



CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
EN ELECTROQUÍMICA, S.C.

c i d e t e q

**Evaluación Y Caracterización Operacional De Reactores
Bioelectroquímicos Para la Degradación De Contaminantes
Complejos En Agua**

GRADO ACADEMICO AL ASPIRAR:

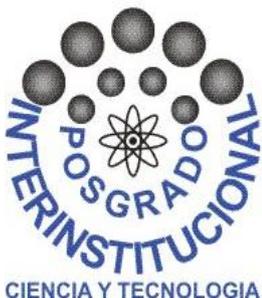
*Maestro en Ciencia y Tecnología
en la Especialidad de Ingeniería Ambiental*

PRESENTA:

Raúl Castellanos Espinoza

Directora de Tesis:

Dra. Linda Victoria González Gutiérrez



Querétaro, Qro., México, junio de 2018.



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dr. Luis Antonio Ortiz Frade
Coordinadora de Estudios de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen del alumno RAÚL CASTELLANOS ESPINOZA una vez leída y revisada la Tesis: “EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN OPERACIONAL DE REACTORES BIOELECTROQUÍMICOS PARA LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES COMPLEJOS EN AGUA”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología con la opción terminal en INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmó la presente a los 19 días del mes de junio del año dos mil dieciocho.

Dr. Francisco Javier Rodríguez Valdez
Presidente

Dra. Bibiana Cercado Quezada
Secretario

Dra. María Yolanda Reyes Vidal
Vocal

Agradecimientos

Para la realización de este trabajo de investigación debo de agradecer a un sin fin de personas que me apoyaron.

En primer lugar, quiero agradecer a Jehová Dios por la vida, porque cada día aprendo más de él y cada vez lo conozco más, porque sé que es un dios de amor y bondad y sé que cada día que vivo, él está siempre conmigo, él es mi guía en cada cosa que hago y todos mis sueños y mi futuro, lo pongo en manos de él, porque tú eres perfecto y no te equivocas, gracias Jehová.

En Segundo lugar, quiero agradecer a mi familia especialmente a mis padres porque siempre me han apoyado a lo largo de todos mis estudios, en la etapa de mi maestría estuvieron al pendiente de mí todos los días.

A mi asesora de tesis la Dra. Linda Victoria González Gutiérrez, por haber confiado en mí para realizar el proyecto, por su paciencia, por su tiempo y sobre todo por darme la oportunidad de aprender cosas nuevas.

También quiero agradecer a mi comité tutorial. La Dra. Nancy Velasco Álvarez, por enseñarme conceptos de microbiología, al Dr. Carlos Eduardo Frontana Vásquez, por darme consejos en mis seminarios. A mis sinodales, la Dra. María Yolanda Reyes Vidal, Dra. Bibiana Cercado Quezada y al Dr. Francisco Javier Rodríguez Valadez, por revisar mi tesis y darme a conocer la importancia de cómo debe ir un formato en un trabajo de investigación.

Por último, les agradezco a mis amigos y compañeros.

A todos y cada una de las personas antes mencionadas les dedico cada una de las páginas de este proyecto de investigación.

Tabla de contenido

Resumen	1
1. Introducción	2
2. Hipótesis	3
3. Objetivos	4
3.1 General:	4
3.2 Específicos:	4
4. Marco Teórico	5
4.1 Reactores Bioelectroquímicos	5
4.2 Parámetros Operacionales	7
4.2.1 Parámetros hidráulicos	7
4.2.2 Parámetros Cinéticos	8
4.3 Distancia entre los electrodos	9
5. Metodología	10
5.1 Colorante Azo	10
5.2 Microorganismos	10
5.4 Ensamblaje del BER	13
5.5 Operación del reactor	16
5.6 Calculo de parámetros hidráulicos	19
6. Resultados	22
6.1 Caracterización de Microorganismos	22
6.1.1 Microorganismos en el reactor 1 y 2 (distancia entre electrodos de 7.9 cm y 14 cm)	27
6.2 Características de los BER	33
6.3 Parámetros operacionales	34
6.3.1 Efecto de la densidad de corriente eléctrica sobre los TRH	34
6.3.2 Efecto del pH	44
6.3.3 Parámetros hidráulicos	47
6.3.4 Parámetros Cinéticos	51
6.4 Formación de subproductos	53
7. Conclusiones	56
8. Bibliografía	58

Índices de figuras

Figura 1. BER con un sistema de cuatro electrodos (Cui et al, 2014).....	9
Figura 2. Estructura del colorante RR-272 (González-Gutiérrez, 2006).....	10
Figura 3. Procedimiento para la preparación de los medios de crecimiento especializados.	12
Figura 4. Unidad básica del BES.....	13
Figura 5. Unidades para el ensamblaje del BES.....	14
Figura 6. Electrodo de malla de acero inoxidable 304 L.	14
Figura 7. Distancia entre los electrodos, donde B=14 cm y C=7.9 cm.	15
Figura 8. Espectro UV-Vis para el colorante RR-272.....	17
Figura 9. Espectro de absorbancia UV-VIS del colorante RR-272 a diferentes concentraciones.	18
Figura 10. Curva de calibración para la cuantificación del colorante RR-272.....	19
Figura 11. Espectro de absorbancia UV-Vis para el colorante azul lanasol 8G.....	20
Figura 12. Curva de calibración para la cuantificación del colorante azul lanasol 8G. .	21
Figura 13. Crecimiento de los m.o. en los medios de cultivo especializado. A) Schanedler agar, B) Standard methods agar y C) Pseudomonas agar.....	22
Figura 14. Mecanismo general para degradación de colorantes azo (proceso anaerobio/aerobio), donde se observa la formación de aminas aromáticas utilizando m.o. anaerobios (Alabdrada et al, 2014).....	24
Figura 15. Degradación completa (mineralización) del colorante Mordant Orange por medio de un consorcio anaerobio (Razo-Flores et al, 1997).	24
Figura 16. Tinción de Gram de los medios especializados. A) Schaedler Agar, B) Standard Methods Agar (B1 color amarillo, B2 Blanco), C) Pseudomonas Isolation Agar	26
Figura 17. Crecimiento de los m.o, obtenidos de la parte media del reactor después de la operación del BER. A) Schanedler agar, B) Standard methods agar y C) Pseudomonas agar.	28
Figura 18. Crecimiento de los m.o., obtenidos de los electrodos. 1) Cátodo, 2) Ánodo. A) Schanedler agar, B) Standard methods agar y C) Pseudomonas agar.	29
Figura 19. Tinción de Gram de los medios especializados. A) Schaedler Agar, B) Standard Methods Agar, C) Pseudomonas Isolation Agar	32

Figura 20. BERs en empacados. A) BER 1 (distancia entre electrodos de 7.9 cm), B) BER 2 (distancia entre electrodos de 14 cm).	34
Figura 21. Efecto de la densidad de corriente eléctrica a una concentración de 100 ppm con una distancia entre electrodos de 7.9 cm.	35
Figura 22. Efecto de la densidad de corriente eléctrica en la eficiencia del BER a una concentración de 200 ppm y una distancia de electrodos de 7.9 cm.	36
Figura 23. Efecto de la concentración del BER sobre la eficiencia de decoloración.	37
Figura 24. Efecto de la densidad de la corriente eléctrica en la eficiencia del BER a una concentración de 100 ppm y una distancia entre los electrodos de 14 cm.	38
Figura 25. Efecto de la densidad de la corriente eléctrica en la eficiencia del BER a un a concentración de 200 ppm y una distancia entre electrodos de 14 cm.	39
Figura 26. Efecto de la concentración del BER sobre la eficiencia de decoloración a una distancia entre los electrodos de 14 cm.	41
Figura 27. Efecto de la densidad de corriente eléctrica evaluando la distancia entre los electrodos. A) BER 1 (distancia entre electrodos de 7.9 cm), B) BER 2 (distancia entre electrodos 14 cm).	43
Figura 28. Comportamiento del pH del BER a 100 ppm, a una distancia de electrodos de 7.9 cm.	45
Figura 29. Comportamiento del pH de un BER a 200 ppm, a una distancia de electrodos de 7.9 cm.	45
Figura 30. Comportamiento del pH del BER a 100 ppm, a una distancia de electrodos de 14 cm.	46
Figura 31. Comportamiento del pH del BER a 200 ppm, a una distancia de electrodos de 14 cm.	47
Figura 32. Curvas E(t) a un TRH de 0.5 h.	48
Figura 33. Curvas E(t) a un TRH de 1 h.	49
Figura 34. Espectros UV-vis del reactor con una distancia de electrodos de 7.9 cm, A) a un TRH 0.5 h; y B) un TRH 1 h a 200 ppm.	54
Figura 35 . Espectros UV-vis del reactor con una distancia de electrodos de 14 cm, A) a un TRH 0.5h; y B) un TRH 1h a 200 ppm.	55

Índice de Tablas

Tabla 1. BERs de una cámara con estimulación eléctrica aplicada.....	6
Tabla 2. Cinética de degradación de colorantes azo en BES.....	8
Tabla 3. Parámetros operacionales en el BER para una distancia de electrodos de 7.9 cm.	17
Tabla 4. Absorbancia máxima del colorante RR-272 a diferentes concentraciones.	18
Tabla 5. Absorbancia máxima del colorante azul lanasol 8G a diferentes concentraciones.	21
Tabla 6. Características de los BERs.....	33
Tabla 7. Parámetros adimensionales para el reactor 1 (distancia de electrodos de 7.9 cm).	49
Tabla 8. Cinética de decoloración del colorante RR-272 a una distancia entre los electrodos de 7.9 cm.	51
Tabla 9. Cinética de decoloración del colorante RR-272 a una distancia entre los electrodos de 14 cm.	52

Abreviaturas

TRH Tiempo de Residencia Hidráulico

BER Reactor Bioelectroquímico

BERs Reactores Bioelectroquímicos

BES Sistemas Bioelectroquímicos

Resumen

En este trabajo se evaluaron los parámetros de operación hidrodinámicos, electroquímicos y biológicos de los reactores bioelectroquímicos considerando dos tipos de sistemas basados en la separación de electrodos a dos distancias (7.9 y 14 cm). Para el sistema uno (distancia entre electrodos 7.9 cm) se variaron los tiempos de residencia hidráulicos (TRH de 0.5 y 1 h) y la densidad de corriente eléctrica (0, 0.217, 0.544, 1.088, 2.176 mA/cm²) donde se utilizó el colorante rojo reactivo 272 como colorante modelo a concentraciones de 100 y 200 ppm. En los resultados obtenidos se pudo observar que la eficiencia de este sistema (distancia de electrodos de 7.9 cm) sin la aplicación de la estimulación eléctrica es de 60.49 % y 66.83 % para un TRH de 0.5 y 1 h, respectivamente. Al aplicar la mínima densidad de corriente eléctrica (0.2176 mA/cm²) la eficiencia de este alcanza el 90.00 % para ambos TRH (TRH de 0.5 y 1 h) a concentraciones bajas (100 ppm) ya que al aumentar la concentración de 200 ppm la eficiencia máxima (90.00 %) solo se alcanza a un TRH de 1 h, aplicando la mínima densidad de corriente eléctrica (0.2176 mA/cm²) ya que para un TRH de 0.5 h esta eficiencia es cercana al 80.00 % aplicando cualquier estimulación eléctrica (0.217, 0.544, 1.088, 2.176 mA/cm²). Al aumentar la distancia entre los electrodos a 14 cm, la eficacia máxima (90.00 %) se alcanza aplicando una densidad de corriente eléctrica de 0.544 mA/cm², pero a concentraciones de 200 ppm a un TRH de 1h esta no se ve beneficiada. En lo que respecta a la caracterización hidráulica, el estudio de DTR (Distribución de los Tiempos de Residencia) muestra en ambos reactores (distancia entre electrodos de 7.9 y 14 cm) una mezcla de flujo entre flujo pistón y mezcla completa, los números adimensionales muestran que en estos hubo un flujo laminar (Reynolds) para ambos reactores (distancia entre sus electrodos de 7.9 y 14 cm) y TRH (TRH de 0.5 y 1 h). De acuerdo con los datos obtenidos, el transporte de masa es por convención (Péclet) y la dispersión (d) para el reactor con distancia entre sus electrodos de 14 cm fue moderada (TRH de 0.5 y 1h). Para el reactor bioelectroquímico con 7.9 cm para un TRH de 0.5 h, mientras que para un TRH de 1 h fue alta dispersión. Al terminar de operar los dos sistemas se realizó una siembra en placa para observar la viabilidad de los microorganismos y caracterizarlos para determinar su tipo de membrana en función de la Tinción de Gram.

1. Introducción

Los reactores bioelectroquímicos (BER) son una tecnología emergente con diversas aplicaciones. Dentro de sus múltiples aplicaciones se encuentra el tratamiento de aguas residuales de contaminantes recalcitrantes. Por su difícil remoción los colorantes azoicos son considerados contaminantes recalcitrantes (Chen et al., 2010). Estos compuestos se caracterizan por tener un grupo azo (-N=N-) (Shaul et al., 1991), y se encuentran principalmente en los efluentes de la industria textil (Stolz, 2001). Al ser desechados, provocan problemas estéticos y no permiten la penetración de la luz y la transferencia de oxígeno a los cuerpos de agua (Sun, 2009).

Diversos estudios han reportado la degradación de tales contaminantes utilizando estos sistemas. Mu (Mu et al., 2009) utilizó un BER de dos cámaras, donde la cámara uno (cámara catódica) fue inoculada con un consorcio anaerobio, para la decoloración del colorante naranja ácido 7 (AO7), por medio de reacciones de reducción. En la cámara dos (cámara anódica), se utilizó acetato, éste al oxidarse sirvió como transportador de electrones.

La transferencia de electrones es un factor importante en la degradación de colorantes azo, ya que estos interactúan con los colorantes para llevar a cabo las reacciones oxido/reducción. La reducción de colorantes produce la decoloración, formando aminas aromáticas (Chen et al., 2010), ésta se lleva a cabo dependiendo cuantos grupos azo tenga la molécula, considerando que cada grupo azo requiere cuatro electrones para su rompimiento (Liu et al., 2009). En la oxidación las aminas aromáticas son degradadas hasta su mineralización. Por ejemplo, Khan et al. (2015) utilizó un BER con un consorcio de bacterias metanogénicas para la degradación de los colorantes azul ácido R (ANR) y naranja reactivo 16 (RO 16), donde se observó la degradación total del colorante hasta su mineralización, produciendo CO₂ y CH₄ como producto final.

Otros factores importantes en la implementación de los BER son: la cantidad de energía (voltaje, corriente o densidad de corriente) aplicada (Cao et al., 2017), la distancia entre electrodos (Cui et al., 2014), la posición de los electrodos (Cui et al., 2016), el material de los electrodos (Cao et al., 2017), los TRH (Jiang et al., 2016), el uso de una fuente externa de carbono (Cao et al., 2010), así como el uso de mediadores redox (transportadores de electrones) (Cao et al., 2010; Cardenas-Robles et al., 2013; Gonzalez-Gutierrez, 2015).

En estudios previos (Martínez, 2011), se estudió un BER de flujo ascendente, con carbón activado como soporte de microorganismos, en cual se evaluaron dos TRH (una y cuatro h) y el efecto de la densidad de corriente sobre estos, donde a un TRH 4 h no hubo un cambio significativo en la eficiencia de degradación del BER, de acuerdo a Jiang et al (2016), el uso de la estimulación eléctrica solo es eficiente a TRH cortos, es por esto que el presente trabajo se evaluaron los TRH a tiempos cortos, además de variar la densidad de corriente eléctrica para encontrar los parámetros óptimos de operación del BER.

2. Hipótesis

La estimulación electroquímica a bioreactores permite acortar el tiempo de residencia de los procesos de degradación de contaminantes complejos (colorantes azo), mejorando la eficiencia de degradación. Además de la estimulación electroquímica las variables como: la distancia entre electrodos, concentración y TRH afectan la eficiencia del reactor y la hidrodinámica, en base a esto se deben de determinar los parámetros de operación, más adecuados para el reactor.

3. Objetivos

3.1 General:

Determinar los parámetros operacionales de un reactor bioelectroquímico microbiano de flujo continuo, para determinar las condiciones óptimas de operación evaluando la distancia entre electrodos y la viabilidad de los microorganismos en el sistema.

3.2 Específicos:

- Caracterizar los microorganismos mediante tinción de Gram, antes y después de la operación de los bio-electro-reactores y evaluar su viabilidad.
- Determinar las condiciones idóneas de operación en base a los resultados obtenidos, analizando la cinética e hidrodinámica, la densidad de corriente eléctrica aplicada, variando la distancia entre electrodos y flujo en el reactor.
- Determinar los números adimensionales, evaluando a distinta longitud de reacción (distancias de electrodo).

4. Marco Teórico

4.1 Reactores Bioelectroquímicos

Los tratamientos biológicos convencionales para el tratamiento de aguas residuales presentan una desventaja, ya que son muy lentos y, por tanto, requieren tiempos de residencia altos para llevar a cabo la degradación del contaminante (Zee et al., 2005). Los reactores bioelectroquímicos podrían contribuir a solucionar esta problemática, ya que estos permiten la transformación de reactivos con un cambio de energía en el sistema (Barrera, 2014). Estas transformaciones las llevan a cabo los microorganismos contenidos en el reactor (Revelo et al., 2013), al aplicar una densidad de corriente eléctrica, se estimula su metabolismo, aumentando la degradación en tiempos más cortos con mayor eficiencia (Martínez, 2011).

