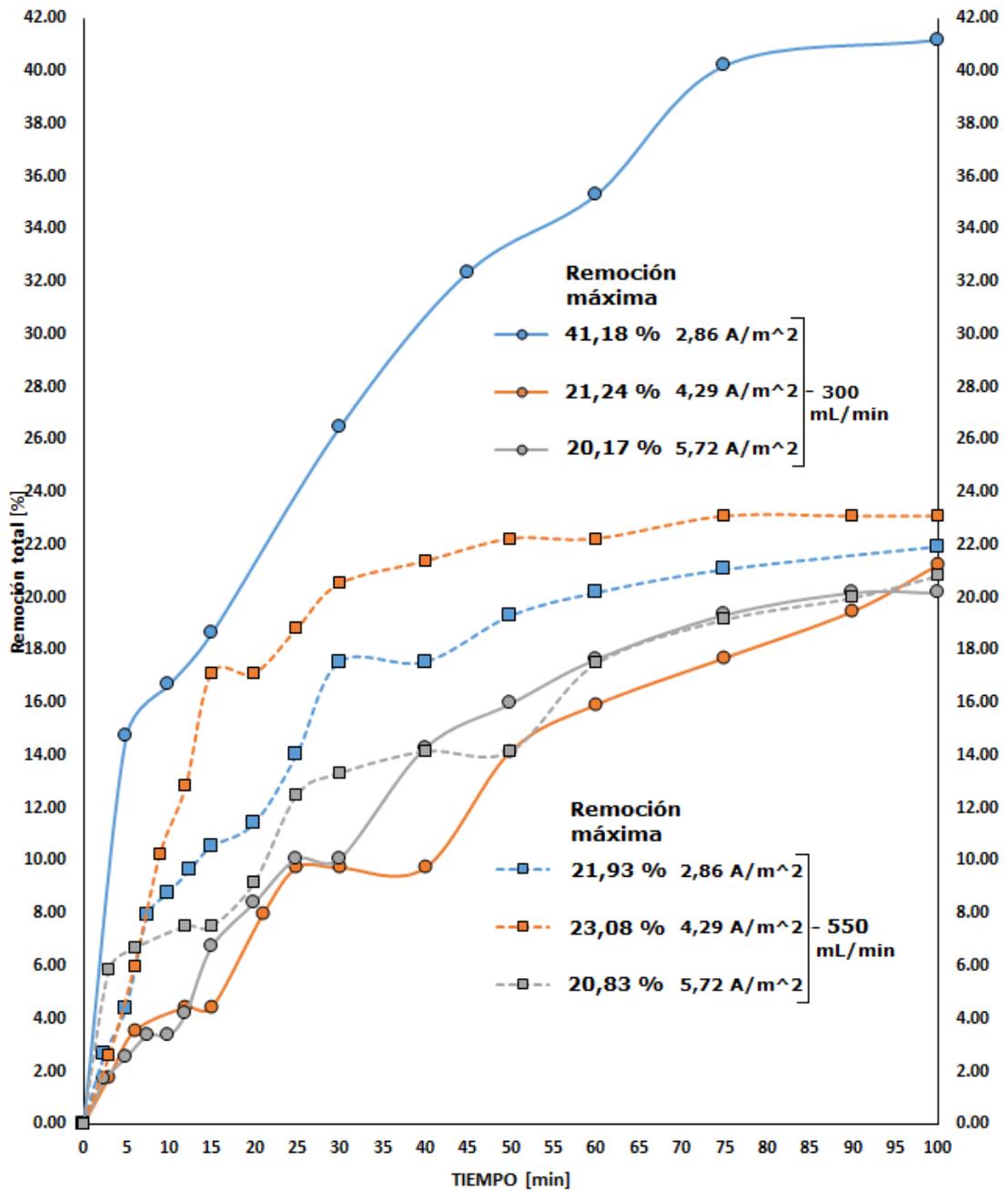
Matriz de datos para la realización del ANOVA de 2 Factores

Flujo volumétrico [mL min ⁻¹]	Densidad de corriente [A m ⁻²]	Tiempo [min]		
		Repetición		
		1	2	3
300	2,86	38,0682	30,6358	41,1765
	4,29	45,5959	46,8750	43,0769
	5,72	51,2195	49,4118	48,8372
550	2,86	27,6836	23,7569	30,8571
	4,29	31,5152	29,7143	31,3953
	5,72	35,7143	33,5227	34,5029

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9.

Figura 24. Remoción total promedio para Absorbancia Inicial Baja en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y flujo volumétrico



Fuente: elaboración propia.

Descripción de cada curva de la Figura 24

Símbolo de curva	ABS	Q [mL min ⁻¹]	ρI [A m ⁻²]	R ²	Error estándar
	0,102	300	2,86	0,85	5,71E-03
	0,113		4,29	0,97	2,63E-02
	0,119		5,72	0,92	8,35E-02
	0,114	550	2,86	0,79	2,11E-02
	0,117		4,29	0,64	1,99E-02
	0,120		5,72	0,89	7,34E-03

Fuente: elaboración propia.

