

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

ESCUELA DE POSGRADO

**SECCIÓN DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA**



TESIS

**REDUCCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE AMARILLO DE TARTRAZINA
CONTENIDO EN AGUAS DE LAVADO DE LA INDUSTRIA DE
BEBIDAS, MEDIANTE UV/H₂O₂.**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO
ACADÉMICO DE MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

AUTORES:

**Bach. AGÉRICO PANTOJA CADILLO
Bach. RONALD ARNALDO PORTALES TARRILLO**

ASESOR

Msc. CÉSAR GUTIÉRREZ CUBA

Callao, 2015

PERU

ÍNDICE

TABLA DE CONTENIDO.....	7
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	12
1.1 Identificación del problema.	12
1.2 Formulación del problema.	17
Problema general.	17
Problemas específicos.	17
1.3 Objetivos de investigación.	18
Objetivo general.	18
Objetivos específicos.	18
1.4 Justificación	19
II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Antecedentes del Estudio	20
2.2 Tratamiento de aguas.	23
2.2.1 Aguas residuales de la industria de bebidas gaseosas y otras.	24
2.2.2 Tratamientos de oxidación avanzada	25
2.2.3 Radical Hidroxilo	26
2.3 Colorantes	30
2.3.1 Espectro electromagnético.	30
2.3.2 Colorantes azoicos.....	31
2.3.3 Colorante amarillo de tartrazina (Amarillo 5).....	31
2.3.4 Fotocatálisis.	35
2.3.5 Fotodegradación.	36
2.3.6 Constante de velocidad de reacción.	36
2.3.7 Reacciones fotoquímicas.....	37
2.3.8 Cinética de las reacciones de foto-degradación.	38

2.3.9	Cinética de degradación del amarillo de tartrazina.	38
2.4	Reactor fotocatalítico anular	41
2.4.1	Balances de materia en fotoreactores anulares.	45
2.4.2	Efecto de la temperatura en la degradación del amarillo de tartrazina.	46
2.4.3	Efecto del oxidante y la radiación UV.	48
2.4.4	Degradación a condiciones constantes de oxidante (H ₂ O ₂) y a diferentes concentraciones de amarillo de tartrazina.	49
2.4.5	Degradación a condiciones constantes de concentraciones de amarillo de tartrazina y a diferentes concentraciones de oxidante (H ₂ O ₂)	50
2.4.6	Estudios de fotodegradación de compuestos orgánicos presentes en aguas residuales.	51
2.4.7	Influencia de la longitud de onda e intensidad de la luz.....	54
2.4.8	Influencia del oxígeno	55
2.4.9	Influencia de la concentración de H ₂ O ₂	55
2.4.10	Influencia de la Temperatura y pH.....	56
2.4.11	Influencia de la calidad del agua a tratar.....	56
2.5	Normatividad.	57
2.5.1	Normatividad Nacional e internacional	57
2.5.2	Química Verde	61
2.5.3	Los doce principios de la química verde.	61
2.6	Diseño experimental.	62
2.6.1	Diseños factoriales con tres factores.....	62
2.6.2	El modelo sin réplica	62
2.6.3	El modelo con réplica.....	66

2.6.4	Optimización de procesos con superficies de respuesta.....	69
2.6.5	Análisis de gráfico de una Superficie de Respuesta.....	72
2.7	Definición de términos básicos	73
III.	VARIABLES E HIPÓTESIS.....	75
3.1	Definición de las variables.	75
3.2	Operacionalización de las variables.	76
3.3	Hipótesis general e hipótesis específicas	78
IV.	METODOLOGÍA.....	79
4.1	Tipo de investigación.	79
4.2	Diseño de la investigación.	79
4.2.1	Equipo experimental.	79
4.3	Población y muestra.	83
4.3.1	Preparación de experimentos.....	83
4.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	84
4.4.1	Determinación de pH.	84
4.4.2	Determinación de concentración de colorante amarillo de tartrazina...	84
4.5	Determinación de Color en la escala platino/cobalto	85
4.6	Plan de análisis estadísticos de datos.	85
V.	RESULTADOS.....	89
5.1	Resultados Parciales.	89
5.1.1.	Influencia del grado de acidez, en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina.	89
5.1.2.	Influencia de concentración de peróxido de hidrogeno (H ₂ O ₂) en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina....	92
5.1.3.	Influencia de los cambios de flujo volumétrico en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina.	94
5.2	Resultados Generales.	96
5.3	Análisis estadístico de los resultados.	97