La configuración de los electrodos de los reactores bioelectroquímicos dependen de la aplicación, es decir de la naturaleza química del contaminante que se requiere tratar, tomando en cuenta las propiedades de oxidación/reducción de éste (Mu et al., 2009; Wang et al., 2015). Un ejemplo de lo anterior se presenta en la degradación de hidrocarburos (Viggi et al., 2015), donde la degradación se lleva a cabo en el ánodo (reactor de dos cámaras), mientras que en la reducción de 2,4-dinitroclorobenceno (DNCB) (Jiang et al., 2016) y la eliminación de p-nitrofenol (She et al., 2014), es una configuración cátodo-ánodo.

En la degradación de colorantes azo se presenta una configuración cátodo-ánodo (Cui et al., 2016) en reactores de una cámara con flujo continuo (Cao et al., 2017). En trabajos anteriores (Martínez, 2011) se construyó un BER de una cámara para la degradación de colorante rojo reactivo 272, con la configuración antes mencionada, donde se presentaron eficiencias superiores al 95.00%, aplicando una densidad de corriente eléctrica de 0.045 mA/cm², la aplicación de la estimulación eléctrica es un parámetro operacional importante, ya que aumenta la eficiencia en estos sistemas. Otro ejemplo de la estimulación es en la remoción p-nitrofenol (She et al., 2014), donde la eficiencia del reactor sin la estimulación eléctrica fue de 62.10 %, pero al aplicar una corriente de 8 mA esta aumentó a 90.20%. En la Tabla 1 se muestran estos y otros ejemplos del efecto de la estimulación eléctrica en reactores de una cámara.

Tabla 1. BERs de una cámara con estimulación eléctrica aplicada.

Aplicación	Estimulación Eléctrica	Eficiencia Máxima	Reactor	Referencia
Remoción p-nitrofenol	0-8 mA	90.20%		(She et al., 2014)
Colorante Azo (Amarillo de Alizirina)	0.5 V	90.78 ±5.95 %		(Cui et al., 2016)
Colorantes azo (Naranja Ácido 7) AO7	0.7 V	Catodo-66.5 % Anodo 80.4 % Aerobio 91.2 %		(Pan et al., 2017)
Colorantes azo (Rojo Reactivo Brillante) X-3B	0-2 V	82.04 %		(Cao et al., 2017)
Colorante azo (Rojo reactivo 272)	5 mA (0.045 mA/cm ²)	95±3.5 %		(Cardenas-Robles et al., 2013)

Además de los parámetros electroquímicos aplicados, los parámetros hidráulicos y cinéticos deben analizarse en la operación de reactores bioelectroquímicos, ya que a través de ellos se puede incrementar la eficiencia en los procesos.

4.2 Parámetros Operacionales

4.2.1 Parámetros hidráulicos

La caracterización hidrodinámica permite conocer la distribución de tiempos de residencia (DTR) del reactor. El análisis de esta se efectúa a través de la curva de distribución que se obtiene al medir con un pulso trazador inyectado, con el fin de identificar el tipo de flujo (flujo pistón y mezcla completa) y el TRH real (Vallejos et al., 2003). Los TRH cortos en los BERs son afectados por la estimulación eléctrica aplicada, ya que en estudios previos (Jiang et al., 2016) se estudió un BER para la reducción de 2,4-dinitroclorobenceno (DNCEB) donde se variaron los TRH en 2, 3, 4 y 5 días aplicando un voltaje 1.4 V, se obtuvo la misma eficiencia (eficiencia de reducción de 2,4-dinitroclorobenceno) para los TRH de 2, 3, 4 pero a tiempos largos (TRH 5 d) esta eficiencia no es afectada por la estimulación eléctrica, ya que se obtiene la misma eficiencia que un reactor sin estimular. Aunque la eficiencia de reducción en los BERs a TRH largos no se ve afectada, la degradación de subproductos si es afectada ya que a TRH largos la eliminación de estos aumenta. Esto fue reportado por Hao (Hao et al., 2013) quien utilizó un BER para la desnitrificación, aplicando 40 mA de corriente variando los TRH en 5, 7, 10, y 12 h y el TRH el en cual había más degradación de subproductos fue a un TRH de 10 h, ya que a un TRH mayor presentó acumulación de subproductos (Nitratos y Nitritos). Por lo que se concluye que al aplicar la estimulación eléctrica a TRH cortos, mejora la eficiencia en la degradación parcial de los BERs, pero se tiene que tomar en cuenta la formulación de subproductos.

4.2.2 Parámetros Cinéticos

La cinética de degradación de colorantes azo, presenta una cinética de primer orden, la Tabla 2 muestra algunos ejemplos. Cabe destacar que la cinética representa una decoloración (reducción de la molécula) y no representa una degradación total del colorante (Eustace et al., 2012; Kong et al., 2013; Kong et al., 2015; Yang et al., 2016;).

Tabla 2. Cinética de degradación de colorantes azo en BES

Colorante	Concentración	Operación del reactor	Constante, K (h ⁻¹)	Referencia
Naranja de Metilo (MO)	100 ppm	-0.4 V	0.207±0.042	(Yang et al., 2016)
		-0.6 V	0.279±0.005	
		-0.8 V	0.503±0.001	
Naranja Ácido 7 (AO7)	100 ppm	0 V	0.01	(Kong et al., 2015)
		0.5 V	0.54	
Naranja Ácido 7 (AO7)	35 ppm	Sistema MFC	0.709	(Eustace et al., 2012)
	350 ppm		0.05	
Naranja Ácido 7 (AO7)	0.14 mM	Sistema MFC	0.85	(Kong et al., 2013)
	0.20 mM		0.75	
	0.57 mM		0.43	
	0.71 mM		0.30	
	1.00 mM		0.21	
	2.00 mM		0.19	

En este trabajo se evaluó la cinética con un orden 1.

4.3 Distancia entre los electrodos

El aumento en la distancia entre los electrodos provoca una mayor resistencia (Kong et al, 2013). Por lo tanto, se presenta una problemática al escalar un BER, ya que un óptimo funcionamiento de este sería a una pequeña distancia entre el ánodo y el cátodo. Para evaluar la distancia entre electrodos y poder escalar el proceso se han reportado varios trabajos, una de ellas fue lo presentado por Cui et al. (2014), en el cual se utilizó un BER para la degradación del colorante amarillo de alizarina con un sistema de 4 pares de electrodos, separados a una distancia de electrodos entre 32 y 35 cm (Figura 1). Otra solución al incrementar la distancia entre los electrodos es aumentar la magnitud en la estimulación eléctrica ya que en estudios previos se construyó un BER para la desnitrificación el cual, incrementaron la distancia entre electrodos de 7.5 cm a 12.5 cm aumenta la corriente eléctrica de 40 mA a 60 mA, respectivamente (Hao et al., 2013; Hao et al., 2016).

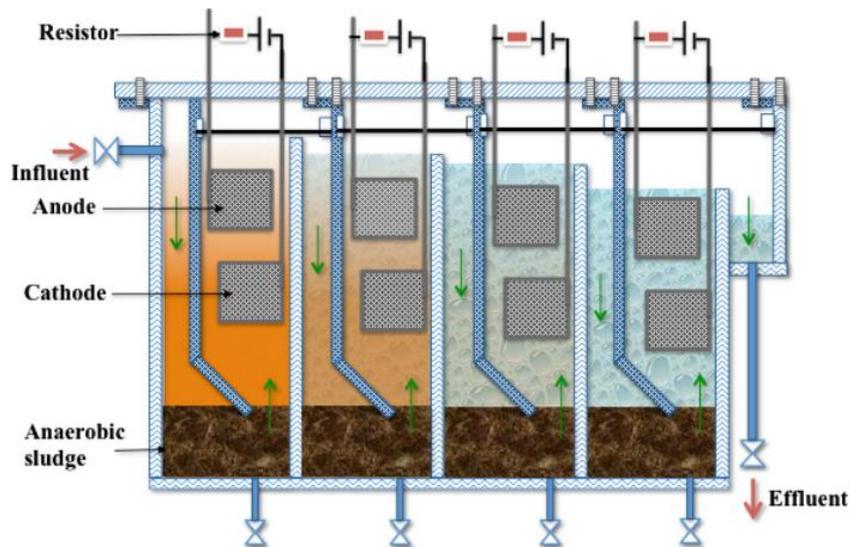


Figura 1. BER con un sistema de cuatro electrodos (Cui et al., 2014).

5. Metodología

5.1 Colorante Azo

El colorante rojo reactivo 272 (RR-272) fue usado como colorante modelo, este se obtuvo de una industria textil lanera ubicada en Soria, Guanajuato, México. La estructura química del colorante se observa en la Figura 2.

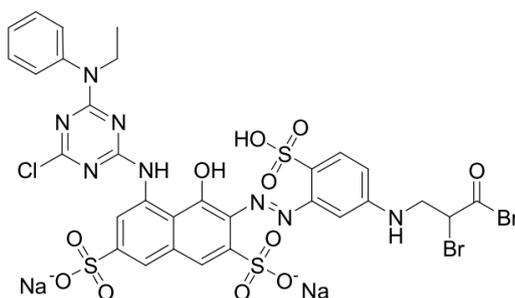


Figura 2. Estructura del colorante RR-272 (González-Gutiérrez, 2006)

5.2 Microorganismos

Se adaptó a la degradación del colorante rojo reactivo 272 un consorcio microbiano proveniente de un digestor anaerobio, para ello se utilizó el 20% de lodos, agregando una concentración de RR-272 a 500 ppm, además de 1 g de extracto de levadura y dextrosa. El colorante se agregó por cuatro semanas a la misma concentración. Adaptados los microorganismos se llevó a cabo el crecimiento exponencial (incremento en la biomasa) de estos, para inocular el reactor. Para crecimiento exponencial se tomaron 5 mL de los microorganismos adaptados, realizando tres resiembras. Cada resiembra se realizó a una temperatura de 30 °C por 72 h (Cárdenas-Robles, 2011).

5.3 Caracterización de los microorganismos

La caracterización del consorcio microbiano se realizó, utilizando medios nutritivos especializados, los cuales fueron:

- Schaedler Agar
- Standard Methods Agar
- Pseudomonas Isolation Agar

El Schaedler Agar es un medio para el crecimiento de microorganismos anaerobios tales como lactobacilos, estreptococos, clostridios y bacteroides. Para su preparación se disolvió 10.475 g del agar en 250 mL de agua destilada, esterilizado a una presión de 20 PSI y 120°C durante 20 min.

El Standard Methods Agar es un medio para el crecimiento de microorganismos provenientes de las aguas residuales. Para su preparación se pesó 5.875 g del agar, se disolvió en 250 mL de agua destilada, posteriormente se esterilizó a una presión de 20 PSI y 120°C durante 20 min.

El Pseudomonas Isolation Agar se utilizó para el crecimiento de Pseudomonas. Para su preparación se pesó 11.25 g del agar, se disolvió en 250 mL de agua, posteriormente se esterilizó a una presión de 20 PSI y 120°C durante 20 min. En la Figura 3 muestra el procedimiento de lo antes mencionado.

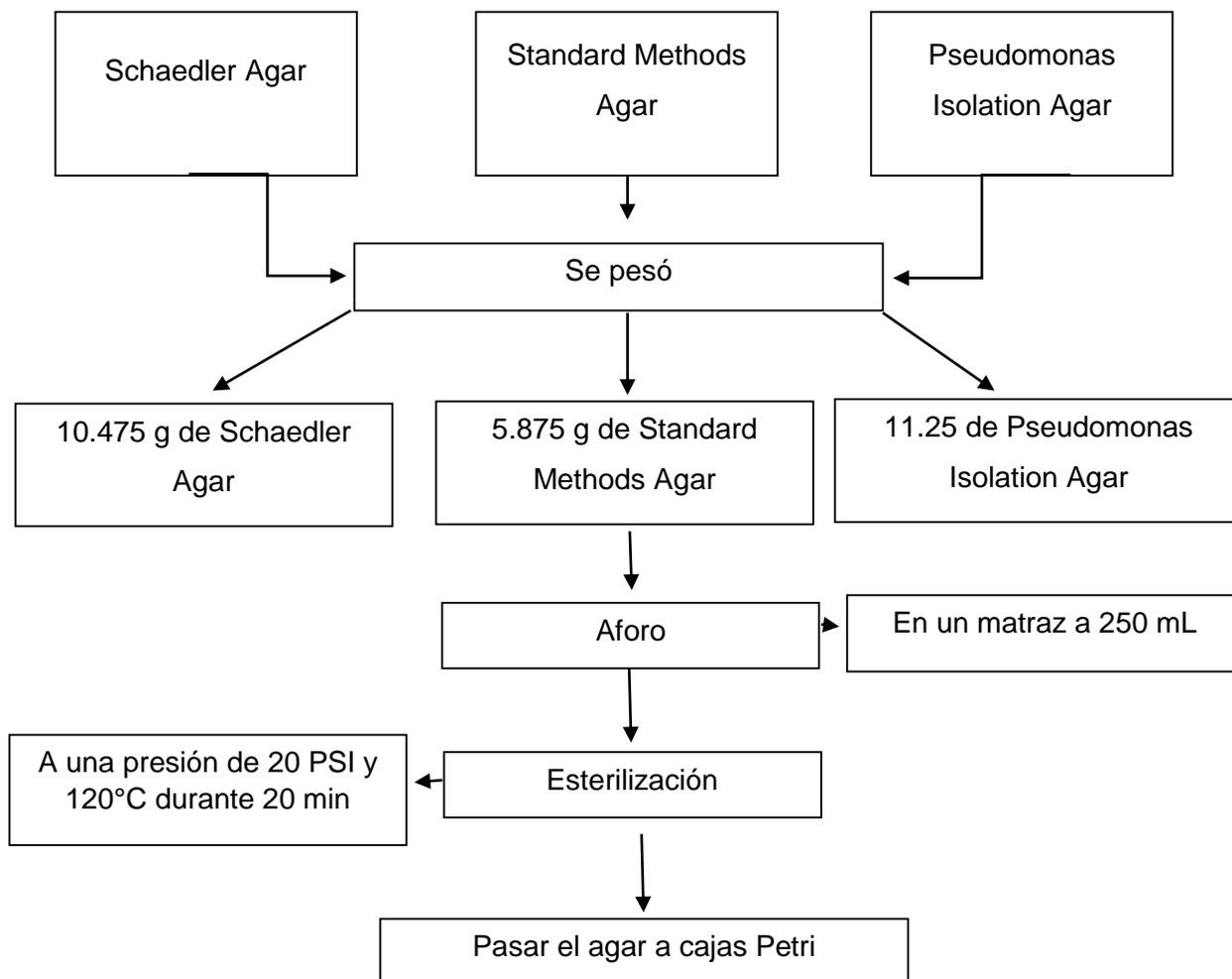


Figura 3. Procedimiento para la preparación de los medios de crecimiento especializados.

Vertido el agar en las cajas Petri, se tomó una alícuota de 10 μ L de los lodos adaptados a la degradación del colorante rojo reactivo 272, para realizar una siembra en los medios de cultivo especializado por triplicado. La siembra se llevó a cabo en una campana de extracción marca Lumistell modelo LH120, utilizando la técnica de siembra en placa por extensión superficial.

Después las cajas Petri se introdujeron en una incubadora marca Felisa modelo FE-132D, en la cual permanecieron 48 horas para su crecimiento. Pasando las 48 horas se realizó la técnica de tinción de Gram.

El procedimiento para la tinción de Gram fue el siguiente:

1. Se preparó y fijo un frotis de la muestra por analizar, pasándola suavemente en la flama de un mechero.
2. Se cubrió con colorante de violeta de Genciana. Esperar 5 minutos.
3. Se escurrió el colorante de violeta de Genciana sin enjuagar y se cubrió con la solución Gram Yodo. Esperar 5 minutos.
4. Se lavó con solución de Alcohol acetona hasta la decoloración.
5. Se sacudió para evaporar el resto del alcohol.
6. Se cubrió la muestra con safranina.
7. Se lavó repetidas ocasiones con agua desionizada hasta su decoloración.
8. Se secó y se observó la muestra en el microscopio marca OLYMPUS modelo U-CMAD3 con software de análisis de imagen.

Para ver la viabilidad de los microorganismos después de la operación del BER, se tomó una muestra (biomasa adherida sobre el carbón activado y los electrodos) de lodos del área del cátodo, ánodo y del centro del reactor. Estas muestras se tomaron para los dos BERs (distancia de electrodos de 7.9 cm y 14 cm). Repitiendo el procedimiento antes mencionado.

5.4 Ensamblaje del BER

El reactor se formó con tres unidades de acrílico, cada una tiene una longitud de 7.9 cm de largo. En la Figura 4 se muestra la unidad del reactor.



Figura 4. Unidad básica del BES.

El ensamblaje se realizó uniendo las tres unidades mediante tornillos, la figura 5 muestra las tres unidades del BES, donde se puede apreciar una separación entre las unidades. La separación C y la separación A, son espacios para los electrodos, la C es para el cátodo y la A para el ánodo (Figura 5). Los electrodos son circulares de malla de acero inoxidable 304 L (Figura 6).