Condiciones de la experimentación para la Figura 24

Tipo de curvas	Isolíneas de densidad de corriente diferente a dos flujos volumétricos.
Flujo volumétrico	300 y 550 mL min ⁻¹
Longitud de onda	680 nm
Temperatura	24 °C
Rango de densidad de corriente	[2,86; 5,72] A m ⁻²
Transmitancia inicial	Baja
Rango de ABS iniciales	[0,102; 0,120]

Fuente: elaboración propia.

Tabla de datos de la Figura 24

Tiempo (min)	Flujo volumétrico [mL min ⁻¹]					
	300			550		
	Densidad de corriente eléctrica [A m ⁻²]					
	2,86	4,29	5,72	2,86	4,29	5,72
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	14,7059	2,9499	2,5210	4,3860	4,8433	6,3889
10	16,6667	4,1298	3,3613	8,7719	11,1111	7,2222
15	18,6275	4,4248	6,7227	10,5263	17,0940	7,5000
30	26,4706	9,7345	10,0840	17,5439	20,5128	13,3333
45	32,3529	11,9469	15,1261	18,4211	21,7949	14,1667
60	35,2941	15,9292	17,6471	20,1754	22,2222	17,5000
75	40,1961	17,6991	19,3277	21,0526	23,0769	19,1667
100	41,1765	21,2389	20,1681	21,9298	23,0769	20,8333

Fuente: elaboración propia,

Análisis de varianza de un factor para los datos a 300 mL min⁻¹ de la Figura 24

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	3	0	0	0
5	3	20,1767	6,7256	47,8099
10	3	24,1578	8,0526	55,7992
15	3	29,7749	9,9250	58,1199
30	3	46,2891	15,4297	91,4563
45	3	59,4259	19,8086	120,5465
60	3	68,8704	22,9568	114,8949
75	3	77,2229	25,7410	157,3756
100	3	82,5835	27,5278	140,0008

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2178,8100	8	272,3513	3,1185	2,1447E-02	2,5102
Dentro de los grupos	1572,0064	18	87,3337			
Total	3750,8164	26				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos a 550 mL min⁻¹ de la Figura 24

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	3	0	0	0
5	3	15,6182	5,2061	1,1016
10	3	27,1053	9,0351	3,8328
15	3	35,1203	11,7068	24,0564
30	3	51,3900	17,1300	13,0147
45	3	54,3826	18,1275	14,6120

Continuación Tabla Análisis de varianza de un factor para los datos a 550 mL min⁻¹ de la Figura 24

60	3	59,8977	19,9659	5,6078
75	3	63,2962	21,0987	3,8241
100	3	65,8401	21,9467	1,2586

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1436,5701	8	179,5713	24,0111	4,3032E-08	2,5102
Dentro de los grupos	134,6162	18	7,4787			
Total	1571,1863	26				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de dos factores para los datos de la Figura 24

RESUMEN	5	10	15	30	45	60	75	100	Total
<i>300</i>									
Cuenta	3	3	3	3	3	3	3	3	24
Suma	20,1767	24,1578	29,7749	46,2891	59,4259	68,8704	77,2229	82,5835	408,5013
Promedio	6,7256	8,0526	9,9250	15,4297	19,8086	22,9568	25,7410	27,5278	17,0209
Varianza	47,8099	55,7992	58,1199	91,4563	120,5465	114,8949	157,3756	140,0008	129,4893
<i>550</i>									
Cuenta	3	3	3	3	3	3	3	3	24
Suma	15,6182	27,1053	35,1203	51,3900	54,3826	59,8977	63,2962	65,8401	372,6503
Promedio	5,2061	9,0351	11,7068	17,1300	18,1275	19,9659	21,0987	21,9467	15,5271
Varianza	1,1016	3,8328	24,0564	13,0147	14,6120	5,6078	3,8241	1,2586	40,3599
<i>Total</i>									
Cuenta	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Suma	35,7949	51,2631	64,8953	97,6791	113,8085	128,7680	140,5191	148,4236	
Promedio	5,9658	8,5438	10,8159	16,2799	18,9681	21,4613	23,4199	24,7373	
Varianza	20,2573	24,1424	33,8230	42,6557	54,9112	50,8847	70,9450	65,8485	

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad crítica para F	Valor F
Muestra	26,7769	1	26,7769	0,5021	4,8372E-01	4,1491
Columnas	2 115,9703	7	302,2815	5,6679	2,5518E-04	2,3127
Interacción Dentro del grupo	83,9397	7	11,9914	0,2248	9,7652E-01	2,3127
	1 706,6226	32	53,3320			
Total	3 933,3094	47				

Fuente: elaboración propia.