5.3.1	Determinación de los coeficientes del modelo de regresión, para el porcentaje de reducción a t = 20, 40, 60, 80, 100.00 min).....	98
5.3.2	Determinación de los parámetros estadísticos a diferentes tiempos.	101
5.3.3	Determinación de probabilidad normal de las respuestas.	101
5.3.4	Determinación de gráfico de contorno y gráfico de superficie para el pH, Caudal, Concentración de peróxido.....	104
5.3.5	Diagrama de caja para variable respuesta (% Reducción amarillo de tartrazina).....	109
5.4	Determinación de la constante de velocidad de reacción a diferente pH, concentración de H₂O₂ y caudal.	113
5.5.1	Determinación de la constante de velocidad óptima.....	119
5.6	Condiciones óptimas para la reducción de amarillo de tartrazina.	120
VI.	DISCUSION DE RESULTADOS.	121
6.1	Contrastación de la hipótesis con los resultados.	121
a)	Influencia del grado de acidez (pH)	123
b)	Influencia de la concentración de peróxido de hidrógeno.....	124
c)	Influencia del flujo volumétrico (Caudal).....	125
6.2	Contrastación de resultados con otros estudios similares.	127
6.2.1	Análisis de la influencia del grado de acidez, caudal, [H₂O₂]_{inicial} en el % de reducción de Amarillo de Tartrazina.....	127
6.2.2	Análisis y evaluación de los modelos estadísticos lineal, cuadrático y las interacciones.	129
6.2.3	Evaluación de la probabilidad normal.....	136
6.2.4	Interpretación de los valores atípicos (outlier).	138
6.2.5	Análisis e Interpretación de los gráficos de contorno de pH, Caudal, Concentración de peróxido H₂O₂ % Red-20.00 min, % Red-40.00min, % Red-60.00min.	139
6.2.6	Análisis y evaluación de los gráficos caja bigote a los tiempos, 20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00 min.....	140

6.2.6.1	Análisis y evaluación del % Reducción AMT vs [H₂O₂], en los gráficos caja bigote a los tiempos, 20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00 min.	141
6.2.6.2	Análisis y evaluación del % Reducción AMT vs Caudal, en los gráficos caja bigote a los tiempos, 20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00 min.	142
6.2.6.3	Análisis y evaluación del % Reducción AMT vs pH, en los gráficos caja bigote a los tiempos, 20, 40, 60, 80 y 100min.	143
6.2.7	Análisis y evaluación de la constante de velocidad de reacción.	144
6.2.8	Análisis y evaluación de la constante de velocidad de reacción óptima.	144
6.2.9	Análisis y de las condiciones Óptimas para la reducción de amarillo de tartrazina.	144
6.3	Contrastación de resultados con otros estudios similares: Para validar la Influencia del pH, concentración de peróxido de hidrógeno, caudal (flujo volumétrico) en la reducción de colorante amarillo de tartrazina.	145
VII.	CONCLUSIONES.	150
VIII.	RECOMENDACIONES.	151
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	152
X.	ANEXOS.	160
10.1	Matriz de consistencia.	160
10.2	Nomenclatura de términos científicos.	161
10.3	Curva patrón, para medida de la concentración de colorante amarillo de tartrazina mediante.	163
10.4	Certificado de análisis del colorante amarillo de tartrazina mediante.	164
10.5	Absorbancia de amarillo de tartrazina a ph=4.0.	165
10.6	Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=6.	166
10.7	Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=8.0.	167
10.8	Constantes cinéticas ordenadas en forma creciente.	168

10.9	Reducción de color en escala platino-cobalto.	169
10.10	Concentración de amarillo de tartrazina a diferentes tiempos de reacción, flujo volumétrico y pH.....	170
10.11	Reducción de color en escala platino-cobalto.	171
10.12	Imágenes de pruebas experimentales.....	172
10.13	Resultados de las pruebas experimentales con agua de lavado tomado de la industria de bebidas.	173

TABLA DE CONTENIDO.

Cuadros:

1.1	Análisis de consumo de agua junio-2009	13
1.2	Volumen de efluentes de agua junio-2009	14
1.3	Análisis de efluentes de agua junio-2009	15
2.1	Promedio específico de aguas residuales descargadas	24
2.2	Tratamientos avanzados de oxidación	27
2.3	Potencial de reducción estándar de las principales especies oxidantes.	29
2.4	Parámetros cinéticos de amarillo de tartrazina a varias temperaturas.	45
2.5	Diferentes concentraciones de amarillo de tartrazina y la concentración del oxidante (H ₂ O ₂) constante.	48
2.6	Diferentes concentraciones del oxidante (H ₂ O ₂), y la concentración de amarillo de tartrazina constante.	49
2.7	Los Doce Principios de la Química Verde.	60
2.8	Parámetros estadísticos.	62
2.9	ANOVA: modelo factorial con tres factores (sin réplica).	65
2.10	Tabla ANOVA: modelo factorial con tres factores (con réplica).	67
3.1	Operacionalización de variables	75
4.1	Especificaciones del reactor UV	78
4.2	Diseño factorial completo (3 ³ =27 pruebas experimentales)	85
4.3	Diseño experimental para pruebas.	86
5.1	Reducción de amarillo de tartrazina a diferentes tiempos de reacción, flujo volumétrico y pH	89
5.2	Porcentaje de reducción de colorante amarillo de tartrazina a diferentes a diferentes tiempos de reacción	94
5.3	Coeficiente del modelo de regresión para el porcentaje de reducción	96
5.4	Porcentaje de reducción de AMT estimado para cada tiempo 20,40,60, 80,100 min.	97
5.5	Constante de velocidad de reacción a diferentes pH, concentración de H ₂ O ₂ por caudal	112
6.1	Porcentaje de reducción de colorante amarillo de tartrazina a diferentes tiempos de reacción.	125
6.2	Análisis de varianza – regresión de superficie respuesta (%R-20.00 min vs PEROX, CAUDAL, pH	127
6.3	Análisis de varianza – regresión de superficie respuesta (%R-40.00 min vs PEROX, CAUDAL, pH	128
6.4	Análisis de varianza – regresión de superficie respuesta (%R-60.00 min vs PEROX, CAUDAL, pH	130
6.5	Análisis de varianza – regresión de superficie respuesta (%R-	131

800.00 min vs PEROX, CAUDAL, pH

Gráficos:

6.6	Análisis de varianza – regresión de superficie respuesta (%R-100.00 min vs PEROX, CAUDAL, pH	133
10.1	Matriz de consistencia	156
10.2	Constantes cinéticas ordenadas en forma creciente	164
10.3	Concentración de Am para 27 pruebas experimentales	166

Figuras

2.1.	Diagrama de las tecnología existentes para el tratamiento de agua residual en el rango de carga orgánica y volumen a tratar para los que son más eficientes.	28
2.2.	Fórmula molecular del colorante amarillo de tartrazina	33
2.3.	Colorantes orgánicos.	34
2.4.	Reactor tubular para ensayos fotocatalíticos en fase gas con lámpara UV.	42
2.5.	Foto-reactor anular.	43
2.6.	Esquema del dispositivo experimental para degradar tricloroetileno.	44
2.7.	Parámetros cinéticos de amarillo de tartrazina a varias temperaturas.	46
2.8.	Efecto del oxidante y la radiación UV.	47
2.9.	Representación de variables y respuesta (primer orden)	69
2.10.	Representación de variables y respuesta (segundo orden).	70
2.11.	Representación de variables y respuesta.	71
4.1	Etapas del diseño de Investigación	77
4.2	Diseño experimental (Equipo foto-reactor experimental - LOPU	80
4.3	Muestras a diferentes tiempos de reacción	80
4.4	Equipos para la determinación de: pH, color, concentración	84
10.1	Certificado de análisis del colorante amarillo de tartrazina	160
10.2	Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=4.0 a t= 20,40,60,80,100 minutos	161
10.3	Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=6.0 a t= 20,40,60,80,100 minutos	162
10.4	Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=8.0 a t=20,40,60,80,100 minutos	163
10.5	Reducción de color	167
10.6	Pruebas experimentales	168
10.7	Pruebas experimentales con agua de lavado	170