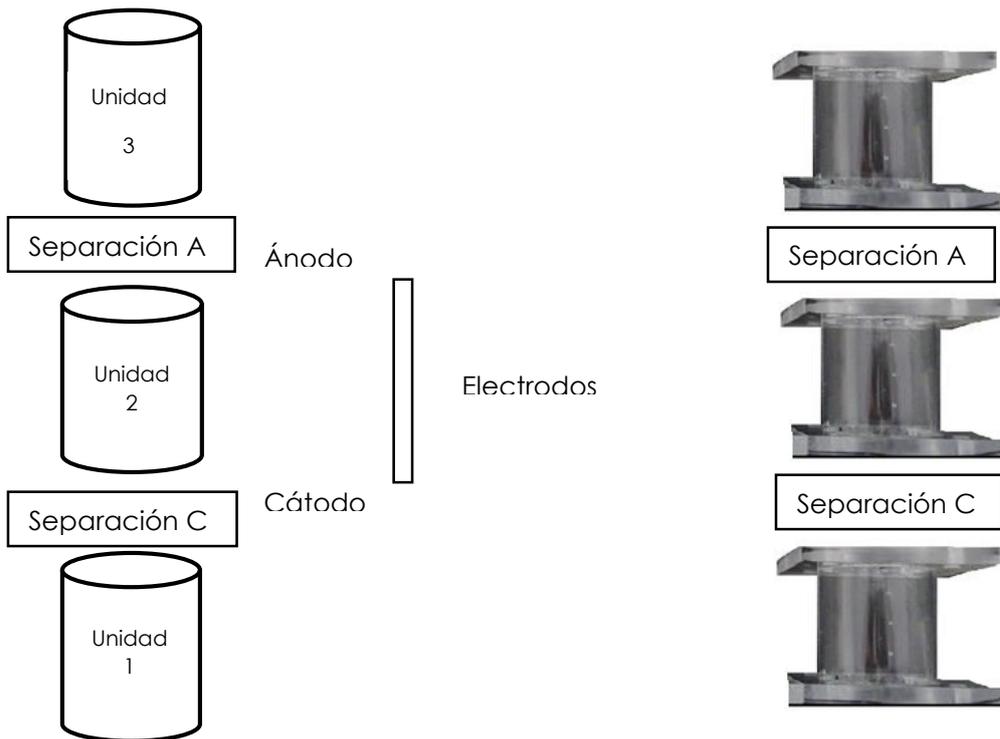


Figura 5. Unidades para el ensamblaje del BES.

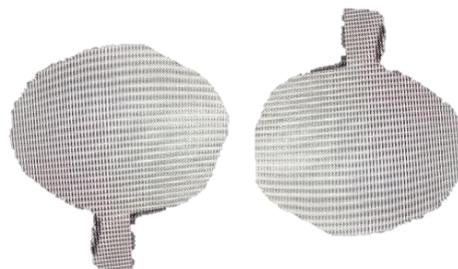


Figura 6. Electrodos de malla de acero inoxidable 304 L.

Se varió la distancia entre los electrodos, para ello la unidad 2 cambio de tamaño en 7.9 cm y 14 cm tal como se muestra la figura 7.

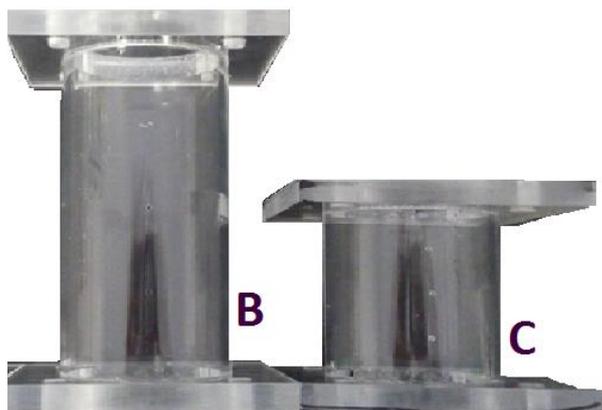


Figura 7. Distancia entre los electrodos, donde B=14 cm y C=7.9 cm.

Ensamblado el reactor a diferentes tamaños (Distancia entre los electrodos) se sujetó a un soporte universal con pinzas de manera vertical y se inoculó, haciéndole pasar una solución de medio mineral y colorante rojo reactivo 272 (100 ppm) a un flujo de 20 mL/min, esta solución se cambió a diario durante cinco días, después de cumplir los cinco días se recirculó rojo reactivo 272 (flujo de 20 mL/min). Los reactores se empacaron con carbón activado, que sirvió como soporte de microorganismos. El carbón activado se saturó con soluciones de colorante, dextrosa y extracto de levadura, a una concentración de 1 g/L, cada una. Para la inoculación del reactor se dispuso de una bomba peristáltica (MASTER FLEX, 7752150), manguera flexible (MASTER FLEX, 06409-24), plancha de agitación magnética (IKA, C-MAG HS7) y un contenedor.

Previo a la inoculación, se determinó el volumen de los reactores y la porosidad del lecho (Ecuación 1), además de ajustar los TRH (Ecuación 2). Para ello se hizo pasar a través de dichos reactores un flujo de agua. El control para los TRH se hizo manualmente manipulando la manguera del efluente, para ello se redujo la circunferencia de está colocando una manguera interna y abrazaderas.

$$V = (TRH) * (Q) \quad (1)$$

Donde:

V = Volumen promedio del reactor (mL)

TRH = Tiempo de Residencia hidráulico (min)

Q = Flujo (mL/min)

$$\varepsilon_L = \left(\frac{V_V}{V_L} \right) \quad (2)$$

Donde:

ε_L = Porosidad del lecho

V_V = Volumen sin empacar (mL)

V_L = Volumen del lecho empacado (mL)

5.5 Operación del reactor

La operación del BES se realizó variando los TRH (Tiempos de Residencia Hidráulica) y la densidad de corriente eléctrica. Para los TRH se varió en dos niveles y la densidad de corriente eléctrica en cuatro, a una concentración de 100 y 200 ppm, esto para encontrar los parámetros óptimos de operación. La Tabla 3, muestra los TRH y la densidad de corriente eléctrica aplicada, para una distancia de electrodos de 7.9 cm. Al aumentar la distancia de los electrodos a 14 cm, la densidad de corriente eléctrica solo se varió en dos niveles (0.217 y 0.544 mA/cm²). Esto de acuerdo a los resultados obtenidos del primer reactor (distancia entre electrodos de 7.9 cm).

Tabla 3. Parámetros operacionales en el BER para una distancia de electrodos de 7.9 cm.

Parámetro	Variación
TRH (h)	0.5,1
Densidad de corriente eléctrica (mA/cm ²)	0, 0.217, 0.544, 1.088, 2.176

Para calcular la concentración del colorante RR-272 a la entrada y salida de los reactores (eficiencia) se determinó la longitud de onda máxima a la cual absorbe este colorante, para ello se preparó una solución de RR-272 a 300 ppm. Conocida la máxima absorbancia del colorante se realizó una curva de calibración, en la cual se midió la absorbancia a 25, 50, 75, 100 y 300 ppm. Para ello se utilizó un equipo UV-VIS marca SHIMADZU modelo uv-2600 120v. La máxima absorbancia se registró a 505 nm (Figura 8).

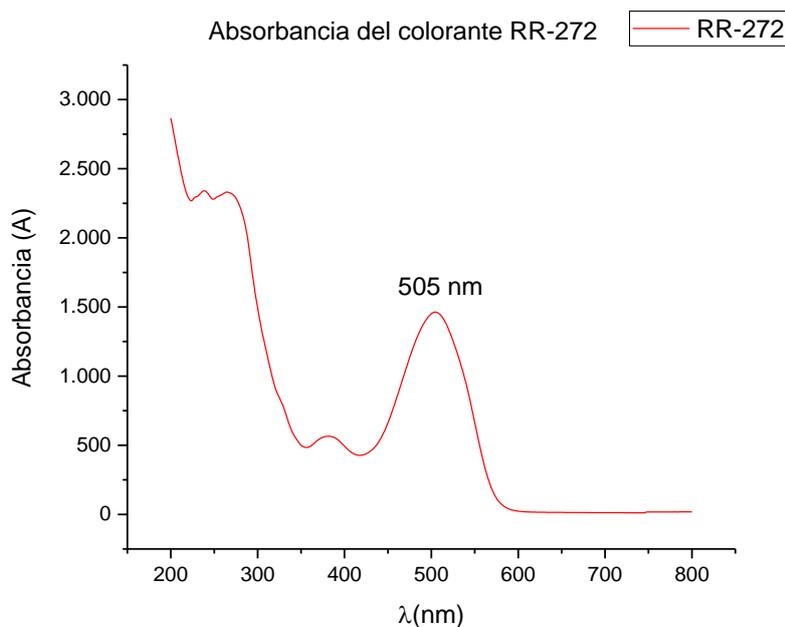


Figura 8. Espectro UV-Vis para el colorante RR-272.

La Tabla 4 muestra λ_{\max} del colorante RR-272 a diferentes concentraciones en la Figura 9 muestra el espectro de absorción de este en las diferentes concentraciones.

Tabla 4. Absorbancia máxima del colorante RR-272 a diferentes concentraciones.

Concentración (ppm)	Absorbancia (A)
0	0
25	0.348
50	0.673
75	1.036
100	1.406
300	4.186

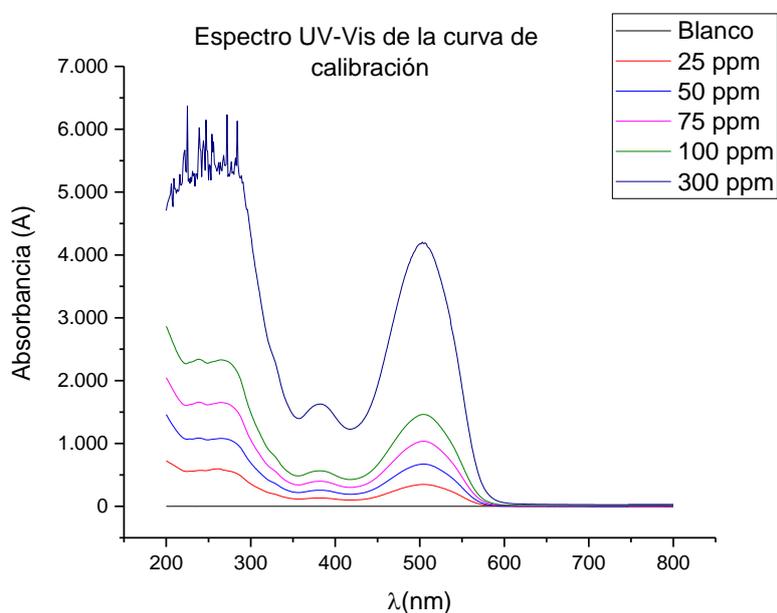


Figura 9. Espectro de absorción UV-VIS del colorante RR-272 a diferentes concentraciones.

La curva de calibración elaborada para la cuantificación de colorante RR-272 se presenta en la figura 10, en la cual se tiene un coeficiente de correlación de 0.9999.

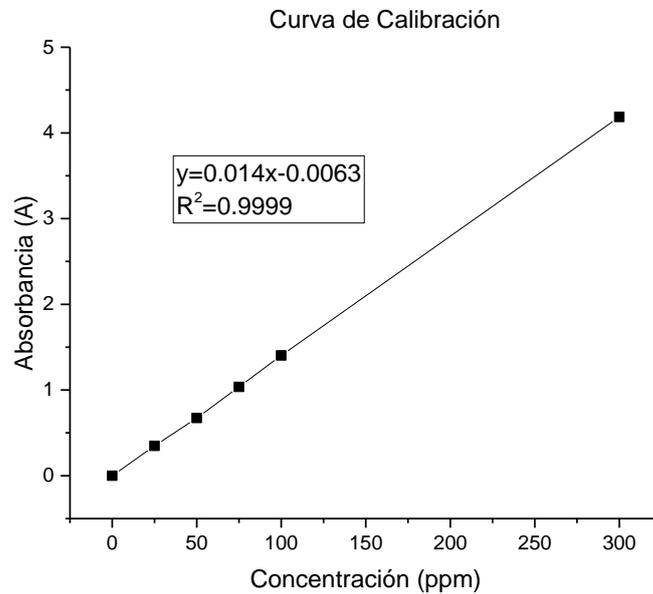


Figura 10. Curva de calibración para la cuantificación del colorante RR-272.

5.6 Cálculo de parámetros hidráulicos

El estudio hidráulico describe el comportamiento y la distribución del flujo en los reactores, para realizar este estudio se inyectó un pulso trazador (colorante Azul Lanazol 8G) que duró 2 min. Pasados los 2 min, la manguera de inyección fue introducida a un contenedor con agua (Martínez, 2011). Este experimento se hizo tanto para un TRH = 0.5 h y TRH = 1 h, en ambos reactores (distancia entre electrodos de 7.9 y 14 cm). En el instante en el que se inyectó al trazador, también se comenzó con una etapa de muestreo en el efluente cada 15 min. A dichas muestras se les determinó su absorbancia en un espectrofotómetro UV/Vis.

El espectro UV-Vis del colorante azul lanasol 8G muestra la máxima absorbancia a 667 nm (Figura 11). Una vez determinada la máxima absorbancia del colorante Azul lanasol 8G se realizaron cinco soluciones a 3, 6, 9, 12 y 15 ppm (Tabla 5), para realizar la curva de calibración. Posteriormente se registró su absorbancia (667 nm), se hizo la curva de calibración (Figura 12) del colorante, la cual presentó un factor de correlación del 0.9972, esta nos permitió calcular la concentración del trazador (colorante azul lanasol 8G) a la salida del reactor, valor requerido para los estudios de DTR.

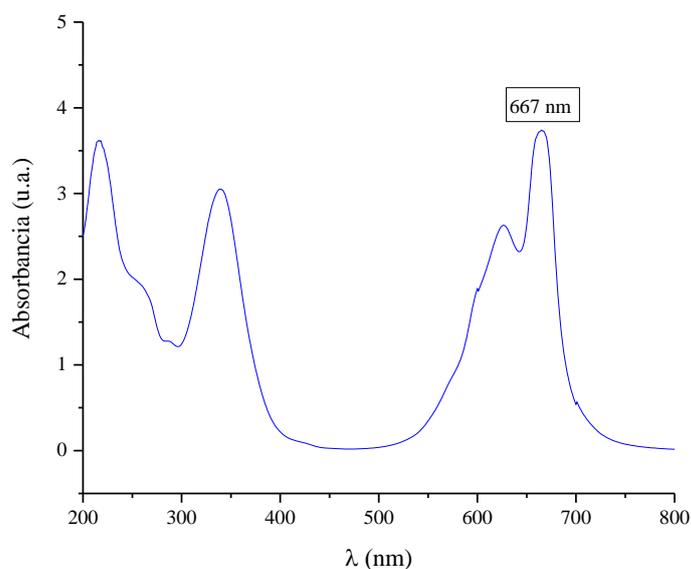


Figura 11. Espectro de absorbancia UV-Vis para el colorante azul lanasol 8G.

Tabla 5. Absorbancia máxima del colorante azul lanasol 8G a diferentes concentraciones.

Concentración (ppm)	Absorbancia (A)
0	0
3	0.261
6	0.589
9	0.837
12	1.095
15	1.322

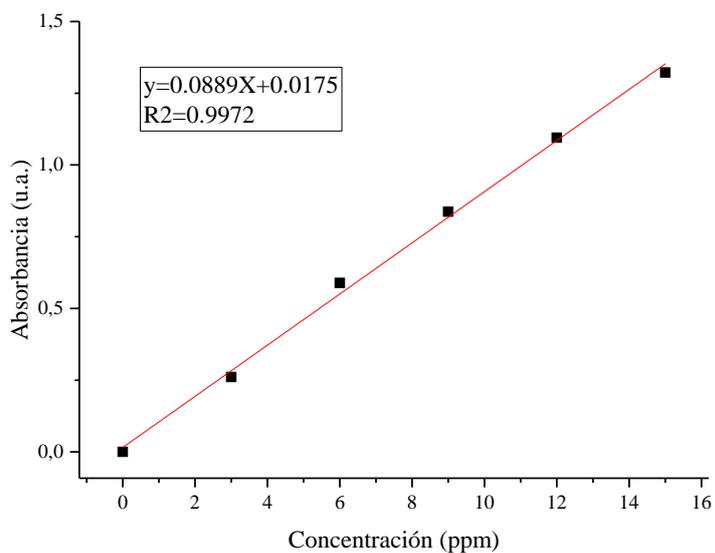


Figura 12. Curva de calibración para la cuantificación del colorante azul lanasol 8G.

6. Resultados

6.1 Caracterización de Microorganismos

El crecimiento de los microorganismos en los medios de cultivo especializados (Schanedler agar, Standard methods agar y Pseudomonas agar) se muestran a continuación.

En el Schanedler agar medio especializado en microorganismos anaerobios hubo crecimiento, también se observó que la morfología de estos es puntiforme y las colonias son de color blanco (Figura 13 A). En el standard methods agar se observan dos tipos de colonias, una de color amarillo y otra de color blanco, ambas son circulares (Figura 13 B). En el Pseudomonas agar hubo crecimiento, las colonias obtenidas fueron pequeñas bolas blancas de forma circular. La Figura 13 C muestra la morfología de las colonias obtenidas en el Pseudomonas agar, que probablemente corresponden con el género *Pseudomonas*.