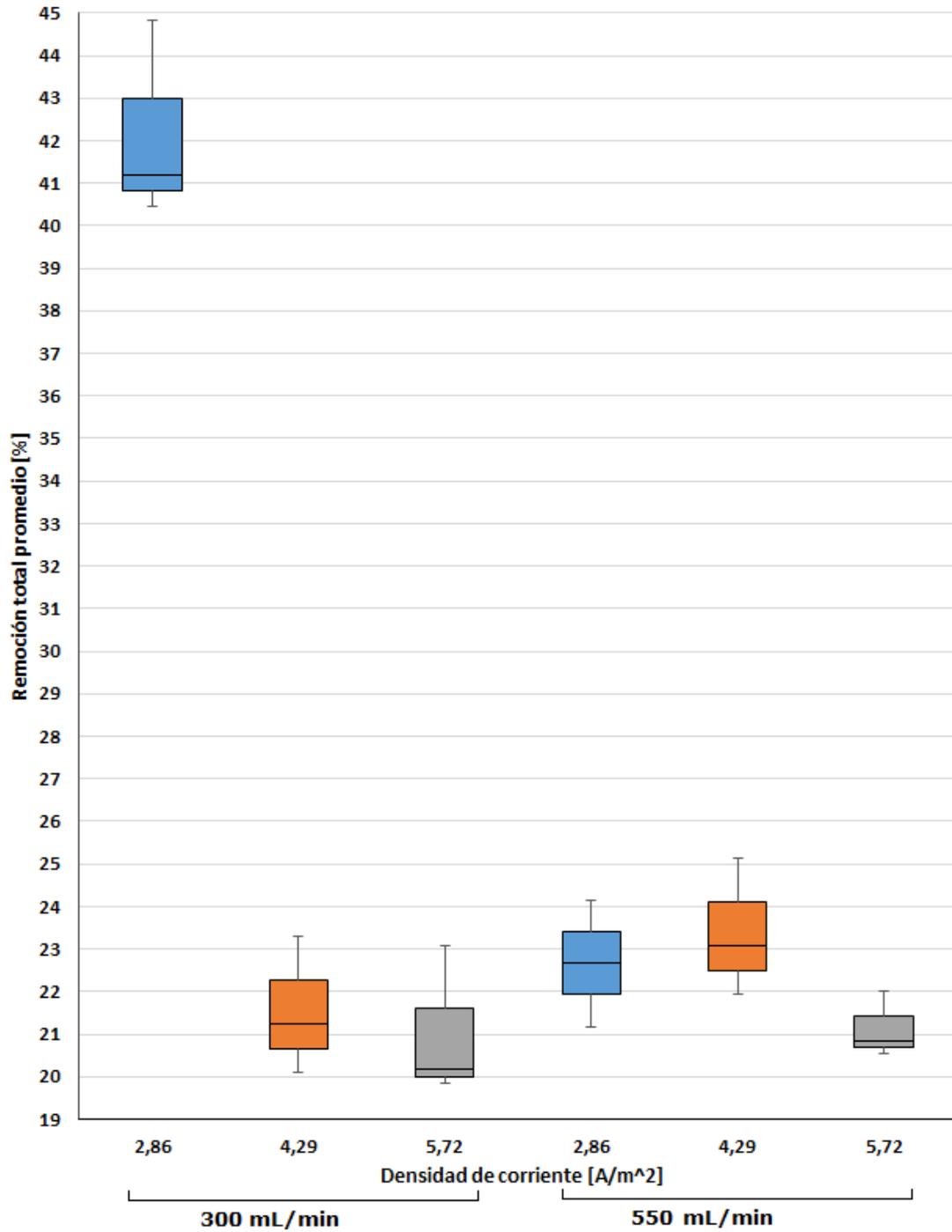
Matriz de datos para la realización del ANOVA de 2 Factores

Flujo volumétrico [mL min ⁻¹]	Densidad de corriente [A m ⁻²]	Tiempo [min]							
		5	10	15	30	45	60	75	100
300	2,86	14,7059	16,6667	18,6275	26,4706	32,3529	35,2941	40,1961	41,1765
	4,29	2,9499	4,1298	4,4248	9,7345	11,9469	15,9292	17,6991	21,2389
	5,72	2,5210	3,3613	6,7227	10,0840	15,1261	17,6471	19,3277	20,1681
550	2,86	4,3860	8,7719	10,5263	17,5439	18,4211	20,1754	21,0526	21,9298
	4,29	4,8433	11,1111	17,0940	20,5128	21,7949	22,2222	23,0769	23,0769
	5,72	6,3889	7,2222	7,5000	13,3333	14,1667	17,5000	19,1667	20,8333

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10.

Figura 25. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a flujo volumétrico de 300 y 550 mL min⁻¹, graficados en la Figura 24



Fuente: elaboración propia.

