

## 9. ANEXOS

A continuación, se muestran los valores exactos obtenidos durante toda la experimentación del trabajo de aplicación de tratamientos electroquímicos para la eliminación de bacterias patógenas en aguas.

Las celdas vacías que se observan en algunas tablas pueden deberse a dos motivos principales: no se dispone del dato porque no se realizó el análisis correspondiente, o bien, el valor corresponde a una desviación estándar que no pudo calcularse.

Este segundo caso ocurre cuando únicamente se obtuvo un dato individual mediante el método Quanti-Tray 2000, ya que no siempre se disponía de resultados por siembra en placa, debido a placas que no mostraban crecimiento o que se descartaban por alguna razón. Dado que las siembras en placa se realizaban por duplicado, permitiendo el cálculo de la desviación estándar, y el Quanti-Tray 2000 se aplicaba una sola vez por punto de muestreo no siempre ha sido posible calcular dicha desviación.

### 9.1. Anexo I: Concentraciones de *Escherichia coli* durante los tratamientos electroquímicos

En la Tabla 10 se pueden observar los valores de concentración de *E.coli* obtenidos y las desviaciones estándar calculadas con los datos de los ensayos duplicados del primer tratamiento preliminar, realizado en una disolución de sulfato de sodio y donde se aplicó la oxidación anódica con el objetivo de desinfectar la muestra.

Tabla 1. Concentraciones de *E.coli* en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> durante el tratamiento de oxidación anódica. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Oxidación anódica		Control	
	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)
0	3,19E+06	4,19E+05	9,93E+06	0
2	1,03E+06	3,30E+05	-	-
5	2,51E+05	8,77E+04	-	-
8	1,50E+03	7,07E+02	-	-
10	1,00E+03	0	-	-
12	1,00E+03	0	-	-
15	1,00E+03	0	-	-
20	1,00E+03	0	-	-
25	1,00E+03	0	-	-

<b>30</b>	1,00E+03	0	7,13E+06	8,96E+05
-----------	----------	---	----------	----------

En las siguientes tablas, la Tabla 11, 12 y 13 se pueden consultar las concentraciones de *E.coli* obtenidas y las desviaciones estándar calculadas durante los tratamientos electroquímicos que se realizaron en ARDS: oxidación anódica, electro-Fenton y fotoelectro-Fenton, respectivamente. Además, en las Tablas 12 y 13 se pueden observar más datos, debido a que los valores se dividen en tres columnas, las cuales representan los tres catalizadores de hierro utilizados: la hematita, la magnetita y la ferrita de bismuto.

Tabla 2. Concentraciones de *E.coli* en ARDS durante el tratamiento de oxidación anódica. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Oxidación anódica	
	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)
<b>0</b>	1,04E+07	7,11E+06
<b>30</b>	3,45E+06	-
<b>60</b>	7,76E+05	-
<b>90</b>	4,95E+04	3,18E+04

Tabla 3. Concentraciones de *E.coli* en ARDS durante el tratamiento de electro-Fenton con diferentes catalizadores de hierro. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Hematita		Magnetita		Ferrita de bismuto	
	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)
<b>0</b>	8,90E+06	1,23E+07	2,85E+06	3,54E+06	1,20E+07	5,09E+06
<b>15</b>	-	-	3,28E+06	-	2,00E+05	1,86E+05
<b>30</b>	1,02E+05	-	6,21E+05	8,50E+05	1,00E+03	-
<b>60</b>	4,82E+05	4,50E+05	4,41E+04	5,78E+04	1,00E+03	-
<b>90</b>	1,33E+03	5,77E+02	7,80E+02	1,09E+03	5,43E+02	6,46E+02

Tabla 4. Concentraciones de *E.coli* en ARDS durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con diferentes catalizadores de hierro. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Hematita		Magnetita		Ferrita de bismuto	
	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)
0	1,48E+06	1,24E+06	2,73E+05	-	6,00E+06	1,41E+06
15	-	-	1,00E+03	-	1,10E+05	1,54E+05
30	7,55E+02	1,05E+03	5,43E+02	6,46E+02	5,05E+02	7,00E+02
60	5,05E+02	7,00E+02	1,00E+01	-	1,00E+01	-
90	1,00E+01	-	1,00E+01	-	1,00E+01	-

A continuación, se muestra la última tabla del Anexo I, la Tabla 14, en la cual quedan recogidos los resultados de concentraciones de *E.coli* conseguidos en un control de luz, para poder analizar de forma correcta la eficiencia del tratamiento fotoelectro-Fenton.

Tabla 5. Concentraciones de *E.coli* en ARDS durante el control de luz para el tratamiento de fotoelectro-Fenton con diferentes catalizadores de hierro. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Concentración (UFC/100mL)
0	2,7E+06
30	1,0E+05
90	5,5E+04

## 9.2. Anexo II: Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos durante los tratamientos electroquímicos para la desinfección de *Escherichia coli*

En el Anexo II se pueden observar los datos obtenidos sobre la producción de peróxido de hidrógeno durante la desinfección de *E.coli*, junto con los parámetros electroquímicos del sistema aplicados durante la misma: el voltaje y la corriente eléctrica. Todos los datos corresponden a medias calculadas con los valores conseguidos en cada ensayo, los cuales se hicieron por duplicado.