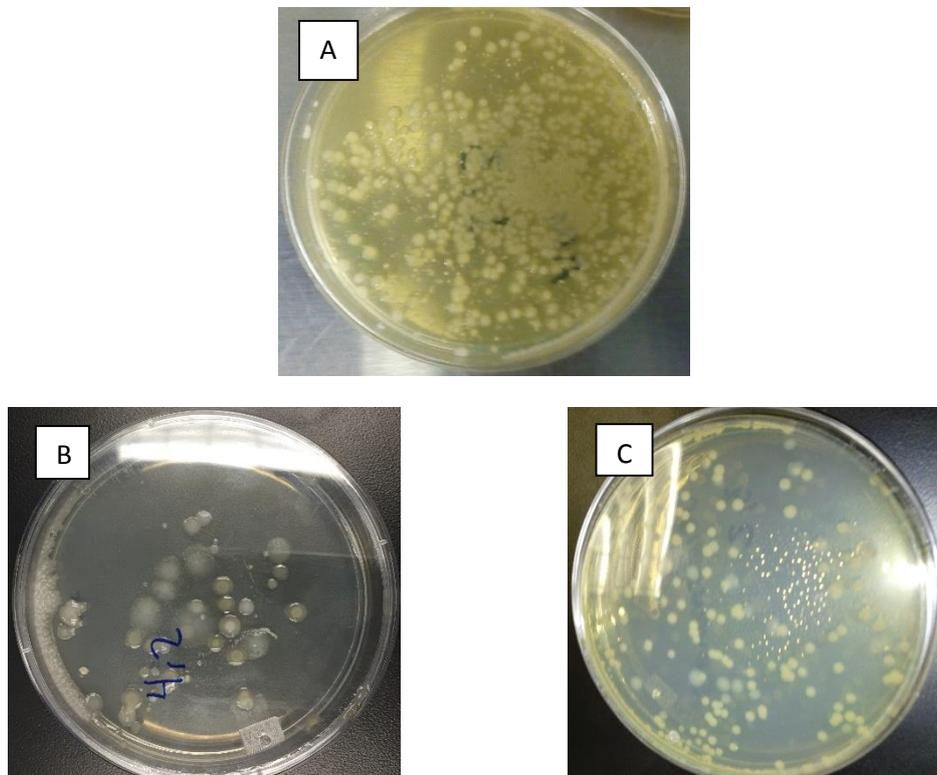


Figura 13. Colonias obtenidas en los medios de cultivo especializado. A) Schanedler agar, B) Standard methods agar y C) Pseudomonas agar

Los microorganismos anaerobios reducen a los colorantes azo, es decir rompen la molécula (enlace azo) por medio de transporte de electrones, formando compuestos tóxicos como las aminas aromáticas (Figura 14) (Alabdrada et al., 2014). Las aminas aromáticas no se pueden degradar por medio de microorganismos anaerobios ya que los grupos amino concentran electrones en el anillo, que interfiere en gran medida con las estrategias nucleofílicas de degradación de compuestos aromáticos utilizado por microorganismos anaeróbicos (Razo-Flores et al., 1997). No obstante, en estudios previos (Razo-Flores et al., 1997) han demostrado que algunos colorantes azo son degradados hasta su mineralización total (eliminación de las aminas aromáticas) utilizando microorganismos anaerobios sin la necesidad de un post-tratamiento, esto es debido a que las aminas aromáticas con sustituyentes carboxi, hidroxilo, y metoxi son potencialmente mineralizables. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la degradación colorante Naranja de Mordant, donde se utilizó un consorcio de lodos anaerobios, el cual fue degradado hasta su mineralización (Figura 15), la degradación de los subproductos (aminas aromáticas) fueron atribuidas a los sustituyentes (carboxi y hidroxilo) de las aminas aromáticas que fueron mineralizados por bacterias metanogénicas (Razo-Flores et al., 1997).

La degradación total por medio de microorganismos anaerobios del colorante RR-272 de acuerdo al párrafo anterior es difícil ya que el colorante no presenta en su estructura molecular sustituyentes carboxi, hidroxilo y metoxi, pero no se tiene conocimiento de los subproductos que se formen ante la reducción de este.

Otros microorganismos de suma importancia encontrados en los medios de crecimiento especializados son las colonias de *Pseudomonas*, ya que estos son microorganismos facultativos y reguladores redox (Hou et al., 2010) por lo tanto, pueden romper el grupo azo y consumir la materia orgánica presente hasta su mineralización.

La tinción de Gram sirvió caracterizar las colonias obtenidas en dos grandes grupos, correspondientes con bacterias Gram-Positivas (Violetas) y las Gram-Negativas (Rosas). La mayoría las muestras de los agares aislados pertenecen al grupo de las bacterias Gram-Negativas (Figura 16), excepto el standard methods agar donde hay de los dos tipos de bacterias, y sus características son las siguientes;

- Bacteria Gram-Negativa:

Pared interna de 2-7 nm (grosor) de peptidoglicanos y pared externa de 7-8 nm (grosor) compuesta por lípidos, proteínas y lipo- polisacaridos. Puede haber una tercera pared exterior de proteínas.

- Bacteria Gram-Positiva:

Una pared homogénea de 20-80 nm (grosor) compuesta principalmente por peptidoglicanos (González-Gutiérrez, 2006).

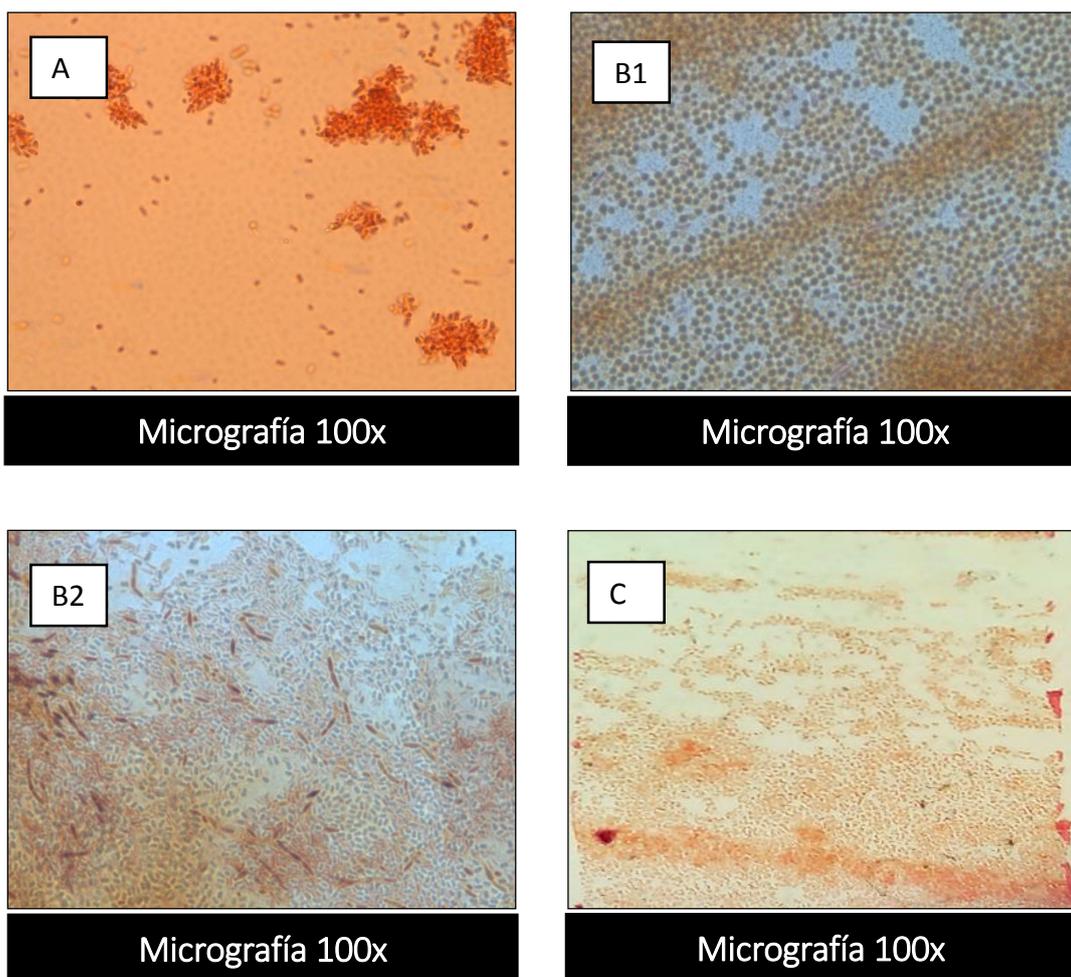


Figura 16. Tinción de Gram de los medios especializados. A) Schaedler Agar, B) Standard Methods Agar (B1 color amarillo, B2 Blanco), C) Pseudomonas Isolation Agar.

También en la figura 16 se puede observar que los microorganismos en el Schaedler Agar (16 A) son cocos, mientras que el Isolation agar (16 B1 y B2), son cocos bacilos y en Pseudomonas Agar bacilos.

6.1.1 Microorganismos en el reactor 1 y 2 (distancia entre electrodos de 7.9 cm y 14 cm).

Para medir la viabilidad de los microorganismos después de la operación de los BERs, se realizó una siembra en placa en la cual se tomó una muestra de lodos de los electrodos y otro de la parte media del reactor exactamente a una altura de 4 cm a partir del cátodo, para el reactor 1 (distancia de electrodos de 7.9 cm), para el reactor 2 fueron 7 cm arriba del cátodo (distancia entre electrodos de 14 cm).

En la Figura 17 se muestran los resultados de la siembra en placa de los microorganismos obtenidos de la parte media de los BERs 1 y 2 (distancia entre electrodos de 7.9 cm y 14 cm) mientras que en la Figura 18 se muestran las colonias obtenidas de la siembra en placa de los electrodos. En ambas figuras se observa el crecimiento de los microorganismos en los tres agares de crecimiento especializado esto indica que estos se pudieron adaptar a la corriente eléctrica después de la operación de los BERs.

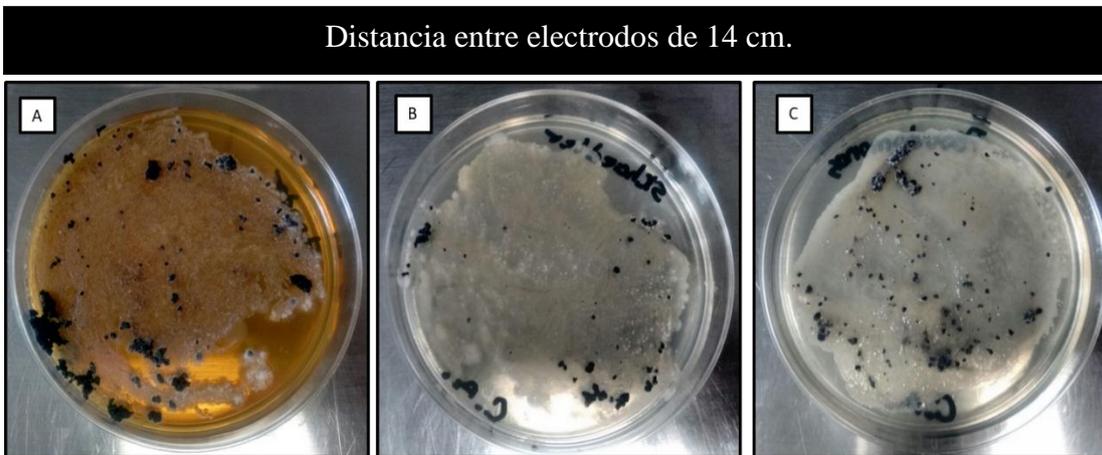
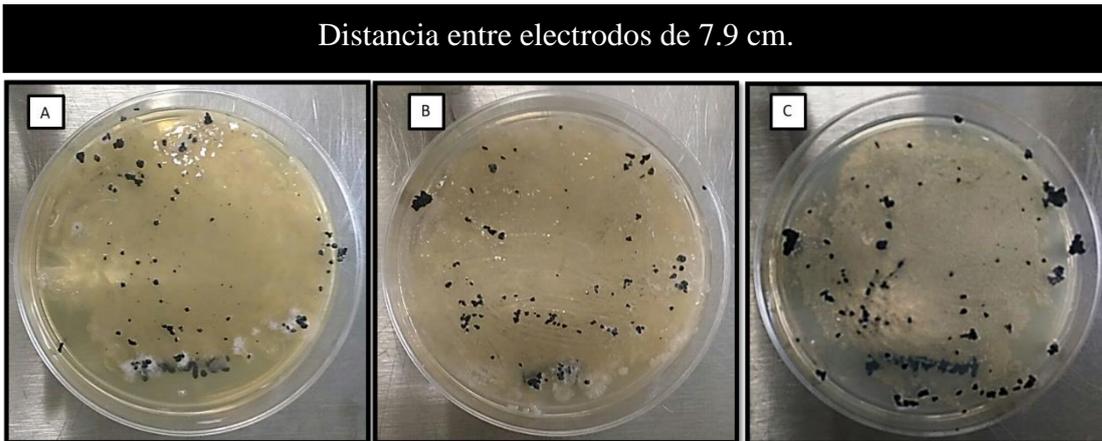
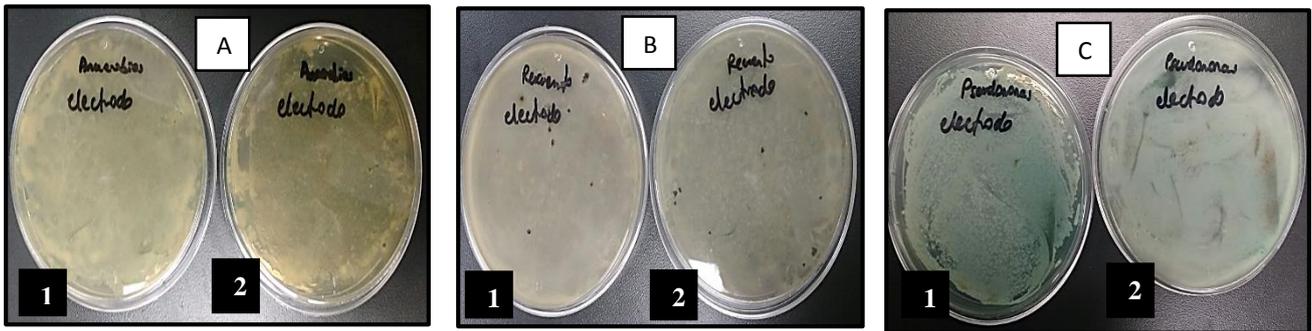


Figura 17. Crecimiento de los microorganismos, obtenidos de la parte media del reactor después de la operación del BER. A) Schanedler agar, B) Standard methods agar y C) Pseudomonas agar.

Distancia entre electrodos de 7.9 cm.



Distancia entre electrodos de 14 cm.

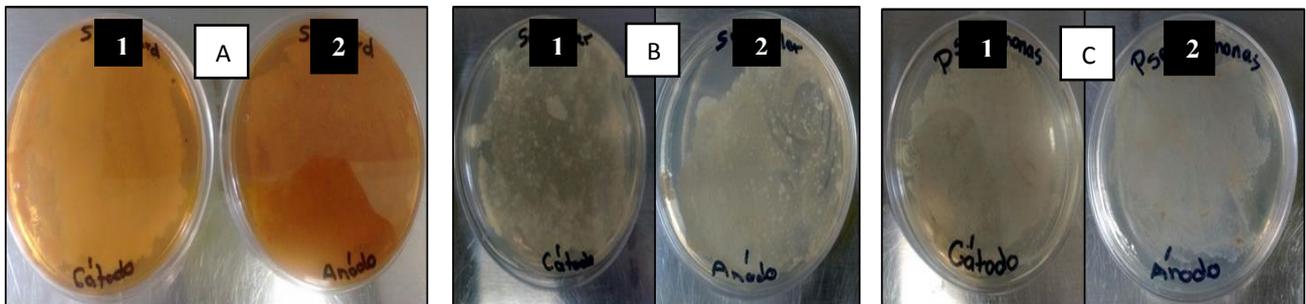


Figura 18. Crecimiento de los microorganismos, obtenidos de los electrodos. 1) Cátodo, 2) Ánodo. A) Schaedler agar, B) Standard methods agar y C) Pseudomonas agar.

Aunque los microorganismos se pudieran adaptar a la aplicación de la corriente eléctrica las micrografías de la Figura 19 muestran que para el reactor 1 (distancia entre electrodos 7.9 cm) en comparación con los microorganismos adaptados al colorante RR-272 (figura 19), aparecen levaduras en los agares especializados A y B (Schaedler Agar, Standard Methods Agar), correspondientes a los microorganismos anaerobios y los microorganismos de las aguas residuales. La aparición de levaduras y las disminuciones de las bacterias en especial para el agar con siembra de una muestra de aguas residuales (B), se debe a la aplicación de la intensidad de la corriente eléctrica (2.176 mA/cm^2 – Equivalentes a 20 mA), ya que esta fue alta.

Los microorganismos adaptados al colorante RR-272 con los obtenidos al terminar de operar el BER a una distancia de electrodos de 14 cm (Figura 19), muestran que después de su operación, en el agar de aguas residuales (B) solo crecieron cocos, mientras que los bacilos no se lograron adaptar aplicando una densidad de corriente menor (0.544 mA/cm^2), a una distancia de electrodos mayor. Comparando la distancia de electrodos entre los dos reactores para el reactor 1 se tiene la formación de levaduras para los agares especializados A y B (Schaedler Agar, Standard Methods Agar), aplicando una densidad de corriente eléctrica de 2.176 mA/cm^2 , mientras para el reactor 2 (distancia de electrodos 14 cm), la máxima densidad de corriente fue de 0.544 mA/cm^2 , por lo que esta fue menor en intensidad y volumen, en las micrografías de este no se tiene la formación de levaduras, por lo que estas son más resistentes que las bacterias al estar presentes bajo la intensidad de corriente eléctrica (Ranalli et al., 2002).

La tinción de Gram de las muestras obtenidas después de la operación de los BERs, indican que las bacterias Gram positivas se adaptan mejor a la densidad de corriente eléctrica en comparación a las Gram negativas (Ranalli et al., 2002). Lo antes mencionado se puede observar en la Figura 19 para los agares especializados A y B (Schaedler Agar, Standard Methods Agar), donde los microorganismos adaptados al colorante RR-272, para el Schaedler Agar son cocos Gram negativos mientras que para el Standard Methods Agar son cocos Gram negativos y bacilos Gram negativos y positivos. Al aplicar la densidad de corriente eléctrica máxima (reactor 1 de 2.176 mA/cm^2 y el reactor 2 de 0.544 mA/cm^2), en el en Schaedler Agar se pueden ver bacterias Gram negativas y positivas, en el Standard Methods Agar solo Gram negativas. Por lo tanto, se concluye que en estos agares especializados los microorganismos Gram positivos se adaptaron mejor a la densidad de corriente eléctrica que los Gram negativos.