5.1.	Concentración de AMT a diferentes condiciones de pH	88
5.2.	Reducción de la concentración a AMT a diferentes $[H_2O_2]$	91
5.3.	Porcentaje de reducción de AMT Vs Tiempo a distintos flujo volumétrico a % de reducción Vs Tiempo , a flujo volumétrico=2.00L/min	93
5.4.	Probabilidad normal para % Red-20min, % Red-40 min, % Red-60 min, % Red-80 min, % Red-100 min.	98
5.5.	Probabilidad normal para % Red-20.00min, % Red-40.00min, % Red-60.00min, % Red-80.00min, % Red-100.00 min.	100
5.6.	% Reducción AMT a 20.00 min vs Caudal y $[H_2O_2]$	101
5.7.	% Reducción AMT a 40.00min vs CAUDAL y $[H_2O_2]$	102
5.8.	% Reducción AMT a 60.00 min vs CAUDAL y $[H_2O_2]$	103
5.9.	% Reducción AMT a 80.00 min vs CAUDAL y $[H_2O_2]$	104
5.10.	% Reducción AMT a 100.00 min vs CAUDAL y $[H_2O_2]$	105
5.11.	Caja bigote a los tiempos 20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00 min.	106
5.12.	Diagrama de caja, % Reducción AMT vs $[H_2O_2]$	107
5.13.	Diagrama de caja, % Reducción AMT vs Caudal	108
5.14.	Diagrama de caja % Reducción AMT vs pH	109
5.15.	Gráfico de velocidad de reacción a pH=8.00, Concentración de H_2O_2 y Caudal 4.00 l/min y 6.00 l/min	113
5.16.	Gráfico de velocidad de reacción a pH=6.00, concentración de H_2O_2 y caudal 6.00 l/min, 4.00 y 2.00 l/min	114
5.17.	Gráfico de velocidad de reacción a pH=4.00, concentración de H_2O_2 y caudal 6.00 l/min y 4.00 l/min	115
5.18.	Gráfico de constante de velocidad de reacción, Óptima.	116
5.19.	Condiciones óptimas para la reducción de amarillo de tartrazina.	117
10.1.	Curva patrón para medida de la concentración de colorante Amarillo de Tartrazina – espectrofotometría	159
10.2.	Reducción de color en escala platino - cobalto	165

RESUMEN

La presente tesis da a conocer la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina, contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, con el uso de luz ultravioleta y H_2O_2 .

La reducción de la concentración del colorante mencionado, se realizó experimentalmente en un foto-reactor anular del laboratorio LOPU-FIQ y en condiciones variables, de acidez, concentración de H_2O_2 y flujo volumétrico.

Los resultados experimentales, tuvieron el tratamiento estadístico, que permitieron identificar las condiciones óptimas para la reducción de amarillo de tartrazina. En función de ello se determinó la constante de velocidad de reacción de $0,1788 \text{ min}^{-1}$ a $24,00 \pm 1,00^\circ\text{C}$ a una concentración de H_2O_2 de $50,00 \pm 1,00 \text{ ppm}$ de H_2O_2 , un flujo volumétrico de $2,00 \text{ l/min}$ y un $\text{pH} = 4,00 \pm 0,200$.

ABSTRACT

This thesis shows the reduction of the concentration of Tartrazine dye contained in the rinse water of beverage industries, with the use of UV and H₂O₂. The reduction of the dye concentration was experimentally carried out in a annular photo-reactor (LOPU_FIQ) and under varying conditions of acidity, concentration of H₂O₂ and volumetric flow.

The experimental results, statistically treated, allowed to identify the optimum conditions for the reduction of Tartrazine. Accordingly, the reaction rate constant was determined to be 0,1788 min⁻¹ at 24,00 ± 1,00 °C at a H₂O₂ concentration of 50,00 ± 1,00 ppm, with a volumetric flow of 2,00 l / min and a pH = 4,00 ± 0,200.

I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1 Identificación del problema.

En la actualidad en todos los países, los efluentes coloreados se tratan con lodos activados biológicamente, procesos de coagulación química, oxidación catalizada de sulfuros, floculación, decoloración con flotación, sedimentación, filtración, cloración y con carbón activo. Sin embargo, a menudo no se consigue descontaminarlos en su totalidad debido a que estas tecnologías no trabajan eficientemente por causa de la alta solubilidad de colorantes sintéticos ya que muchos colorantes son elaborados para resistir degradación química y biológica.

En nuestro país las aguas residuales son un grave problema, ya que estas contienen diversos componentes químicos; los mismos que dependen del tipo de industria. En las industrias alimentarias ,principalmente en la de bebidas gasificadas, nos encontramos con colorantes azoicos que son usados para mejorar el aspecto del producto y darle un color aceptable al consumidor, dentro de estos colorantes se encuentra el amarillo de tartrazina, principal aditivo de las bebidas amarillas, por ello su presencia en los efluentes líquidos es inevitable, tal es así que estos colorantes al ser solubles en agua generan un color amarillo, las mismas que son vertidas sin tratamiento alguno en las

cuencas receptoras agudizando de esta forma el impacto visual y por lo tanto el malestar social.

Tal es así que al realizar un análisis de producción y consumo de agua en una planta de producción de bebidas (AJEPER), se obtuvo que de una producción de 180,00 m³/h de agua, 167,17m³ se utilizan con fines productivos, teniendo así 22,83 m³ de residuales (efluentes). (Véase Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1
ANÁLISIS DE CONSUMO DE AGUA JUNIO-2009

PRODUCCION TOTAL DE AGUA(m3/h)	190,00
AGUA PROCESO (m ³ /h)	80,69
AGUA BLANDA (m ³ /h)	57,11
AGUA FILTRADA (m ³ /h)	28,94
OTROS SERVICIOS (m ³ /h)	0,440
CONSUMO TOTAL PRODUCCIÓN (m³/h)	167,17
RESIDUALES(EFLUENTES) (m³/h)	22,83

Fuente: Elaboración propia con apoyo de gerencia producción.