Tabla de datos de la Figura 25

Repetición	Flujo volumétrico [mL min ⁻¹]					
	300			550		
	Densidad de corriente [A m ⁻²]					
	2,86	4,29	5,72	2,86	4,29	5,72
1	41,1765	21,2389	20,1681	21,9298	23,0769	20,8333
2	40,8163	20,6620	21,6216	23,4234	22,5000	20,6897
3	43,0000	22,2692	20,0000	22,6891	24,1071	21,4286

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos a 300 mL min⁻¹ de la Figura 25

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
1	3	82,5835	27,5278	140,0008
2	3	83,1000	27,7000	129,2590
3	3	85,2692	28,4231	160,6528

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	1,3539	2	0,6769	0,0047	0,9953	5,1433
Dentro de los grupos	859,8252	6	143,3042			
Total	861,1791	8				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos a 550 mL min⁻¹ de la Figura 25

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	65,8401	21,9467	1,2586
2	3	66,6131	22,2044	1,9339
3	3	68,2248	22,7416	1,7958

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,9869	2	0,4934	0,2968	0,7535	5,1433
Dentro de los grupos	9,9766	6	1,6628			
Total	10,9635	8				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de dos factores para los datos de la Figura 25

RESUMEN	1	2	3	Total
<i>300</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	82,5835	83,1000	85,2692	250,9526
Promedio	27,5278	27,7000	28,4231	27,8836
Varianza	140,0008	129,2590	160,6528	107,6474
<i>550</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	65,8401	66,6131	68,2248	200,6779
Promedio	21,9467	22,2044	22,7416	22,2975
Varianza	1,2586	1,9339	1,7958	1,3704
<i>Total</i>				
Cuenta	6	6	6	6
Suma	148,4236	149,7130	153,4939	153,4939
Promedio	24,7373	24,9522	25,5823	25,5823
Varianza	65,8485	61,5377	74,6631	74,6631

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	140,4189	1	140,4189	1,9373	0,1892	4,7472
Columnas	2,3148	2	1,1574	0,0160	0,9842	3,8853
Interacción	0,0260	2	0,0130	0,0002	0,9998	3,8853
Dentro del grupo	869,8019	12	72,4835			
Total	1012,5615	17				

Fuente: elaboración propia.

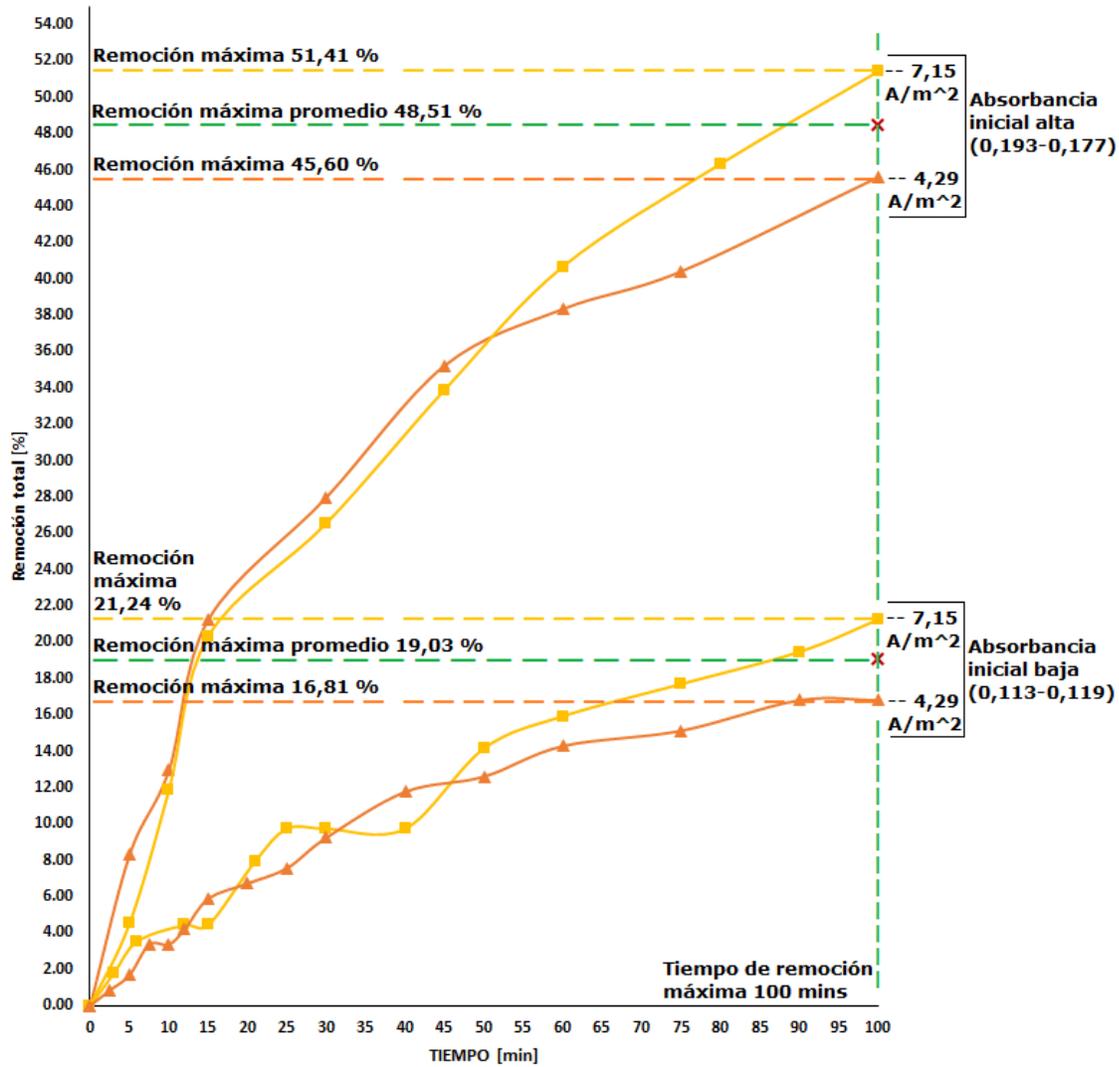
Matriz de datos para la realización del ANOVA de 2 Factores