Mientras los resultados anteriores muestran que las bacterias Gram positivas se adaptan mejor a la intensidad de corriente eléctrica que las Gram negativas, esto no ocurre para el género *Pseudomonas*. Los resultados mostraron que estos bacilos Gram negativos no se ven afectados por la densidad de corriente eléctrica aplicada (corriente máxima, reactor 1 de 2.176 mA/cm² y el reactor 2 de 0.544 mA/cm²) en comparación con los microorganismos de los otros agares especializados para ambos reactores (Figura 19). Se puede mencionar que los microorganismos del género *Pseudomonas* se adaptaron a intensidades de corriente eléctrica más altas (reactor), incluso que otros microorganismos Gram negativos.

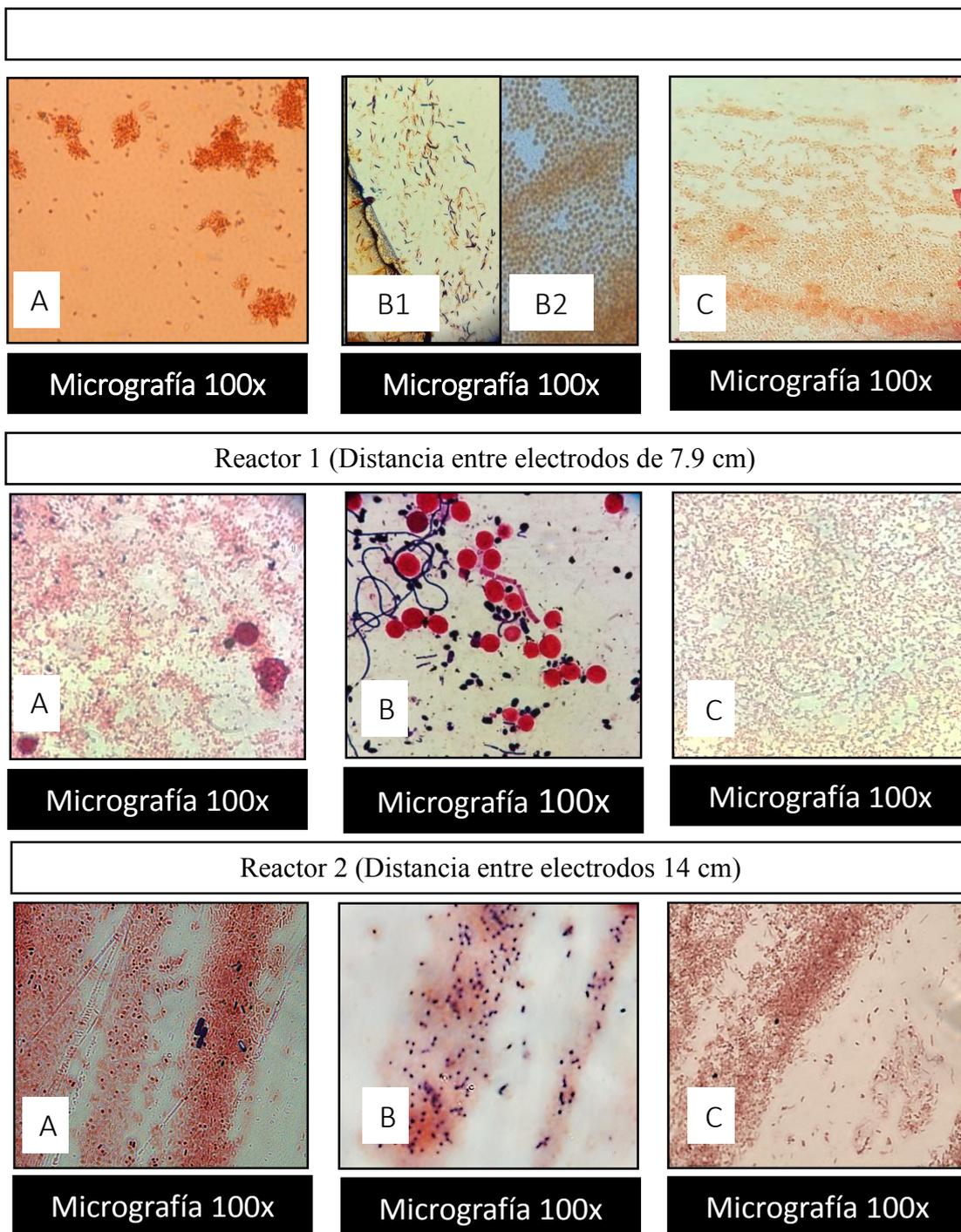


Figura 19. Tinción de Gram de los medios especializados. A) Schaedler Agar, B) Standard Methods Agar, C) Pseudomonas Isolation Agar

6.2 Características de los BER

Se realizó una caracterización de los BERs, antes de determinar los parámetros operacionales. En la Tabla 6 se presentan los datos obtenidos y en la Figura 20 se presentan a los BERs empacados.

Tabla 6. Características de los BERs.

Característica	BER 1 ^{&}	BER 2 [%]
Volumen del reactor, L	0.626	0.842
Volumen sin empacar, L	0.425	0.650
Volumen de trabajo, L	0.210	0.235
Diámetro interno, cm	3	3
Longitud del reactor, cm	23.7	29.8
Distancia entre electrodos, cm	7.9	14
Longitud del empaque, cm	15.6	21.9
Porosidad del lecho inicial	0.451	0.361
Porosidad del lecho final	0.191	0.192
Caudal a un TRH 0.5 h, min/mL	6.25	8.74
Caudal a un TRH 1 h, min/mL	3.57	4.67

BER 1[&] = Reactor electroquímico con distancia entre electrodos de 7.9 cm

BER 2[%] = Reactor electroquímico con distancia entre electrodos de 14 cm.

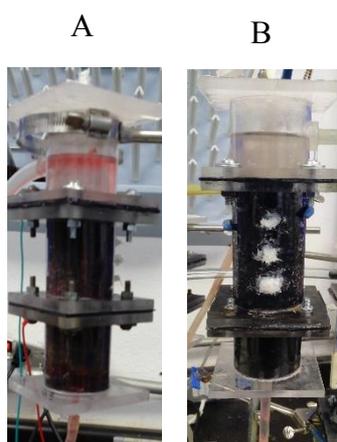


Figura 20. BERs en empacados. A) BER 1 (distancia entre electrodos de 7.9 cm), B) BER 2 (distancia entre electrodos de 14 cm).

6.3 Parámetros operacionales

6.3.1 Efecto de la densidad de corriente eléctrica sobre los TRH

Reactor 1 (Distancia entre electrodos de 7.9 cm)

En la operación del BER a un TRH de 0.5 h, y una concentración de 100 ppm, la eficiencia del reactor sin la estimulación eléctrica fue de 60.49 %, al aplicar la densidad de corriente eléctrica en los intervalos de 0.217 y 1.088 mA/cm² la eficiencia de decoloración aumentó significativamente (mayor al 90%), Cabe mencionar que al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 2.176 mA/cm², la eficiencia de decoloración disminuyó (eficiencia máxima 80%).

Para un TRH de una hora la eficiencia de decoloración sin la aplicación de la estimulación eléctrica fue de 66.00 %, la mayor eficiencia a este TRH, fue al aplicar una densidad de corriente eléctrica en los intervalos de 0.217 a 1.088 mA/cm², teniendo una eficiencia superior al 90 %, al aplicar una densidad de corriente mayor esta eficiencia disminuye (80%). La Figura 21 muestra estas eficiencias para ambos TRH, a una concentración de 100 ppm.

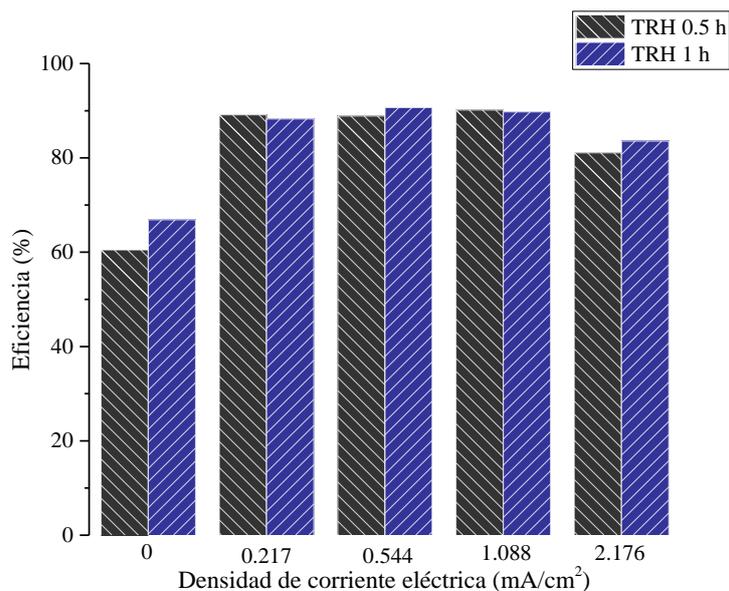


Figura 21. Efecto de la densidad de corriente eléctrica a una concentración de 100 ppm con una distancia entre electrodos de 7.9 cm.

Para un TRH de 0.5 h, sin aplicar la densidad de corriente eléctrica la eficiencia de decoloración es de 60.49 %, mientras que para un TRH de una hora es de 68.00 % (Figura 21). Este resultado muestra que la eficiencia es proporcional (mayor) se obtiene en un reactor biológico convencional sin la estimulación eléctrica, a un TRH mayor, pero al estimular el reactor, los TRH se ven favorecidos, porque la eficiencia aumenta. La mayor eficiencia de decoloración a un TRH de 0.5 h, se presentó al aplicar una densidad de corriente eléctrica en los intervalos de 0.217 y 1.088 mA/cm², mientras que a un TRH de una hora la mayor eficiencia de decoloración se presentó en los mismos intervalos. La máxima eficiencia de decoloración en el BER fue cercana al 90 %, para los dos TRH (Figura 21). Este valor, indica que los TRH con la estimulación eléctrica se hacen independientes del tiempo, por lo que se puede tratar mayores volúmenes de agua a menores TRH. La eficiencia de los sistemas bio-electroquímicos incrementa porque los microorganismos presentes en el dispositivo, al aplicarles una densidad de corriente, aumenta su actividad metabólica (Picioreanu, 2010).

La eficiencia del BER para ambos TRH baja al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 2.176 mA/cm^2 (20 mA) (Figura 21). Estudios realizados por Luo et al. (2005) demostraron que en sistemas BER con separación de electrodos de 8cm, usados para la degradación de fenol, al aplicarle una corriente eléctrica de 20 mA (igual que nuestro sistema, la misma distancia entre electrodos), la eficiencia de degradación de fenol disminuyo porque a esa corriente eléctrica los microorganismos empezaron a disminuir, ya que a estas condiciones hubo menor presencia de estos (conteo de microorganismos).

Efecto de la densidad de corriente eléctrica sobre la concentración

Para evaluar el comportamiento del BER a una concentración más alta (200 ppm) se seleccionaron las mejores condiciones de operación (densidad de corriente eléctrica en los intervalos de 0.217 a 1.088 mA/cm^2). Los resultados muestran que para un TRH 0.5 h, la máxima eficiencia fue superior al 80%, mientras que para un TRH de una hora fue 90% (Figura 22). Por lo que a concentraciones más altas la eficiencia del BER depende de los TRH y la densidad de corriente eléctrica aplicada.

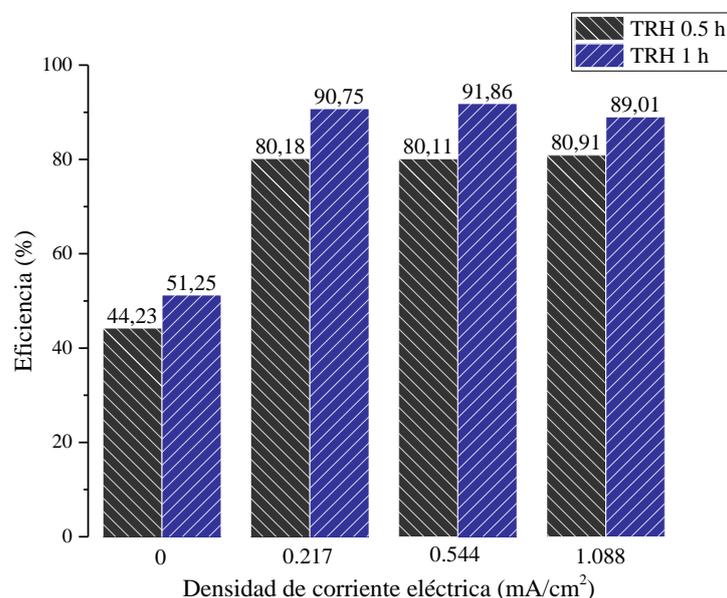


Figura 22. Efecto de la densidad de corriente eléctrica en la eficiencia del BER a una concentración de 200 ppm y una distancia de electrodos de 7.9 cm.

La Figura 23 muestra la comparación en la eficiencia de decoloración del BER, dependiendo de la concentración (100 y 200 ppm) donde a un TRH de una hora, el BER llega su máxima eficiencia (superior al 90%), sin importar la concentración en cambio para un TRH de 0.5 h, esta eficiencia disminuye del 90.00 al 80.00% al aumentar la concentración de 100 a 200 ppm. Por lo que operar al BER a concentraciones altas (200 ppm) se tiene que operar TRH más largos.

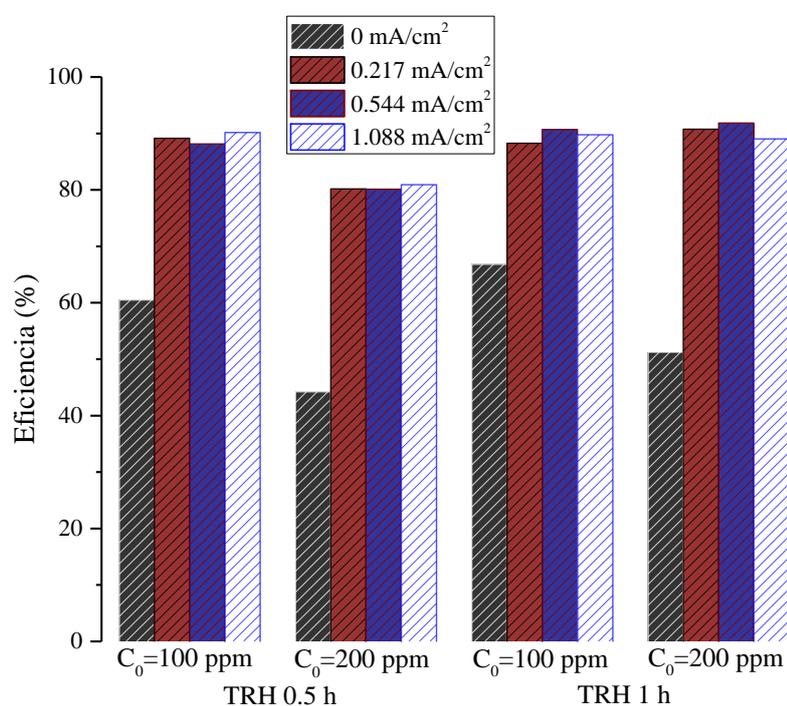


Figura 23. Efecto de la concentración del colorante RR-272 sobre la eficiencia de decoloración en el BER.

Reactor 2 (Distancia entre electrodos de 14 cm)

En la operación del BER para una distancia de electrodos de 14 cm solo se utilizaron dos densidades de corriente eléctrica (0.217 y 0.544 mA/cm²).

El efecto de la estimulación eléctrica sobre la eficiencia del BER para un TRH 0.5 h a una concentración de 100 ppm, solo se vio favorecido al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 0.544 mA/cm², ya que la eficiencia del BER sin la estimulación eléctrica fue de 74.96 % y al aplicar una densidad eléctrica de 0.544 mA/cm² de 90.03%. Cabe mencionar que la eficiencia del BER no se vio beneficiada al aplicar una estimulación eléctrica de 0.217 mA/cm². Al tener un TRH de 1 h, se obtuvo un comportamiento similar al del TRH de 0.5 h, con la diferencia de que la eficiencia del BER sin la estimulación eléctrica fue de 80.72 % y al aplicar la densidad de corriente eléctrica de 0.544 mA/cm² esta fue de 95.73% (Figura 24).

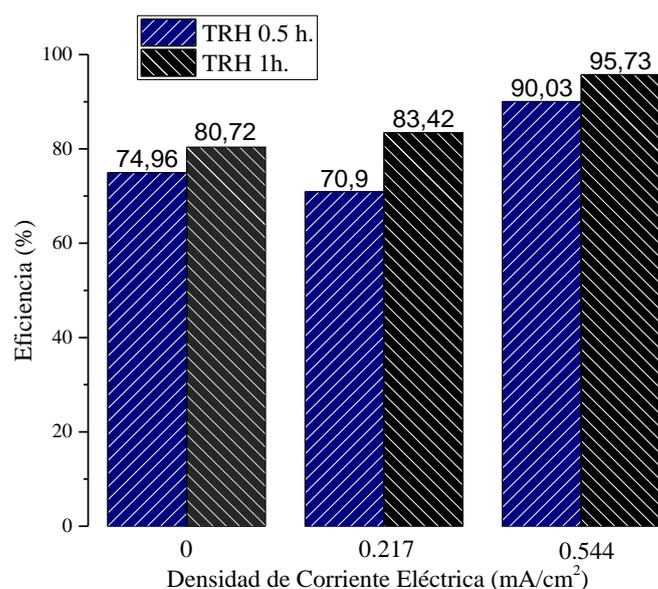


Figura 24. Efecto de la densidad de la corriente eléctrica en la eficiencia del BER a una concentración de 100 ppm y una distancia entre los electrodos de 14 cm.