Al analizar las pérdidas por residuales (efluentes) de agua, se puede apreciar que la mayor pérdida se da en las líneas productivas que en suma hacen un total de 14,85 m³/h y luego en la lavadora con 7,97m³/h (véase Cuadro 1.2, en la página 15), y las pérdidas totales en efluentes serían 22,83 m³/h (127,37 Soles/h).

Estos efluentes al ser vertidos directamente sobre los colectores generan un enorme impacto visual negativo, puesto que se altera el **color** cristalino del agua tal es así en un estudio reciente de caracterización de

los efluentes en una de las plantas de bebidas del grupo **AJE-INDONESIA**, se tienen valores hasta 260,0 unid color Pt-Co (véase Cuadro 1.3, en la página 15),

el color proviene básicamente de la dilución de las bebidas formuladas que en promedio poseen valores de concentración de amarillo de tartrazina en la marca Sabor Oro: 11,70 ppm y en la marca Inca Kola 13,40 ppm; si se tienen en cuenta los conceptos actuales de responsabilidad social y desarrollo sostenible, existe la necesidad de dar solución técnica a este problema.

**Cuadro 1.2
VOLUMEN DE EFLUENTES DE AGUA JUNIO-2009**

EFLUENTES DE AGUA POR EQUIPOS /MES DE JUNIO-09				
MAQUINA	M3/MES	M3/h	S./MES	S./h
LAVADORA DE BOTELLAS	5740,80	7,97	32033,66	44,49
REGENERACION-FILTROS	195,00	0,27	1088,10	1,51
RETROLAVADO-FILTROS	1815,00	2,52	10127,70	14,07
LINEA-4(Tks de jarabe-Flow-mix-capsulador)	1233,02	1,71	6880,27	9,56
LINEA-5(Tks de jarabe-Flow-mix-capsulador)	1029,60	1,43	5745,17	7,98
LINEA-6(Tks de jarabe-Flow-mix-capsulador)	998,40	1,39	5571,07	7,74
LINEA-7(Tks de jarabe-Flow-mix-capsulador)	936,00	1,30	5222,88	7,25
LINEA-8(Tks de jarabe-Flow-mix-capsulador)	1210,56	1,68	6754,92	9,38
LINEA-9(Tks de jarabe-Flow-mix-capsulador)	1029,60	1,43	5745,17	7,98
LINEA-15(Tks de jarabe-Flow-mix-capsulador)	798,72	1,11	445686	6,19
TETRA PACK	848,64	1,18	4735,41	6,58
TORRES	599,04	0,83	3342,64	4,64
ACUMULADO	16434,38	22,83	91703.86	127,37

Fuente: Elaboración propia con apoyo de expertos en producción

Atenuar la contaminación ambiental es una de las principales responsabilidades y preocupaciones del hombre moderno. En los últimos años, se han registrado investigaciones para la prevención de

contaminantes dentro de éstas, la fotodegradación de contaminantes, forma parte del grupo de tecnologías de oxidación avanzada, que busca reducir y/o eliminar compuestos como los colorantes Azo. En tal sentido este trabajo permitirá generar conocimiento para reducir el color en efluentes provenientes de la industria alimentaria principalmente de bebidas, además aportará con conocimiento científico-tecnológico puesto que las relaciones de pH, tiempo y concentraciones que se obtienen permitirán extrapolar el proceso a la industria de bebidas gaseosas, y así evitará conflictos sociales por impactos visuales negativos.