En la Tabla 15 se muestran dichos valores obtenidos durante el primer tratamiento preliminar de oxidación anódica en una disolución de sulfato sódico, para la desinfección de la bacteria Gram-negativa.

Tabla 6. Concentraciones de  $H_2O_2$  y parámetros electroquímicos durante el tratamiento de oxidación anódica para la desinfección de *E.coli* en  $Na_2SO_4$  . Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	$H_2O_2$ (mg/L)
0	3,64	10	0
2	3,64	10	0
5	3,64	11	0,026
8	3,64	12	0,009
10	3,64	12	0,810
15	3,64	12	0,260
20	3,64	12	0,004
25	3,64	12	0,009
30	3,64	12	0,039

En la Tabla 16 se pueden observar los valores de concentración de  $H_2O_2$ , el voltaje y la corriente eléctrica utilizados en el primer experimento realizado en ARDS y en el que se aplicó la oxidación anódica.

Tabla 7. Concentraciones de  $H_2O_2$  y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de oxidación anódica para la desinfección de *E.coli*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	$H_2O_2$ (mg/L)
0	5,48	8	0
30	5,48	10	2,890
60	5,48	10	4,608
90	5,48	10	6,125

En las siguientes Tablas 17, 18 y 19, se muestran los resultados obtenidos durante la desinfección de *E.coli* en ARDS al aplicar el tratamiento electro-Fenton. Cada una de las tablas corresponde al uso de un catalizador diferente: hematita, magnetita y ferrita de bismuto, respectivamente.

Tabla 8. Concentraciones de  $H_2O_2$  y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de electro-Fenton con hematita para la desinfección de *E.coli*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	$H_2O_2$ (mg/L)
0	4,99	8	0
30	5,24	9	3,111
60	5,49	10	5,671
90	5,49	10	7,255

Tabla 9. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de electro-Fenton con magnetita para la desinfección de *E.coli*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	4,10	8	0
15	4,20	8	1,319
30	4,20	9	2,222
60	4,20	9	3,312
90	4,30	10	4,100

Tabla 10. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de electro-Fenton con ferrita de bismuto para la desinfección de *E.coli*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	4,08	9	0
15	4,08	9	1,226
30	4,08	9	2,188
60	4,13	10	3,228
90	4,20	10	3,944

En las siguientes Tablas 20, 21 y 22, se muestran los resultados obtenidos durante la desinfección de *E.coli* en ARDS al aplicar el tratamiento fotoelectro-Fenton. Cada una de las tablas corresponde al uso de un catalizador diferente: hematita, magnetita y ferrita de bismuto, respectivamente.

Tabla 11. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con hematita para la desinfección de *E.coli*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	4,40	10	0
15	4,40	12	1,604
30	4,58	14	2,761
60	4,48	12	3,448
90	4,38	10	4,426

Tabla 12. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con magnetita para la desinfección de *E.coli*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	4,00	8	0
15	4,00	9	1,100
30	4,00	10	1,786
60	4,00	10	2,294
90	4,00	10	2,589

Tabla 13. Concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con ferrita de bismuto para la desinfección de *E.coli*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	$\text{H}_2\text{O}_2$ (mg/L)
0	4,03	9	0
15	4,03	10	1,209
30	4,10	11	1,884
60	4,10	12	2,635
90	4,15	13	2,561

### 9.3. Anexo III: Concentraciones de *Enterococcus faecalis* durante los tratamientos electroquímicos

En las siguientes tablas, la Tabla 23 y 24, se pueden consultar las concentraciones de *E.faecalis* obtenidas y las desviaciones estándar calculadas durante los tratamientos electroquímicos que se realizaron en ARDS: electro-Fenton y fotoelectro-Fenton, respectivamente.

Los valores de la Tabla 23 quedan divididos en dos columnas, las cuales representan los dos catalizadores de hierro utilizados: la magnetita y la ferrita de bismuto.

Tabla 14. Concentraciones de *E.faecalis* en ARDS durante el tratamiento de electro-Fenton con diferentes catalizadores de hierro. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Magnetita		Ferrita de bismuto	
	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)
0	6,49E+06	6,99E+06	3,12E+07	9,81E+06
15	8,73E+06	9,02E+04	9,50E+06	2,83E+06
30	3,92E+06	2,12E+06	5,80E+06	4,24E+05
60	1,40E+06	1,96E+06	3,32E+06	2,61E+06
90	4,00E+04	5,52E+04	2,39E+06	1,19E+06

Por otro lado, en la Tabla 24, además de las columnas correspondientes a magnetita y ferrita de bismuto, se puede observar una tercera columna, correspondiente a un control de luz realizado para analizar de manera correcta la efectividad del tratamiento fotoelectro-Fenton.