Efecto de la densidad de corriente eléctrica sobre la concentración a una distancia de electrodos de 14 cm

Al aumentar la concentración a 200 ppm la eficiencia del BER para un TRH 0.5 h sin la aplicación de la corriente eléctrica fue de 62.48%, mientras que al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 0.217 y 0.544 mA/cm², los valores oscilaron entre 78.88 % y 90.12 % respectivamente. Mientras que para un TRH de 1 h la eficiencia del BER no cambia considerablemente, sin la estimulación eléctrica fue de 86.18 % y al estimular es de 87.52 % y 90.12 % (0.217 y 0.544 mA/cm²), respectivamente (Figura 25). Al operar el BER con una distancia de electrodos de 14 cm a concentraciones de 200 ppm, tuvo su máxima eficiencia al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 0.544 mA/cm² a TRH de 0.5 h, porque a TRH de 1 h la eficiencia no tuvo un crecimiento considerable.

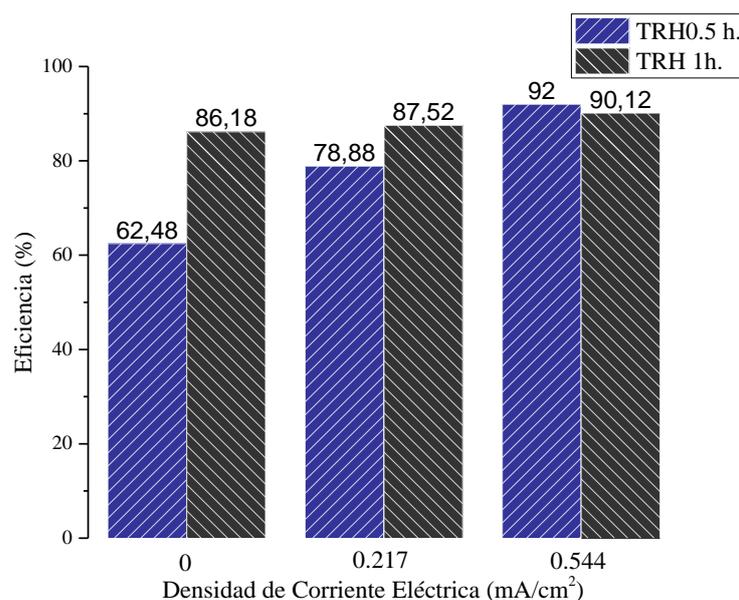


Figura 25. Efecto de la densidad de la corriente eléctrica en la eficiencia del VER a un a concentración de 200 ppm y una distancia entre electrodos de 14 cm.

En la Figura 26 se muestra una comparación de las dos concentraciones usadas (100 y 200 ppm), apreciando que para un TRH 0.5 h, la eficiencia del BER sin la estimulación eléctrica a una concentración de 100 ppm fue de 74.96 % mientras que a la otra concentración los valores disminuyeron (62.05 %). Al estimular el BER con una densidad de corriente eléctrica de 0.217 mA/cm², la eficiencia de este a una concentración de 100 ppm, no mostro cambios significativos (mejorar su eficiencia), en cambio a una concentración de 200 ppm si presentó aumento (78.88%), pero no alcanza su máximo rendimiento. Este incremento de la eficiencia a una mayor concentración (200 ppm) y a una estimulación eléctrica de 0.217 mA/cm², puede deberse a que después de reducirse (decoloración) la molécula del colorante RR-272 se formaron iones. Estos iones formados al haber una mayor concentración de colorante, ayudó a la circulación de corriente eléctrica dentro del sistema. Para el mismo TRH (TRH 0.5 h), incrementado la densidad de corriente eléctrica aplicada (0.544 mA/cm²), para ambas concentraciones (100 y 200 ppm) la eficiencia del BER fue superior al 90.00 %, es decir que al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 0.544 mA/cm², y un TRH de 0.5 h el BER alcanza su máxima eficiencia.

Para un TRH de 1 h, la eficiencia del BER a una concentración de 100 ppm fue de 80.72%, mientras que para una concentración de 200 ppm ésta aumentó (86.18 %), contrario al TRH de 0.5 h, ya que a una concentración de 100 ppm (74.96 %), presentó una mayor eficiencia y al aumentar la concentración a 200 ppm (62.48 %) ésta disminuyó. Si el BER se opera como un reactor biológico convencional la eficiencia podría ser mayor a tiempos de residencia más largos y concentraciones más altas. Al estimular el BER con una densidad de corriente eléctrica de 0.544 mA/cm², su eficiencia fue mayor al 90%, para ambas concentraciones, pero para una concentración de 200 ppm, no hay un aumento significativo en su eficiencia.

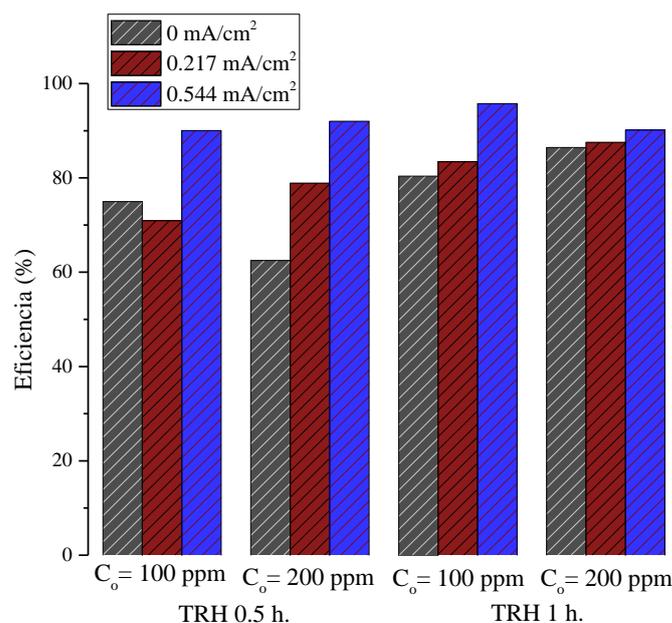


Figura 26. Efecto de la concentración del BER sobre la eficiencia de decoloración a una distancia entre los electrodos de 14 cm.

Efecto de la densidad de corriente eléctrica evaluando la distancia entre electrodos

La eficiencia de los BERs aumenta cuando se aumenta la distancia entre los electrodos para ambos TRH (0.5 y 1h), en comparación de cuando se les opera como reactores biológicos convencionales. Según los resultados obtenidos, la eficiencia de estos a una distancia de electrodos de 7.9 cm a un TRH de 0.5 h, fue de 60.49 % a 100 ppm y a 200 ppm de 44.23 %, al aumentar la distancia entre los electrodos a 14 cm cambio la eficiencia se colocó entre 74.96 % y 62.48%, para 100 y 200 ppm, respectivamente.

Para un TRH a 1 h, la eficiencia a concentraciones bajas (100 ppm) fue de 66.88 %, al aumentar la concentración (200 ppm) esta se ubicó en 51.25% (a una distancia entre electrodos de 7.9 cm), al aumentar la distancia entre los electrodos a 14 cm la eficiencia fue de 80.72 % (100 ppm) y 86.18% (200 ppm). El aumento en la eficiencia del BER debido al incremento de la distancia entre los electrodos, se debe al volumen de trabajo (Figura 27).

Al operar los BERs como reactores biológicos convencionales la eficiencia de estos es mayor al aumentar la distancia entre los electrodos para ambos TRH (TRH de 0.5 y 1 h), ya que la eficiencia de estos a una distancia de electrodos de 7.9 cm a un TRH de 0.5 h, fue de 60.49 % la eficiencia fue 74.96 % y 62.48 % para 100 y 200 ppm, respectivamente.

Al estimular (aplicación de la densidad de corriente eléctrica) el BER a una distancia de electrodos 7.9 cm la máxima eficiencia (90.00 %) fue alcanzada con la mínima estimulación (0.217 mA/cm^2) para ambos TRH (TRH de 0.5 y 1 h) a concentraciones de 100 y 200 ppm. Cabe destacar que a concentraciones altas (200 ppm) y TRH de 0.5 h, la máxima eficiencia fue de 80.00 % (no se logró alcanzar el 90.00% bajo estas condiciones) sin importar la magnitud densidad de corriente eléctrica aplicada. Al incrementar la distancia entre los electrodos a 14 cm la máxima eficiencia (90.00 %), fue alcanzada al aplicar una estimulación eléctrica de 0.544 mA/cm^2 para ambos TRH (TRH de 0.5 y 1 h) y concentraciones (100 y 200 ppm). Al aumentar la distancia entre los electrodos de 7.9 cm a 14 cm a concentraciones altas (200 ppm) y tiempos de residencia cortos (TRH de 0.5 h), la eficiencia resultó beneficiada (Figura 27).

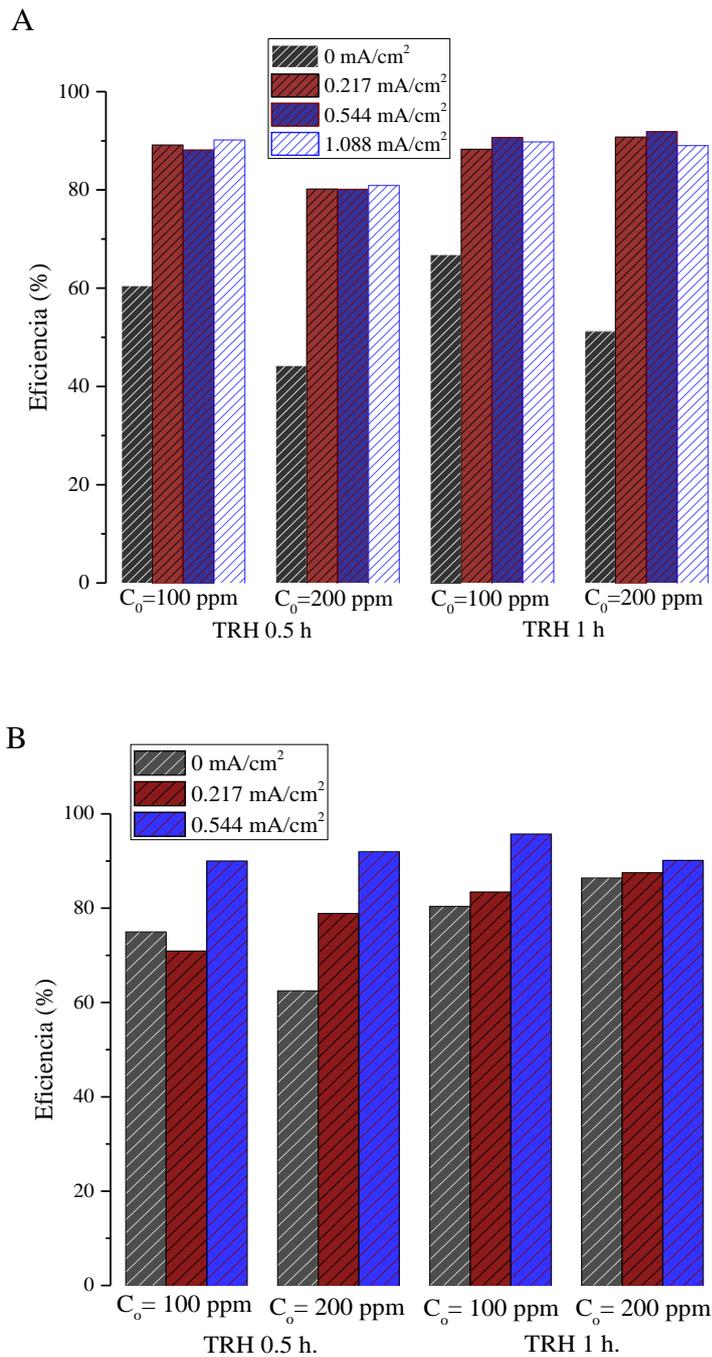


Figura 27. Efecto de la densidad de corriente eléctrica evaluando la distancia entre los electrodos. A) BER 1 (distancia entre electrodos de 7.9 cm), B) BER 2 (distancia entre electrodos 14 cm).

6.3.2 Efecto del pH

Para medir el comportamiento del pH, se tomó una muestra de colorante RR-272 a la entrada y salida del reactor. En la Figura 28 se muestran los resultados del comportamiento del pH a una concentración de 100 ppm, observando que para un TRH de 0.5 h el valor de pH a la entrada del BER fue de 5.40, al salir el colorante RR-272 el pH sin la aplicación de la estimulación eléctrica (0 mA/cm^2) fue superior 7.00, mientras que al aplicar la estimulación eléctrica este osciló entre los valores de 5.60-5.80. Cabe destacar que sin importar el valor de la estimulación eléctrica aplicada (0.217 mA/cm^2 , 0.544 mA/cm^2 , 1.088 mA/cm^2 y 2.176 mA/cm^2), el valor del pH es el mismo por lo que este solo depende de los tiempos de residencia, para estas condiciones.

Para un TRH de 1 h el comportamiento del pH (Figura 28), a la entrada del BER fue superior a 5.00 (5.26), mientras que a la salida BER el valor de este sin la estimulación eléctrica fue mayor a 7.00 (7.06), al aplicar una densidad de corriente eléctrica este fue menor a 5.00 sin importar la magnitud de densidad de corriente eléctrica.

Al aumentar la concentración a 200 ppm el comportamiento del pH fue igual que el valor obtenido a 100 ppm para ambos TRH (TRH 0.5 y 1h), ya que a la entrada del BER el valor de este fue superior a 5.00, mientras que a la salida del BER fue mayor a 7.00 y al aplicar la estimulación eléctrica este fue superior a 5.00 para un TRH de 0.5h y menor al valor antes mencionado para un TRH de 1h (Figura 29).

Comparando el pH para ambas concentraciones (Figura 28 y Figura 29), se observa que este no se ve afectado por la concentración.

Los resultados antes mencionados se relacionan con las reacciones electroquímicas que ocurren en estos, ya que estudios previos (Souhail R. Al-Abed, 2006) donde se desarrolló un electro reactor para la deoloración del tricloroetileno, al aumentar la corriente eléctrica aumento la producción de gas hidrógeno (H_2) disminuyendo el pH (4.00-5.00), comparado con nuestro sistema al tener un pH menor a 5.00 aumentamos la producción de hidrógeno (H_2), favoreciendo reacciones electroquímicas, por lo que la operación de los BERs debe realizarse a tiempos de residencia cortos (menores a 30 minutos).

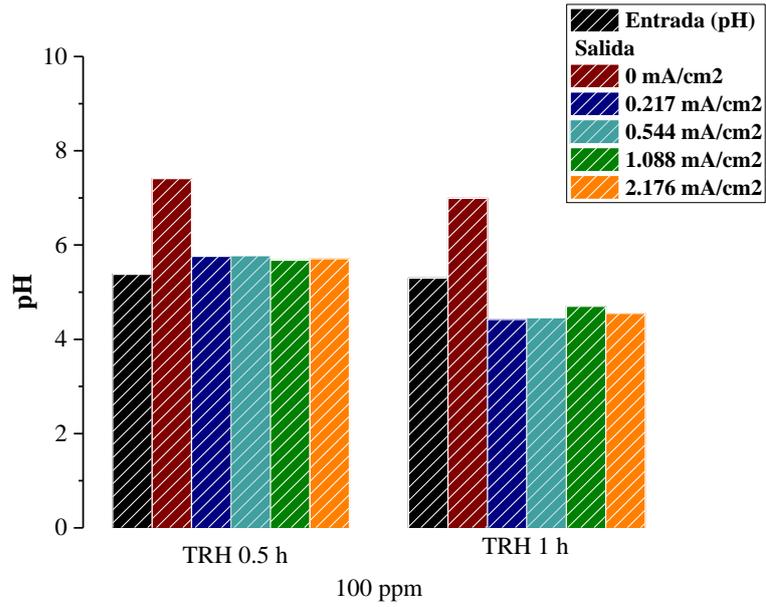


Figura 28. Comportamiento del pH del BER a 100 ppm, a una distancia de electrodos de 7.9 cm.

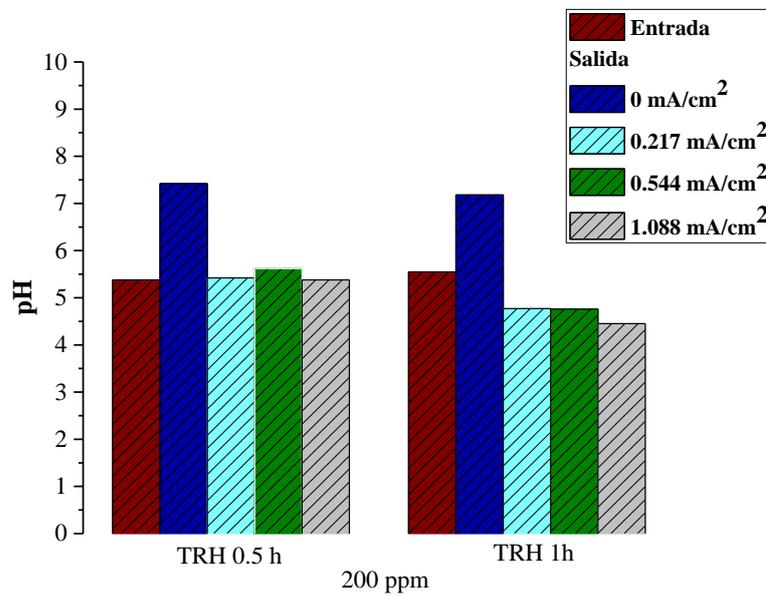


Figura 29. Comportamiento del pH de un BER a 200 ppm, a una distancia de electrodos de 7.9 cm.