Cuadro 1.3 ANÁLISIS DE EFLUENTES DE AGUA JUNIO-2009

REPORT OF ANALYSIS					
1	Organization Name	PT. AJE INDONESIA			
2	Address	Bluk F No 1A			
3	Sample Source	Control Tanks			
4	Date of Analysis	7-Mei-2014			
5	Date of Report	7-Mei-2014			
6	Analysis Number	243			
7	Regulation	ESTATE REGULATION KI LIPPO CIKARANG			
8	Out of Limits	pH, Ammonia (NH ₃ N), COD			
No	Parameter	Unit	Test Result	Requirement	Remark
Physical Property					
1	Temperature	°C	25	38	
2	Total Dissolved Solids (TDS)	mg/L	134.6	2000	
3	Suspended Solids (SS)	mg/L	20	600	
4	Colour	Pt-Co	260	500	
Chemical Property					
1	pH	pH unit	5.15	6 - 9	out of limit
2	Ferrous (Fe)	mg/L	0.74	5	
3	Mangan (Mn)	mg/L	0.052	2	
4	Copper (Cu)	mg/L	0.625	2	
5	Zinc (Zn)	mg/L	1.40	5	
6	Chrom Hexavalent (Cr ⁺⁶)	mg/L	0.013	0.1	
7	Total Chrom (Cr)	mg/L	0.02	0.5	
8	Cadmium (Cd)	mg/L	0.0028	0.05	
9	Lead (Pb)	mg/L	0.0031	0.1	
10	Nickel (Ni)	mg/L	0.048	0.2	
11	Cobalt (Co)	mg/L	0.06	0.4	
12	Cyanide (CN)	mg/L	0.013	0.05	
13	Sulfide (H ₂ S)	mg/L	0.017	0.05	
14	Fluoride (F)	mg/L	0.9	2	
15	Ammonia (NH ₃ N)	mg/L	7.74	5	out of limit
16	Nitrate (NO ₃ N)	mg/L	1.9	20	
17	Nitrite (NO ₂ N)	mg/L	0.9	1	
18	COD	mg/L	3204	1000	out of limit

Fuente: AJE INDONESIA-2014/LIPPO CIKARANG

El artículo I del título preliminar de la Ley N° 28611 (Ley General del Ambiente), establece que toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, **equilibrado** y adecuado para el pleno desarrollo de la vida y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como los componentes,

asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país.

La ley general de aguas N°17752, en el Capítulo I, establece que todo usuario está obligado a emplear las aguas con eficiencia y economía, en el lugar y con el objeto para el que le sean otorgados. En el Capítulo II de la misma ley (Artículo 22) dice:

Está prohibido verter o emitir cualquier residuo, sólido, líquido o gaseoso que pueda contaminar las aguas, causando daños o poniendo en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora o fauna o comprometiendo su empleo para otros usos. Podrán descargarse únicamente cuando:

- a) Sean sometidos a los necesarios tratamientos previos;
- b) Se compruebe que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación;
- c) Se compruebe que con su lanzamiento submarino no se causará perjuicio a otro uso; y en otros casos que autorice el Reglamento. La Autoridad Sanitaria dictará las providencias y aplicará las medidas necesarias para el cumplimiento de la presente disposición.

No obstante, la contaminación fuere inevitable, podrá llegar hasta la revocación del uso de las aguas o la prohibición o la restricción de la actividad dañina.

Por ello en este estudio responderemos la siguiente interrogante ¿Cómo será la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?

1.2 Formulación del problema.

Problema general.

¿Cómo será la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?

Problemas específicos.

- a) ¿Cómo Influyen los cambios del grado de acidez, en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?
- b) ¿Cómo Influyen los cambios de concentración de peróxido de hidrógeno (ppm de H₂O₂) en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?

- c) ¿Cómo Influyen los cambios de flujo volumétrico en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?

1.3 Objetivos de investigación.

Objetivo general.

Conocer la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂.

Objetivos específicos.

En concordancia con el problema general de la investigación, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- a) Determinar la influencia del grado de acidez, en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina de la muestra experimental, en un foto-reactor UV/ H₂O₂

- b) Determinar la influencia de la concentración de peróxido en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?
- c) Determinar la influencia de los cambios de flujo volumétrico en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?

1.4 Justificación

Las razones que justificaron la presente investigación son:

- a) **Legal:** Los resultados de la investigación, permitirá el cumplimiento de la ley N° 28611 (Ley General del Ambiente) y la ley general de aguas N°17752
- b) **Económico:** Los resultados de la investigación, permitirá recuperar y reutilizar volúmenes considerables de agua.
- c) **Teórico:** Los resultados de la investigación, permitirá correlacionar las variables dependientes e independientes.
- d) **Social.** Los resultados de la investigación contribuyen a reducir la contaminación y evitar el desperdicio del agua, que afecta a la sociedad en general.

II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Antecedentes del Estudio

Se ha revisado algunos trabajos de investigación encontrándose que en la mayor parte se trabaja con dióxido de titanio H_2O_2/UV , en el tratamiento de decoloración y en algunos casos el proceso Fenton.