Flujo volumétrico [mL min ⁻¹]	Densidad de corriente [A m ⁻²]	Tiempo [min]		
		Repetición		
		1	2	3
300	2,86	41,1765	40,8163	43,0000
	4,29	21,2389	20,6620	22,2692
	5,72	20,1681	21,6216	20,0000
550	2,86	21,9298	23,4234	22,6891
	4,29	23,0769	22,5000	24,1071
	5,72	20,8333	20,6897	21,4286

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11.

Figura 26. Remoción total promedio en función del tiempo a diferentes valores de densidad de corriente eléctrica y absorbancia inicial ($\lambda = 680 \text{ nm}$), con flujo volumétrico constante (300 mL min^{-1})



Fuente: elaboración propia.

Descripción de cada curva de la Figura 26

Símbolo de curva	Absorbancia inicial	ABS	Q [mL min ⁻¹]	ρ_i [A m ⁻²]	R ²	Error estándar
▲	Alta	0,193	300	4,29	0,93	1,20E-04
■		0,177	300	7,15	0,96	9,49E-05
▲	Baja	0,113	300	4,29	0,99	1,47E-05
■		0,119	300	7,15	0,95	2,45E-05

Fuente: elaboración propia.

Condiciones de la experimentación para la Figura 26

Tipo de curvas	Isolíneas de densidad de corriente diferente al mismo flujo volumétrico,
Flujo volumétrico	300 mL min ⁻¹
Longitud de onda	680 nm
Temperatura	24 °C
Rango de densidad de corriente	[4,29; 7,15] A m ⁻²
Transmitancia inicial	Alta y baja
Rango de ABS iniciales	[0,113; 0,193]

Fuente: elaboración propia.

Tabla de datos de la Figura 26

Tiempo (min)	Absorbancia			
	Alta		Baja	
	Densidad de corriente eléctrica [A m ⁻²]			
	4,29	7,15	4,29	7,15
0	0	0	0	0
5	8,2902	4,5198	1,6807	2,9499
10	12,9534	11,8644	3,3613	4,1298
15	21,2435	20,3390	5,8824	4,4248
30	27,9793	26,5537	9,2437	9,7345
45	35,2332	33,8983	12,1849	11,9469
60	38,3420	40,6780	14,2857	15,9292
75	40,4145	44,9153	15,1261	17,6991
100	45,5959	51,4124	16,8067	21,2389

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos a Absorbancia Alta de la Figura 26

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	2	0	0	0
5	2	12,8099	6,4050	7,1079
10	2	24,8178	12,4089	0,5929
15	2	41,5825	20,7913	0,4091
30	2	54,5329	27,2665	1,0162
45	2	69,1315	34,5657	0,8909
60	2	79,0199	39,5100	2,7284
75	2	85,3298	42,6649	10,1284
100	2	97,0083	48,5041	16,9163

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	4626,1403	8	578,2675	130,7967	2,1371E-08	3,2296
Dentro de los grupos	39,7901	9	4,4211			
Total	4665,9304	17				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos a Absorbancia baja de la Figura 26

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	2	0	0	0
5	2	4,6305	2,3153	0,8054
10	2	7,4911	3,7456	0,2953
15	2	10,3071	5,1536	1,0623
30	2	18,9782	9,4891	0,1205
45	2	24,1318	12,0659	0,0283
60	2	30,2149	15,1075	1,3505
75	2	32,8252	16,4126	3,3103
100	2	38,0457	19,0228	9,8223

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	739,6784	8	92,4598	49,5473	1,5312E-06	3,2296
Dentro de los grupos	16,7948	9	1,8661			
Total	756,4733	17				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de dos factores para los datos de la Figura 26

RESUMEN	0	5	10	15	30	45	60	75	100	Total
<i>Absorbancia Inicial Alta</i>										
Cuenta	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18
Suma	0	12,8099	24,8178	41,5825	54,5329	69,1315	79,0199	85,3298	97,0083	464,2326
Promedio	0	6,4050	12,4089	20,7913	27,2665	34,5657	39,5100	42,6649	48,5041	25,7907
Varianza	0	7,1079	0,5929	0,4091	1,0162	0,8909	2,7284	10,1284	16,9163	274,4665
<i>Absorbancia Inicial Baja</i>										
Cuenta	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18
Suma	0	4,6305	7,4911	10,3071	18,9782	24,1318	30,2149	32,8252	38,0457	166,6245
Promedio	0	2,3153	3,7456	5,1536	9,4891	12,0659	15,1075	16,4126	19,0228	9,2569
Varianza	0	0,8054	0,2953	1,0623	0,1205	0,0283	1,3505	3,3103	9,8223	44,4984
<i>Total</i>										
Cuenta	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Suma	0	17,4405	32,3089	51,8896	73,5112	93,2632	109,2349	118,1549	135,0539	630,8571
Promedio	0	4,3601	8,0772	12,9724	18,3778	23,3158	27,3087	29,5387	33,7635	32,5213
Varianza	0	8,2130	25,3138	82,0029	105,7238	169,0541	199,8538	234,2073	298,6288	1030,3544