Al aumentar la distancia entre los electrodos de 7.9 cm a 14 cm, el comportamiento del pH a una concentración de 100 ppm (Figura 30), presentó un comportamiento similar al BER de 7.9 cm (distancia entre electrodos) a diferencia que al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 0.217 mA/cm^2 el valor del pH se ubicó por arriba de 6.00. Este resultado puede relacionarse con la eficiencia del BER, ya que a estas condiciones no se alcanzó la eficiencia máxima. Así, los valores de pH dependen del porcentaje de decoloración, estimulación eléctrica y tiempos de residencia. En la Figura 31 se puede observar que a concentraciones altas (200 ppm) para un TRH de 0.5 h, aplicando la estimulación eléctrica el pH no estuvo por debajo de 5.00, mientras para un TRH de 1 h sí (similar al BER con una distancia entre sus electrodos de 7.9 cm).

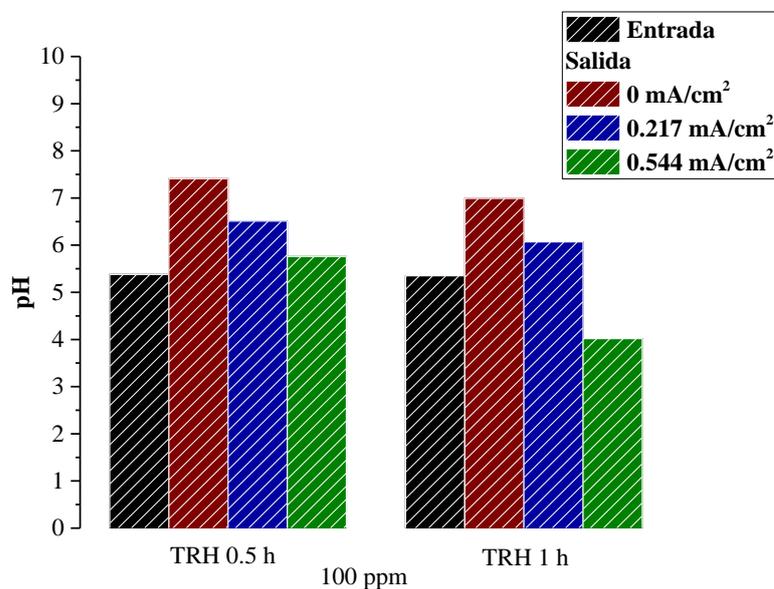


Figura 30. Comportamiento del pH del BER a 100 ppm, a una distancia de electrodos de 14 cm.

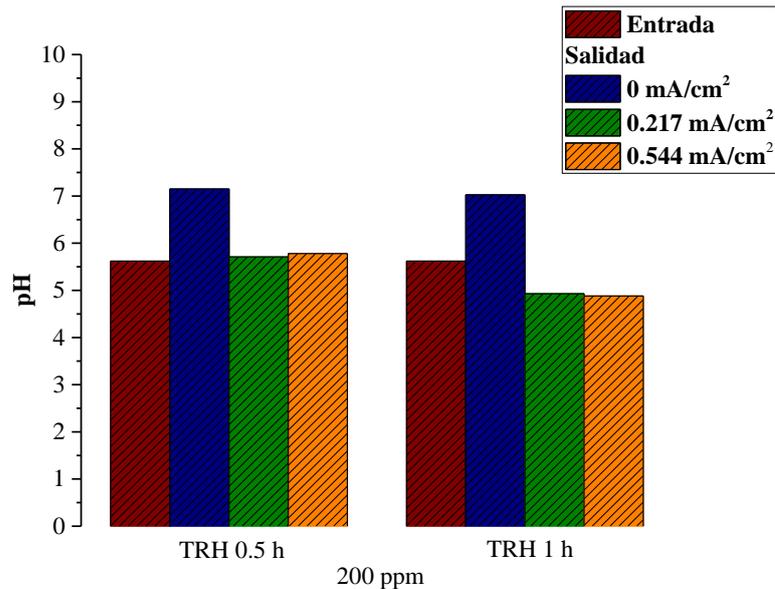


Figura 31. Comportamiento del pH del BER a 200 ppm, a una distancia de electrodos de 14 cm.

6.3.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de los reactores se determinaron introduciendo un pulso trazador, uno de estos parámetros es la curva $E(t)$, esta muestra la distribución de edades del fluido dentro del reactor y la caracterización del flujo. Las Figuras 32 y 33 muestran esta curva para ambos reactores (distancia entre electrodos de 7.9 y 14 cm). En ambas figuras se puede apreciar un comportamiento característico del flujo pistón y mezcla completa, ya que tenemos un pulso al inicio de las gráficas (flujo pistón) y después decrece en forma exponencial (mezcla completa).

Un análisis de la Figura 32 permite indicar que para un TRH de 0.5 h y una distancia entre sus electrodos de 7.9 cm, la concentración máxima del trazador en el reactor logra salir en un tiempo de 0.5 h. Este hecho se traduce como un tiempo de residencia teórico, lo que hace pensar que el tiempo de residencia real del reactor no se aleja de la idealidad, mientras que para el reactor que cuenta con una distancia entre sus electrodos de 14 cm, el trazador lograr salir en un tiempo de residencia menor, ya que se muestran en la curva $E(t)$ un pico mayor a un tiempo de 0.25 h, después de este tiempo la curva disminuye en forma exponencial.

En la Figura 33 se aprecia la curva $E(t)$ para un TRH de 1 h, donde a una distancia entre los electrodos de 7.9 cm, la concentración de trazador máxima logra salir mucho antes del tiempo de residencia teórico, después del pico de la concentración máxima (tiempo de 0.25 h.), se observa un decrecimiento exponencial (mezcla completa), con una cola larga lo que indica un retraso del trazador, además a un tiempo de 2.25 h y 3.25 h la curva decrece después incrementa un poco creando otro pequeño pico que teóricamente da la idea de la presencia de partes estacas del reactor. Para una distancia entre los electrodos de 14 cm, la curva $E(t)$ tiene un pico de intensidad máximo a un tiempo de 0.45 h, con decaimiento en forma exponencial.

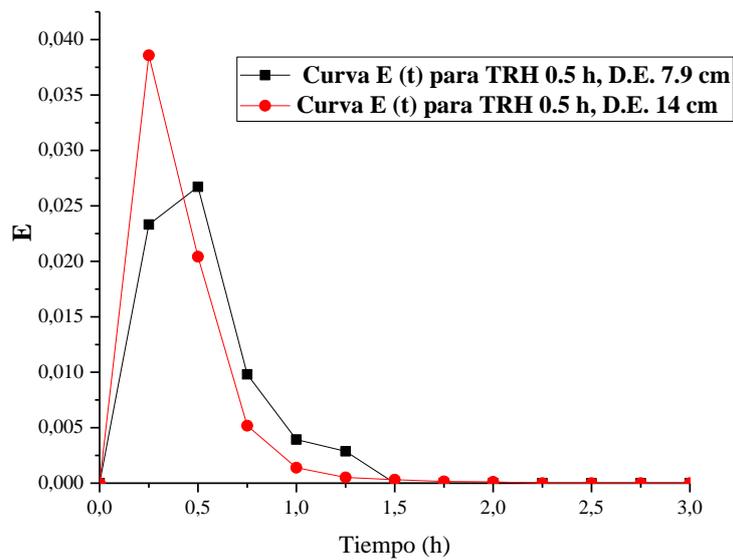


Figura 32. Curvas $E(t)$ a un TRH de 0.5 h.

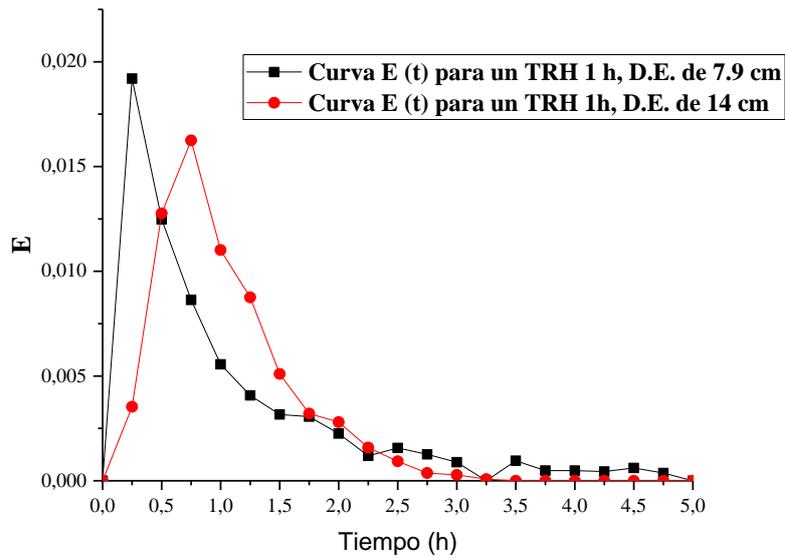


Figura 33. Curvas E(t) a un TRH de 1 h.

Además del estudio de distribución de tiempos de residencia, se calcularon algunos números adimensionales que caracterizan el transporte de masa, la dispersión y tipo de flujo del reactor (Re). Los resultados de los parámetros adimensionales calculados como Pe (Péclet) y Re (Reynolds), además del TRH real, muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros adimensionales para los BERs

Parámetro	Distancia entre electrodos de 7.9 cm		Distancia entre electrodos de 14 cm.	
	TRH 0.5 h	TRH 1 h	TRH 0.5 h	TRH 1 h
d	0.111	0.495	0.121	0.210
Pe	8.96	2.01	8.24	4.74
Re	2.001E-08	1.143E-08	2.801E-08	1.496E-08
TRH real	0.51 h	1.03 h	0.40 h	1.02 h

El número d indica el grado de dispersión axial en el reactor este se clasifica como;

$d = 0$	No existe dispersión
$d \leq 0.05$	Dispersión baja
$0.05 < d < 0.25$	Dispersión moderada
$d \leq 0.25$	Dispersión alta
$d \rightarrow \infty$	Reactor de mezcla completa

Comparando los resultados de la Tabla 7, el número d indica dispersión moderada para el BER 2 (distancia entre los electrodos de 14 cm) para ambos TRH (TRH 0.5 y 1 h), mientras que para el BER 1 (distancia entre los electrodos de 7.9 cm) a un TRH de 0.5 h hay dispersión moderada, pero a un TRH de 1 h, se encuentra una alta dispersión, relacionada con el TRH más lento.

El número Pe indica el transporte de masa en el reactor. Un número de Pe mayor que 1 indica que la convección es el factor dominante en el transporte de masa, y si es menor que 1, domina la dispersión.

Los resultados del número de Pe en la Tabla 7 indican que para los dos BERs (TRH de 0.5 y 1), el transporte de masa estuvo dominado por convección.

El número de Re relaciona las propiedades físicas del fluido. Cuando el número de Reynolds se encuentra por debajo de 2100 se sabe que el flujo es laminar, el intervalo entre 2100 y 4000 se considera como flujo de transición y para valores mayores de 4000 se considera como flujo turbulento.

En la Tabla 7, los números de Re para ambos BERs (TRH de 0.5 y 1) el tipo flujo es laminar.

Para el BER 1 (distancia entre electrodos de 7.9 cm), los TRH_{Real} (Tabla 7), indican que a un $TRH_{teórico}$ de 0.5 h su TRH_{real} fue de 0.51 h, mientras que para un $TRH_{teórico}$ de 1 h el real corresponde a 1.03 h, mientras para el BER 2 (distancia entre electrodos 14 cm), su $TRH_{teórico}$ fue de 0.5 h el TRH_{real} se ubicó en 0.51 h y para $TRH_{teórico}$ de 1 h el real fue de 1.02 h.

De los datos mencionados se concluye que para ambas distancias entre los electrodos el BER tiene un flujo de mezcla completa y pistón, además los números adimensionales como el Re indican un flujo laminar y el Pe que el transporte de masa está dominado por convección. Al aumentar el tamaño en la distancia entre electrodos se respetan estas proporciones.

6.3.4 Parámetros Cinéticos

El estudio de la cinética de decoloración es importante para predecir el tiempo en que se reduce el colorante, además de ver el efecto que tiene la densidad de corriente eléctrica sobre estos parámetros. Para analizar la cinética de decoloración del colorante RR-272 se ajustó a un orden uno. En la Tabla 8 se muestran los valores de las constantes de velocidad (velocidad de decoloración) para el reactor con una distancia entre electrodos de 7.9 cm, donde estos valores indican que al estimular el BER la velocidad de decoloración aumenta. La cinética de decoloración para el reactor con una distancia entre sus electrodos de 14 cm (Tabla 9) presenta un comportamiento similar al de 7 cm.

Tabla 8. Constante de velocidad de decoloración del colorante RR-272 a una distancia entre los electrodos de 7.9 cm.

Densidad de corriente eléctrica (mA/cm ²).	C ₀ =[100 ppm]				C ₀ =[200 ppm]			
	TRH0.5h	R ²	TRH1h	R ²	TRH0.5h	R ²	TRH1h	R ²
0	0.364±0.190	0.964	0.443±0.034	0.995	0.496±0.005	0.992	0.677±0.029	0.990
0.217	0.673±0.175	0.988	0.613±0.135	0.994	0.900±0.107	0.995	0.852±0.029	0.983
0.544	0.452±0.139	0.983	0.521±0.011	0.988	1.04±1.70	0.982	0.842±0.009	0.998
1.088	0.575±0.213	0.973	0.609±0.196	0.990	0.902±0.220	0.989	0.8146±0.106	0.993
2.176	0.587±0.096	0.994	0.456±0.018	0.995	****	****	****	****

*** =Experimento no realizado.

Tabla 9. Constante de velocidad de decoloración del colorante RR-272 a una distancia entre los electrodos de 14 cm.

Densidad de corriente eléctrica (mA/cm ²).	C ₀ =[100 ppm]				C ₀ =[200 ppm]			
	TRH0.5h	R ²	TRH1h	R ²	TRH0.5h	R ²	TRH1h	R ²
0	0.406±0.149	0.975	0.657±0.335	0.968	0.641±0.482	0.961	0.627±0.288	0.977
0.217	0.673±0.175	0.988	0.613±0.135	0.994	0.986±0.209	0.986	0.817±0.040	0.989
0.544	1.063±0.399	0.976	0.734±0.485	0.954	1.284±0.495	0.976	0.842±0.009	0.998

La cinética indica que al aplicar la estimulación eléctrica la constante de velocidad aumenta ya que el valor de esta para un TRH de 0.5 y 1 h es de 0.364 ± 0.190 y 0.443 ± 0.034 h⁻¹ respectivamente, al aplicar la mínima densidad de corriente eléctrica (0.217 mA/cm²) está presenta un valor de 0.673 ± 0.175 y 0.613 ± 0.135 (TRH de 0.5 y 1 h) a concentraciones bajas (100 ppm). Al aumentar la concentración (200 ppm) la magnitud de esta se ubicó en 0.496 ± 0.005 y 0.677 ± 0.029 h⁻¹ (TRH de 0.5 y 1 h) al estimular (0.217 mA/cm²) esta fue de 0.900 ± 0.104 y 0.852 ± 0.029 h⁻¹. Al comparar la cinética para ambas concentraciones se puede observar que a mayor concentración más rápido es la velocidad de decoloración. La velocidad de decoloración al crear la distancia entre electrodos (14 cm) crece con la estimulación, pero a esta distancia tenemos que aplicar una mayor densidad de corriente eléctrica (0.544 mA/cm²) para tener una mayor velocidad de decoloración, ya que al tener un TRH de 0.5 y 1 h el valor de esta es de 0.406 ± 0.149 y 0.657 ± 0.335 h⁻¹ a concentraciones de 100 ppm y a 200 ppm es de 0.647 ± 0.485 y 0.627 ± 0.288 h⁻¹ al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 0.217 mA/cm² el valor de esta es de 0.673 ± 0.175 y 0.673 ± 0.175 h⁻¹ (TRH de 0.5 y 1 h) a 100 ppm, mientras que a 200 ppm es de 0.986 ± 0.209 y 0.817 ± 0.040 (TRH de 0.5 y 1 h) pero al aplicar 0.544 mA/cm² el valor de la constante de velocidad aumenta ya que esta para un TRH de 0.5 y 1 h es de 1.063 ± 0.399 y 0.734 ± 0.485 h⁻¹ (concentraciones de 100 ppm) 1.284 ± 0.495 y 0.842 ± 0.009 h⁻¹ (200 ppm).

6.4 Formación de subproductos

Los colorantes azo presentan picos (señales) de absorción en los espectros UV-vis los cuales se pueden identificar para la formación de subproductos (aminas aromáticas). Las señales (picos) para identificar los subproductos de los colorantes azo se presentan en la región ultravioleta entre los 300 a 400 nm (Cao, 2017), mientras que en la región del visible se presenta el cromóforo de los colorantes azo, en el colorante azo el grupo cromóforo se ubica en los 505 nm (Figura 34 y 35). En la Figura 34 se muestran los espectros para el BER con una distancia entre sus electrodos de 7.9 cm, donde en la Figura 35A (TRH 0.5 h) se muestra el efecto de la corriente eléctrica en la degradación de los subproductos, ya que región que está entre los 300 y 400 nm, disminuye con la estimulación eléctrica. Los resultados a un, TRH igual a 1 h mostraron el mismo efecto. Al aumentar la distancia entre los electrodos a 14 cm (Figura 35), la máxima eficiencia (pico 505 nm) y degradación de subproductos disminuye al estimular el BER, pero solo al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 0.544 mA/cm^2 (Figura 35 A y B).