E.Gil (2007) aplicó procesos de oxidación avanzada en las aguas residuales provenientes del proceso de producción de bebidas isotónicas, estos estudios se llevaron a cabo a escala de laboratorio en un foto-reactor cilindro parabólico compuesto (CPC), en operación semibatch; y obtuvieron parámetros óptimos para decolorar por fotocatalisis heterogénea, a pH 3,00 ; concentración de catalizador (TiO_2) 0,28 g/L y concentración de peróxido 1,20 g/L con un porcentaje de decoloración del 97,88%; para fotocatalisis homogénea se trabajó pH=3,00 constante, concentración de peróxido 3,00 g/L con un porcentaje decoloración del

99,65%, ambos en un tiempo de recirculación de dos horas a temperatura ambiente.

Arroyave R. (2007), obtuvo un buen porcentaje de remoción (100,00 %) del colorante Tartrazina para la combinación de oxidación química mediante el empleo de dióxido de titanio 50,00 mg/L de TiO_2 y 0,40 %v/v del agente oxidante peróxido de hidrógeno, además de la combinación experimental del proceso fotoquímico de la fotocatalisis heterogénea con los ensayos experimentales de 50,00 mg/L de TiO_2 y 0,2 %v/v H_2O_2 , y 50,00 mg/L de TiO_2 y 0.40 %v/v H_2O_2 para un porcentaje de remoción igual al 100,00%.

T. Rodríguez (2008) considera que las diferentes condiciones del medio tales como: pH, dosis de H_2O_2 , características del efluente, tiempo de exposición a la radiación UV, entre otras, pueden interferir durante la aplicación del $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ en el tratamiento de los efluentes. Por ejemplo, en relación con el pH, en algunas aplicaciones con $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, se recomienda adicionar ácido para disminuirlo y trabajar en la franja de 2,50 a 3,50.

Arroyave R, (2009), alcanzó porcentajes de mineralización superiores al 93,80 % del colorante Tartrazina, sin embargo, al analizar los factores técnicos y económicos se considera que la combinación experimental más apropiada para lograr la mineralización del colorante corresponde a la combinación de 50,00 mg/L de TiO_2 y 0,20 %v/v del agente oxidante peróxido de hidrógeno, que representa un proceso de oxidación química.

Conclusión. Los procesos avanzados de oxidación, como la oxidación

química con peróxido de hidrógeno, favorecen la adecuada mineralización del colorante tartrazina al tiempo que disminuyen o resuelven el impacto negativo sobre el entorno natural inmediato.

A. Fonseca (2012) estudió la cinética de degradación de dos colorantes Ponceau 4R y amarillo de tartrazina (AMT), con una concentración inicial de 30,00 ppm, y obtiene un 90,00 % de decoloración, con una concentración inicial de peróxido de 3,00 mol/litro (112,00 ppm) para ambos colorantes, encontrando que la reacción sigue una cinética de degradación de primer orden.

Al-Dawery (2013) estudió la degradación fotocatalítica de la tartrazina presente en aguas residuales usando TiO_2 y luz ultravioleta; obtuvieron resultados satisfactorios encontrando que la concentración de fotocatalizador (TiO_2) influye en gran medida en la velocidad de degradación. También observaron que la degradación sigue una cinética de primer orden, con una velocidad máxima de degradación de $3,4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ en una solución de 500,00 mg/L de dióxido de titanio.

Según Al-Dawery (2013) la fotodegradación puede ser una solución para el tratamiento de otros compuestos orgánicos presentes en aguas residuales.

V. Petruta (2014) estudió la cinética de fotodegradación mediante UV/ H_2O_2 en una solución acuosa, optimizando la temperatura de reacción y la concentración de colorante AMT, para una concentración inicial de tartrazina de $1,035 \times 10^{-5}$ mol/litro (5,53 ppm).

2.2 Tratamiento de aguas.

En muchos países el agua es un recurso escaso; muchas actividades que el hombre realiza consumen grandes volúmenes de agua; las actividades antropogénicas, transfieren al agua componentes que muchas veces son indeseables y nocivos para el medio ambiente.

Según el Organismo de Fiscalización Ambiental (OEFA): aguas residuales, son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado.

Las aguas domésticas presentan un elevado contenido de materia orgánica (carbono) nutrientes (nitrógeno y fósforo) los cuales son perjudiciales para la vida acuática.

Las diversas industrias vierten a los cauces públicos un conjunto de contaminantes propios de cada actividad, siendo este uno de los principales problemas que aquejan a los países desarrollados e incluso en los que están en vías de desarrollo.