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	2460,2936	1	2460,2936	782,6346	2,7495E-16	4,4139
Columnas	4513,7052	8	564,2131	179,4797	1,4542E-15	2,5102
Interacción	852,1136	8	106,5142	33,8828	2,6053E-09	2,5102
Dentro del grupo	56,5849	18	3,1436			
Total	7882,6972	35				

Fuente: elaboración propia.

Matriz de datos para la realización del ANOVA de 2

Absorbancia	Densidad de corriente [A m ⁻²]	Tiempo [min]									
		0	5	10	15	30	45	60	75	100	
Alta	4,29	0	8,2902	12,9534	21,2435	27,9793	35,2332	38,3420	40,4145	45,5959	
	7,15	0	4,5198	11,8644	20,3390	26,5537	33,8983	40,6780	44,9153	51,4124	
Baja	4,29	0	1,6807	3,3613	5,8824	9,2437	12,1849	14,2857	15,1261	16,8067	
	7,15	0	2,9499	4,1298	4,4248	9,7345	11,9469	15,9292	17,6991	21,2389	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12.

Figura 27. Diagrama de cajas para el tiempo final (100 min) para cada densidad de corriente a Absorbancia Inicial Alta y Baja, graficadas en la Figura 26



Fuente: elaboración propia.

Tabla de datos de la Figura 27

Tiempo [min]	Repetición	Absorbancia inicial			
		Alta		Baja	
		Densidad de corriente [$A\ m^{-2}$]			
		4,29	7,15	4,29	7,15
100	1	45,5959	51,4124	16,8067	21,2389
	2	46,8750	52,0000	15,6522	22,5181
	3	43,0769	50,8380	15,0000	23,7579

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos a Absorbancia Inicial Alta de la Figura 27

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
1	2	97,0083	48,5041	16,9163
2	2	98,8750	49,4375	13,1328
3	2	93,9149	46,9575	30,1171

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	6,2760	2	3,1380	0,1565	0,8617	9,5521
Dentro de los grupos	60,1662	3	20,0554			
Total	66,4422	5				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de un factor para los datos a Absorbancia Inicial
Baja de la Figura 27

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	2	38,0457	19,0228	9,8223
2	2	38,1703	19,0851	23,5704
3	2	38,7579	19,3789	38,3501

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,1447	2	0,0723	0,0030	0,9970	9,5521
Dentro de los grupos	71,7428	3	23,9143			
Total	71,8874	5				

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza de dos factores para los datos de la Figura 27

RESUMEN	1	2	3	Total
<i>Absorbancia Inicial Alta</i>				
Cuenta	2	2	2	6
Suma	97,0083	98,8750	93,9149	289,7982
Promedio	48,5041	49,4375	46,9575	48,2997
Varianza	16,9163	13,1328	30,1171	13,2884
<i>Absorbancia Inicial Baja</i>				
Cuenta	2	2	2	6
Suma	38,0457	38,1703	38,7579	114,9738
Promedio	19,0228	19,0851	19,3789	19,1623
Varianza	9,8223	23,5704	38,3501	14,3775
<i>Total</i>				
Cuenta	4	4	4	4
Suma	135,0539	137,0453	132,6728	
Promedio	33,7635	34,2613	33,1682	
Varianza	298,6288	319,3232	276,3473	

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad para F	Valor crítico para F
Muestra	2546,9645	1	2546,9645	115,8511	3,8019E-05	5,9874
Columnas	2,3962	2	1,1981	0,0545	9,4743E-01	5,1433
Interacción	4,0245	2	2,0123	0,0915	9,1378E-01	5,1433
Dentro del grupo	131,9089	6	21,9848			
Total	2685,2941	11				

Fuente: elaboración propia.