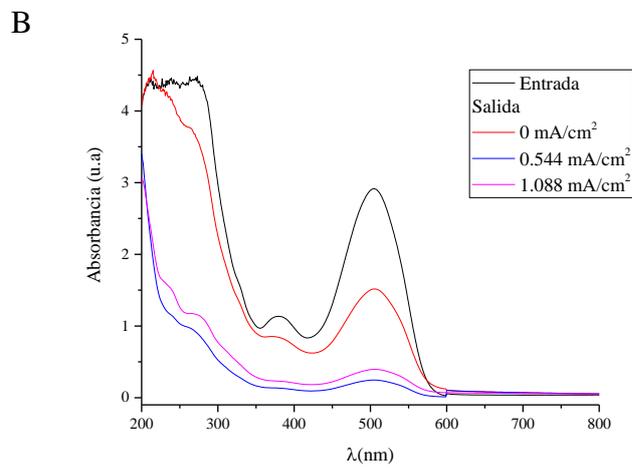
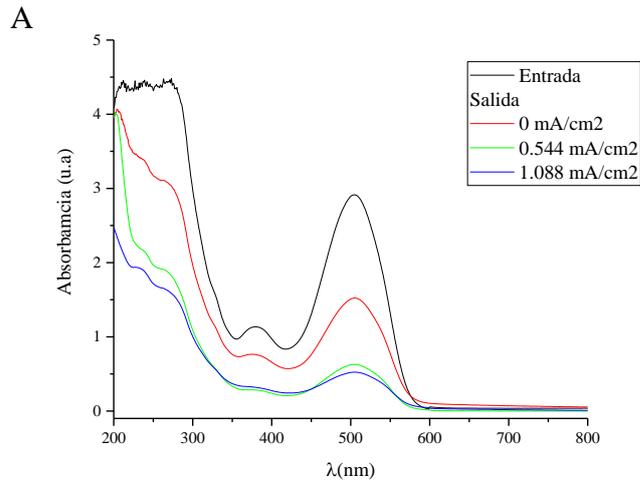


Figura 34. Espectros UV-vis del reactor con una distancia de electrodos de 7.9 cm, A) a un TRH 0.5h; y B) un TRH 1H a 200 ppm.

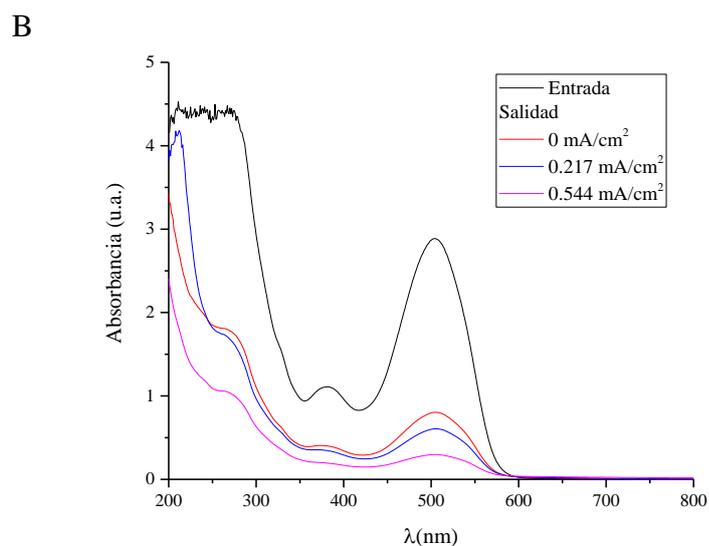
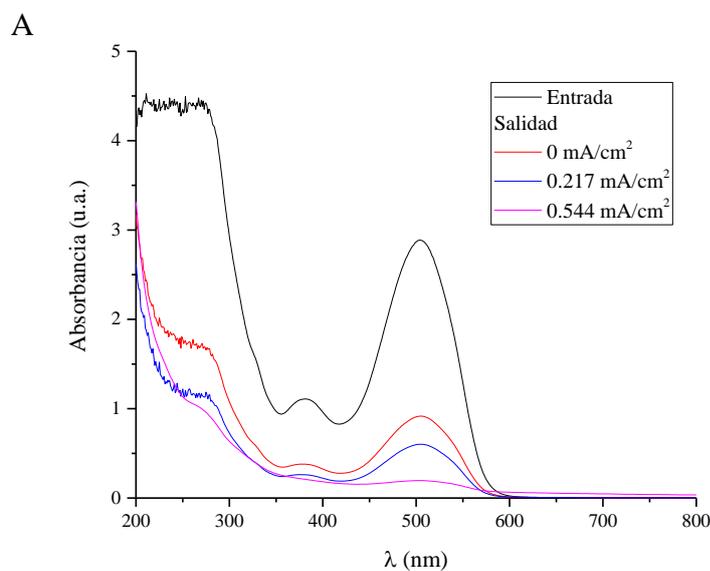


Figura 35. Espectros UV-vis del reactor con una distancia de electrodos de 14 cm, A) a un TRH 0.5h; y B) un TRH 1H a 200 ppm.

En las Figuras 35 y 34, se observa la disminución de la longitud de onda en el intervalo de 300 a 400 nm, señal de la degradación de aminas aromáticas.

7. Conclusiones

Para concluir se puede abordar el tema en tres aristas, la cuales son microorganismos, reactores electroquímicos y distancia entre sus electrodos.

- En los tres agares especializados hubo crecimiento de microorganismos. En el Schanedler agar crecieron m.o. anaerobios en su tinción estos presentaron una coloración rosada (Gram negativos). En el Standard methods agar obtuvimos m.o. provenientes de las aguas residuales los cuales tuvieron una coloración rosada (Gram negativos) y violeta (Gram positivos). Además, en el tercer agar (Pseudomonas agar) se observó la presencia de *Pseudomonas*, estos microorganismos son facultativos, reductores de los grupos azo. Las *Pseudomonas* también oxidan la materia orgánica y presentan una coloración rosada en la Tinción de Gram, las Gram negativas son reductoras de los grupos azo en los colorantes.
- Al evaluar la viabilidad de los m.o. al terminar de operar los BERs, se observó que para el BER con a una distancia entre sus electrodos de 7.9 cm y al aplicar una densidad de corriente eléctrica máxima de 2.176 mA/cm² en los agares Schanedler agar y Standard methods agar, hubo la presencia de levaduras, pero en el Pseudomonas agar no presento levaduras, por lo tanto, se concluye que estos m.o. son más resistentes a la estimulación eléctrica.
- Al tener una distancia entre electrodos de 14 cm y al aplicar la estimulación máxima (0.544 mA/cm²) la tinción mostro bacterias Gram positivas al terminar de operar el BER, en los los agares Schanedler agar y Standard methods. En el Pseudomonas agar, hubo bacterias Gram negativas.
- La mayor eficiencia del BER con una distancia de electrodos de 7.9 cm se presentó al aplicar la mínima densidad de corriente eléctrica (0.217 mA/cm²) para ambos TRH (TRH de 0.5 y 1 h) a concentraciones bajas (100 ppm). A concentraciones altas (200 ppm) la máxima eficiencia solo se alcanzó a un TRH de 1 h.

- La mayor eficiencia para el BER de una distancia entre electrodos de 14 cm se presenta aplicando una densidad de corriente eléctrica de 0.544 mA/cm^2 para ambos TRH (TRH de 0.5 y 1h) y concentraciones (100 y 200 ppm).
- El pH al aplicar la densidad de corriente eléctrica es afectado por TRH, ya que al variar la estimulación este no cambia.
- Los parámetros hidráulicos muestran que el flujo del reactor es una mezcla entre flujo pistón y mezcla completa. Los números adimensionales indican que la dispersión en los BERs depende de los TRH, pero ambos tienen un flujo laminar y el transporte de masa está dominado por convección.
- La cinética indica que al aplicar la estimulación eléctrica la constante de velocidad aumenta, para ambas distancias entre electrodos.
- Los parámetros idóneos de operación de los BERs dependen de la distancia entre sus electrodos. Para operar el bio-electro-rector con una distancia de electrodos de 7.9 cm debemos tomar en cuenta los TRH, la densidad de corriente eléctrica y la concentración, esto porque al estimular el BER los TRH son adimensionales del tiempo (misma eficiencia a diferentes TRH) pero al aumentar la concentración (200 ppm) la eficiencia disminuye a TRH cortos (TRH 0.5 h), por lo que se recomienda operar este BER a TRH cortos (TRH 0.5 h) a concentraciones de 200 ppm, mientras que a concentraciones bajas (100 ppm) se puede operar a TRH de 1h, aplicando la mínima estimulación eléctrica (0.217 mA/cm^2) para ambos TRH (TRH de 0.5 y 1h) y concentraciones (100 y 200 ppm). Al aumentar la distancia entre sus electrodos (14 cm) la eficiencia máxima se refleja al aplicar una densidad de corriente eléctrica de 0.544 mA/cm^2 con TRH de 0.5 h, por lo que se recomienda que al aumentar la distancia entre electrodos los TRH deben ser cortos.

8. Bibliografía

- Alabdraba W., M. B. (2014). Biodegradation Of Azo Dyes A Review. Researchgate.
- Arelly Cardenas-Robles, E. M.-A.-G. (2013). Development Of An Activated Carbon-Packed Microbial Bioelectrochemical System For Azo Dye Degradation . *Bioresource Technology*, 37-43.
- Barrera, C. E. (2014). Aplicaciones Electroquímicas Al Tratamiento De Aguas Residuales. Ciudad De Mexico: Reverte.
- Born-Yann Chen, M.-M. Z.-T.-L.-S.-C. (2010). Assessment Upon Azo Dye Decoloration And Bioelectricity Generation By *Proteus Hauseri*. *Bioresource Technology* , 4737-4741.
- Cárdenas-Robles, A. (2011). Estudio Del Efecto De Un Campo Eléctrico En La Degradación Anaerobia De Colorantes Azo. Querétaro: Cideteq.
- Carolina Cruz Viggi, E. P. (2015). The “Oil-Spill Snorkel”: An Innovative Bioelectrochemical Approach To Accelerate Hydrocarbons Biodegradation In Marine Sediments. *Frontiers In Microbiology*, 1-11.
- Dan Cui, Y.-Q. G.-S.-M.-J.-Y. (2014). Enhanced Decolorization Of Azo Dye In A Small Pilot-Scale Anaerobic Baffled Reactor Coupled With Biocatalyzed Electrolysis System (Abr-Bes): A Design Suitable For Scaling-Up. *Bioresource Technology*, 254–261.
- Diaz, C. E. (2014). Aplicaciones Electroquímicas Al Tratamiento De Aguas Residuales. México, D.F.: Reverte.
- Dolly M. Revelo, N. H. (2013). Celdas De Combustible Microbianas (Ccms): Un Reto Para La Remoción De Materia Orgánica Y Generación de Energía Eléctrica. *Información Tecnológica*, Vol 24(6), 17-28.
- Eustace Fernando, T. K. (2012). Enhanced Bio-Decolourisation Of Acid Orange 7 By *Shewanella Oneidensis* Through Co-Metabolism In A Microbial Fuel Cell. *International Biodeterioration & Biodegradation* 72 (2012) 1e9, 1-9.
- Fanying Kong, A. W. (2013). Improved Azo Dye Decolorization In A Modified Sleeve-Type Bioelectrochemical System. *Bioresource Technology* , 669–673.

- Fanying Kong, A. W.-Y. (2015). Improved Azo Dye Decolorization In An Advanced Integrated System Of Bioelectrochemical Module With Surrounding Electrode Deployment And Anaerobic Sludge Reactor. *Bioresource Technology* , 624–628.
- Frank P. Van Der Zee, S. V. (2005). Combined Anaerobic–Aerobic Treatment Of Azo Dyes—A Short Review Of Bioreactor Studies. *Water Research* , 39, 1425–1440.
- G.M. Shaul, T. H. (1991). Fate Of Water-Soluble Azo Dyes In The Activated-Sludge Process. 22.
- Germán Giacomán Vallejos, J. F. (2003). Análisis De La Hidrodinámica De Un Reactor De Flujo Pistón . *Ingeniería* , 7-19.
- González-Gutiérrez, L. V. (2006). Estudio de la degradación de un colorante azo rojo reactivo en un biorreactor anaerobio de flujo ascendente. Celaya: ITC (Tesis).
- Gonzalez-Gutierrez, C. F. (2015). Upflow Fixed Bed Bioelectrochemical Reactor For Wastewater Treatment. *Bioresource Technology*, 292-295.
- Heming Wang, H. L. (2015). Bioelectrochemical System Platform For Sustainable Environmental Remediation And Energy Generation. *Biotechnology Advances* , 317–334.
- Hou-Yun Yang, C.-S. H.-Y.-Q. (2016). Process And Kinetics Of Azo Dye Decolourization In Bioelectrochemical Systems: Effect of Several Key Factors. *Scientific Reports*, 1-9.
- Jian Sun, Y.-Y. H.-Q. (2009). Simultaneous Decolorization of Azo Dye and Bioelectricity Generation Using A Microfiltration Membrane Air-Cathode Single-Chamber Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, Vol 100, 3185-3192.
- Jinyou She, X. X. (2014). Coupling Of A Bioelectrochemical System For P-Nitrophenol Removal In An Upflow Anaerobic Sludge Blanke Reactor. *Water Research*, 11-18.
- Liang Liu, F.-B. L.-H. (2009). Microbial Fuel Cell With An Azo-Dye-Feeding Cathodo. *Environmental Biotechnology*, 175-183.
- Martínez, E. G. (2011). Efectos Cinéticos E Hidráulicos En La Operación De Un Bio-Electro-Reactor De Lecho Fijo En Continuo, Para La Degradación Del Colorante Azo Rojo Reactivo 272. Querétaro: ITO. (Tesis).
- Min-Hua Cui, D. C.-S.-J.-Y. (2016). Effect Of Electrode Position On Azo Dye Removal In An Up-Flow Hybrid Anaerobic Digestion Reactor With Built-In Bioelectrochemical System. *Scientific Reports* , 1-9.

- Min-Hua Cui, D. C.-Y.-J. (2016). Efficient Azo Dye Decolorization In A Continuous Stirred Tank Reactor (Cstr) With Built-In Bioelectrochemical System. *Bioresource Technology* , 1307–1311.
- Mohammad Zain Khan, S. S. (2015). Studies On The Biodegradation Of Two Different Azo Dyes In Bioelectrochemical Systems. *Royal Society Of Chemistry*, 5597-5604.
- Picioreanu, C. (2010). Modelling Microbial Fuel Cells With Suspended Cells And Added Electron Transfer Mediator. *Journal of Applied Electrochemistry*, 151–162.
- Qishi Luo, H. W. (2005). Effect Of Direct Electric Current On The Cell Surface Properties Of Phenol-Degrading Bacteria. *Applied And Environmental Microbiology*, 423–427.
- Ranalli G, M. I. (2002). Effects Of Low Electric Treatment On Yeast Microflora. *Journal Of Applied Microbiology* , Vol 93, 877-883.
- Ruixia Hao, C. M. (2016). An Integrated Process Of Three-Dimensional Biofilm-Electrode With Sulfur Autotrophic Denitrification (3dber-Sad) For Wastewater Reclamation. *Appl Microbiol Biotechnol* , 7339 – 7348.
- Ruixia Hao, S. L. (2013). Denitrification Of Simulated Municipal Wastewater Treatment Plant Effluent Using A Three-Dimensional Biofilm-Electrode Reactor: Operating Performance And Bacterial Community. *Bioresource Technology*, 178–186.
- Souhail R. Al-Abed, Y. F. (2006). Influences Of Ph And Current On Electrolytic Dechlorination Of Trichloroethylene At A Granular-Graphite Packed Electrode. *Chemosphere*, 462–469.
- Stolz, A. (2001). Basic And Applied Aspects In The Microbial Degradation Of Azo Dyes . *Applied Microbiology And Biotechnology*, Vol 56, 69–80.
- Xian Cao, F. G.-N. (2017). The Degradation Of Azo Dye With Different Cathode And Anode Structures In Biofilm Electrode Reactors. *Rcs Advances*, 16854-16860.
- Xian Cao, X. L. (2017). Effects Of Electrical Stimulation On The Degradation Of Azo Dye In Three-Dimensional Biofilm Electrode Reactors. *Water* , 2-11.
- Xian Cao, X. L. (2017). Effects Of Electrical Stimulation On The Degradation Of Azo Dye In Tree-Dimensional Biofilm Electrode Reactors. *Water*, 1-11.
- Xinbai Jiang, J. S. (2016). Efficient Nitro Reduction And Dechlorination Of 2,4-Dinitrochlorobenzene Through The Integration Of Bioelectrochemical System Into Upflow Anaerobic Sludge Blanket: A Comprehensive Study. *Water Research*, 257-265.

- Yang Mu, K. R. (2009). Decolorization Of Azo Dyes In Bioelectrochemical Systems. *Environ. Sci. Technol*, 5137–5143.
- Yuan Pan, Y. W. (2017). Removal Of Azo Dye In An Up-flow Membrane-Less Bioelectrochemical System Integrated With Bio-Contact Oxidation Reactor. *Chemical Engineering Journal* 326 (2017) 454–461, 454–461.
- Yunqing Cao, Y. H. (2010). Explore Varios Co-Substrates For Simultaneous Electricity Generation And Congo Red Degradation In Air-Cathode Single-Chamber Microbial Fuel Cell. *Bioelectrochemistry*, 71-76.