Tabla 15. Concentraciones de *E.faecalis* en ARDS durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con diferentes catalizadores de hierro. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Magnetita		Ferrita de bismuto		Control de luz
	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)	Concentración (UFC/100mL)
0	1,07E+07	3,79E+06	2,87E+07	1,32E+07	7,60E+06
15	1,03E+07	4,75E+05	1,39E+07	7,31E+06	-
30	6,84E+06	8,42E+06	1,20E+07	1,26E+07	6,80E+06
60	3,73E+06	3,01E+05	6,88E+03	1,94E+03	-
90	2,70E+05	1,00E+05	4,75E+03	1,06E+03	5,59E+06

#### 9.4. Anexo IV: Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos durante los tratamientos electroquímicos para la desinfección de *Enterococcus faecalis*

Las Tablas 25 y 26 recogen los datos de concentraciones de peróxido de hidrógeno producidas durante el tratamiento electro-Fenton para la eliminación de *E.faecalis*, además de el voltaje y corriente eléctrica aplicados. La Tabla 25 presenta los valores obtenidos durante el tratamiento en el que se usó magnetita como catalizador y la Tabla 26, aquellos obtenidos cuando se usó ferrita de bismuto.

Tabla 16. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de electro-Fenton con magnetita para la desinfección de *E.faecalis*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	4,15	8	0
15	4,15	8	0,975
30	4,18	8	1,807
60	4,23	9	3,059
90	4,28	10	3,639

Tabla 17. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de electro-Fenton con ferrita de bismuto para la desinfección de *E.faecalis*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	4,10	9	0
15	4,10	9	1,405
30	4,10	9	2,312
60	4,10	9	3,610
90	4,10	9	3,766

Las Tablas 27 y 28 recogen los datos de concentraciones de peróxido de hidrógeno producidas durante el tratamiento fotoelectro-Fenton para la inactivación de *E.faecalis*, junto al voltaje y corriente eléctrica utilizados. La Tabla 27 presenta los valores obtenidos durante el tratamiento en el que se usó magnetita como catalizador y la Tabla 28, aquellos obtenidos cuando se usó ferrita de bismuto.

Tabla 18. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con magnetita para la desinfección de *E.faecalis*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	4,08	11	0
15	4,08	11	1,309
30	4,08	12	2,129
60	4,08	12	2,804
90	3,95	11	2,837

Tabla 19. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en ARDS durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con ferrita de bismuto para la desinfección de *E.faecalis*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	4,10	8	0
15	4,10	10	1,343
30	4,08	11	2,252
60	4,00	11	2,634
90	3,98	11	2,674

### 9.5. Anexo V: Concentraciones de *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis* en agua residual depurada real durante el tratamiento fotoelectro-Fenton con ferrita de bismuto

La Tabla 29 muestra las concentraciones de ambas bacterias estudiadas y la desviación estándar calculada a partir de los datos obtenidos realizando duplicados de cada ensayo. Estos ensayos consistieron en la aplicación del tratamiento fotoelectro-Fenton con BiFeO<sub>3</sub> para la eliminación de *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis* en una muestra real de agua de salida de la EDAR de Tudela.



Tabla 20. Concentraciones de *E.coli* y *E.faecalis* en agua residual depurada real durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con ferrita de bismuto. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	<i>E.coli</i>		<i>E.faecalis</i>	
	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)	Concentración (UFC/100mL)	Desv. est. (UFC/100mL)
0	5,87E+06	1,65E+06	2,11E+07	3,71E+06
15	6,50E+04	1,41E+04	2,10E+05	1,56E+05
30	5,50E+03	5,20E+03	1,28E+05	3,54E+03
60	1,00E+03	-	8,25E+03	3,54E+02
90	1,00E+03	-	8,00E+03	3,54E+03

## 9.6. Anexo VI: Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en agua residual depurada real durante el tratamiento fotoelectro-Fenton con ferrita de bismuto para la desinfección de *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis*

La Tabla 30 presenta las concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> obtenidas y el voltaje y la corriente eléctrica aplicados en el tratamiento fotoelectro-Fenton con BiFeO<sub>3</sub> para la eliminación de *Escherichia coli* en una muestra real de agua de salida de la EDAR de Tudela. Los mismos datos son mostrados en la Tabla 31, pero corresponden a la eliminación de *Enterococcus faecalis* en las mismas condiciones operativas, es decir, se utilizó la misma matriz, tratamiento y catalizador.

Tabla 21. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en agua residual depurada real durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con ferrita de bismuto para la desinfección de *E.coli*. Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	5,65	8	0
15	5,65	11	1,427
30	5,58	11	2,929
60	5,25	9	4,842
90	5,15	10	5,664

Tabla 22. Concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y parámetros electroquímicos en agua residual depurada real durante el tratamiento de fotoelectro-Fenton con ferrita de bismuto para la desinfección de *E.faecalis*.  
Elaboración propia.

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (mA)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)
0	6,00	7	0
15	6,00	9	1,991
30	5,80	11	3,311
60	5,65	12	5,248
90	5,15	9	5,338