Matriz de datos para la realización del ANOVA de 2 Factores

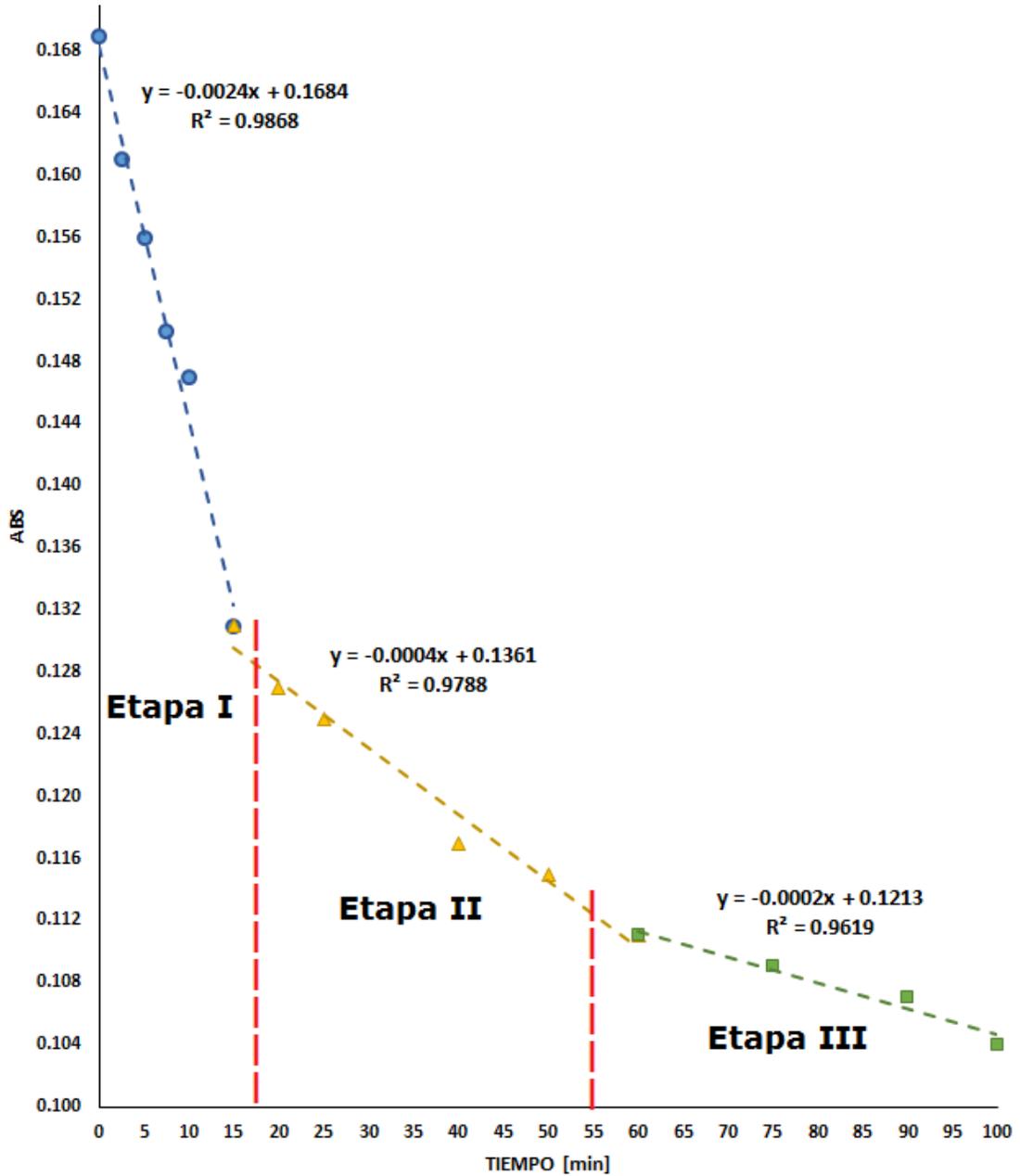
Absorbancia Inicial	Densidad de corriente [A m ⁻²]	Tiempo [min]		
		Repetición		
		1	2	3
Alta	4,29	45,5959	46,8750	43,0769
	7,15	51,4124	52,0000	50,8380
Baja	4,29	16,8067	15,6522	15,0000
	7,15	21,2389	22,5181	23,7579

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13.

Figura 28. Absorbancia en función del tiempo con absorbancia inicial alta

(ABS = 0,169; $\lambda = 680 \text{ nm}$; $Q = 550 \text{ mL min}^{-1}$; $\rho_i = 7,15 \text{ A m}^{-2}$)



Fuente: elaboración propia.

Descripción de la curva de la Figura 28

Símbolo de curva	Modelo matemático	R ²	Velocidad de remoción [% min ⁻¹]	ABS	Q [mL min ⁻¹]	ρ _i [A m ⁻²]	Error estándar
●	$ABS = -0,0024t + 0,1684$	0,9868	2,4E-03	0,169	550	7,15	1,17E-04
▲	$ABS = -0,0004t + 0,1361$	0,9788	0,4E-03				
■	$ABS = -0,0002t + 0,1213$	0,9619	0,2E-03				

Fuente: elaboración propia.

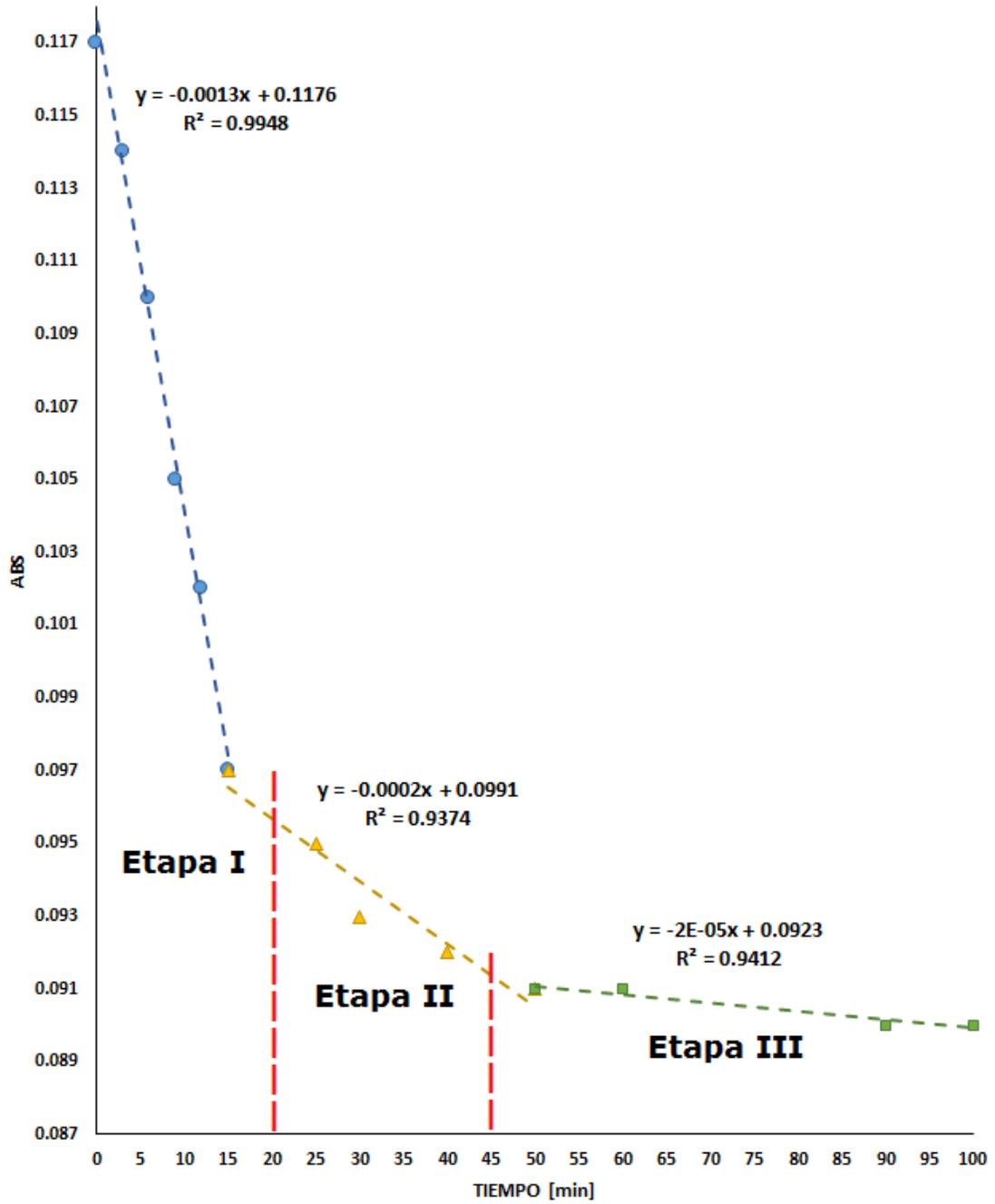
Condiciones de la experimentación para la Figura 28

Tipo de curvas	Curva en función de la densidad de corriente y flujo volumétrico
Flujo volumétrico	550 mL min ⁻¹
Longitud de onda	680 nm
Temperatura	24 °C
Densidad de corriente	7,15 A m ⁻²
Transmitancia inicial	Alta
ABS inicial	0,169

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14.

Figura 29. Absorbancia en función del tiempo con absorbancia inicial alta
(ABS = 0,117; $\lambda = 680 \text{ nm}$; $Q = 550 \text{ mL min}^{-1}$; $\rho_i = 4,29 \text{ A m}^{-2}$)



Fuente: elaboración propia.

Descripción de la curva de la Figura 29

Símbolo de curva	Modelo matemático	R ²	Velocidad de remoción [% min ⁻¹]	ABS	Q [mL min ⁻¹]	ρ _i [A m ⁻²]	Error estándar
●	$ABS = -0,0013t + 0,1174$	0,9948	1,3E-03	0,117	550	4,29	6,59E-05
▲	$ABS = -0,0002t + 0,0991$	0,9374	0,2E-03				
■	$ABS = -2E - 05t + 0,0923$	0,9412	2,0E-05				

Fuente: elaboración propia.

Condiciones de la experimentación para la Figura 29

Tipo de curvas	Curva en función de la densidad de corriente y flujo volumétrico,
Flujo volumétrico	550 mL min ⁻¹
Longitud de onda	680 nm
Temperatura	24 °C
Densidad de corriente	4,29 A m ⁻²
Transmitancia inicial	Baja
ABS inicial	0,117

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Figura 30. **Empaques tipo anillos Raschig, vista superior**



Figura 31. **Empaques tipo anillos Raschig, vista frontal**



Figura 32. **Empaques tipo anillos en espiral, vista superior**



Figura 33. **Empaques tipo anillos en espiral, vista frontal**