Los tratamientos que se emplean para eliminar estos contaminantes del agua son diversos, desde los más sencillos como puede ser un desbaste (retención de sólidos gruesos mediante rejillas) o también conocidos como pre-tratamientos, tratamientos primarios como la sedimentación con

o sin floculantes con el objetivo de eliminar sólidos suspendidos, hasta los tratamientos biológicos (aerobios o anaerobios) que emplean microorganismos para eliminar materia orgánica, y los tratamientos terciarios que se emplean cuando se requiere eliminar componentes remanentes o recalcitrantes; los procesos de oxidación avanzada se emplean para eliminar componentes que son difíciles de tratar por los métodos convencionales que existen actualmente.

2.2.1 Aguas residuales de la industria de bebidas gaseosas y otras.

Según BREF¹ (2006) de la Industria de Alimentos, bebidas y lácteos, el principal problema en este sector es la generación de aguas residuales. Parte de la producción de aguas residuales típico en cifras para el sector de bebidas y refrescos (véase Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1

PROMEDIO ESPECÍFICO DE AGUAS RESIDUALES DESCARGADAS.

Producto	Descarga específica de agua residual(m³/m³ de producto)
Agua embotellada	0.80
Jugo de frutas	1.50
Bebidas carbonatadas	1.40
Carbonatadas/Jugos de frutas	3.60

¹ Best Available Techniques Reference Document

Fuente: Bref (2006)

2.2.2 Tratamientos de oxidación avanzada

Según Doménech (2001) la creciente demanda de la sociedad por la remediación de aguas contaminadas de diversos orígenes, materializada en regulaciones cada vez más estrictas, ha impulsado en los últimos años al desarrollo de nuevas tecnologías de depuración.

Una forma de clasificar los tratamientos avanzados de oxidación (véase Cuadro 2.2, en la página 27).

Según Arroyave R, (2009), las TAO's se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, que involucran la generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical hidroxilo ($\cdot\text{HO}$). Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar), u otras formas de energía, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica. Algunas TAO's como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas, utilizan además, reductores químicos que permiten transformaciones en contaminantes tóxicos, poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados.

Según Bacardit (2007) las TAO's se aplican a aguas residuales con una carga de contaminación relativamente baja ($\text{COT} \leq 1.00 \text{ g/l}$) y para caudales inferiores a $50,00 \text{ m}^3/\text{h}$ (véase la Figura 2.1, en la página 28).

2.2.3 Radical Hidroxilo

Después del fluor, el radical hidroxilo (HO^*) es la segunda especie con mayor poder oxidante 2.8 V (véase Cuadro 2.3, en la página 29), lo cual le confiere la capacidad de oxidar la materia orgánica, con un bajo grado de selectividad, esta especie radical presenta un tiempo de vida corto. Según Litter (2010) el poder oxidante del peróxido de hidrógeno puede ser sensiblemente mejorada por la generación de HO^* a través de la escisión del enlace O-O, con fotones de alta energía ($\lambda < 280 \text{ nm}$).

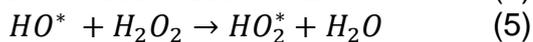
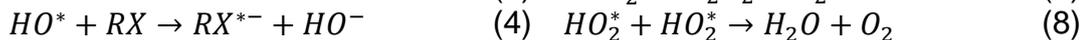
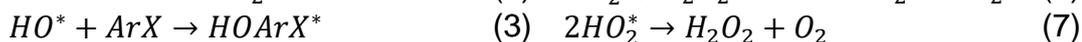
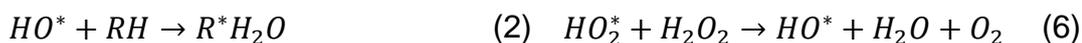
La reacción tiene un rendimiento cuántico² bajo ($\phi_{\text{HO}^*} = 0,5$) debido a la rápida recombinación de los radicales en solución, y produce casi cuantitativamente un radical hidroxilo por cuanto de radiación absorbida en el rango de 200 a 300 nm:



Donde:

$h\nu$: Energía de un fotón

Las reacciones que ocurren en un proceso de oxidación avanzada son:



Donde:

R: es una cadena alifática.

Ar: es grupo aromático.

² Rendimiento cuántico: proporción entre el número de fotones emitidos y el de fotones absorbidos.

En el caso de compuestos aromáticos, una hidroxilación del anillo podría ocurrir con una apertura del anillo posterior después sucesivos ataques HO^* , dando lugar a estructuras conjugados o ácidos orgánicos. En todos los casos, el proceso puede llevar a la mineralización total del compuesto. Según Litter(2010) altas concentraciones de H_2O_2 pueden inhibir el proceso de fotodegradación, debido a la reacción entre el hidroperoxil(HO_2^*) y el radical HO^* , formándose agua y oxígeno molecular.

Cuadro 2.2

TRATAMIENTOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

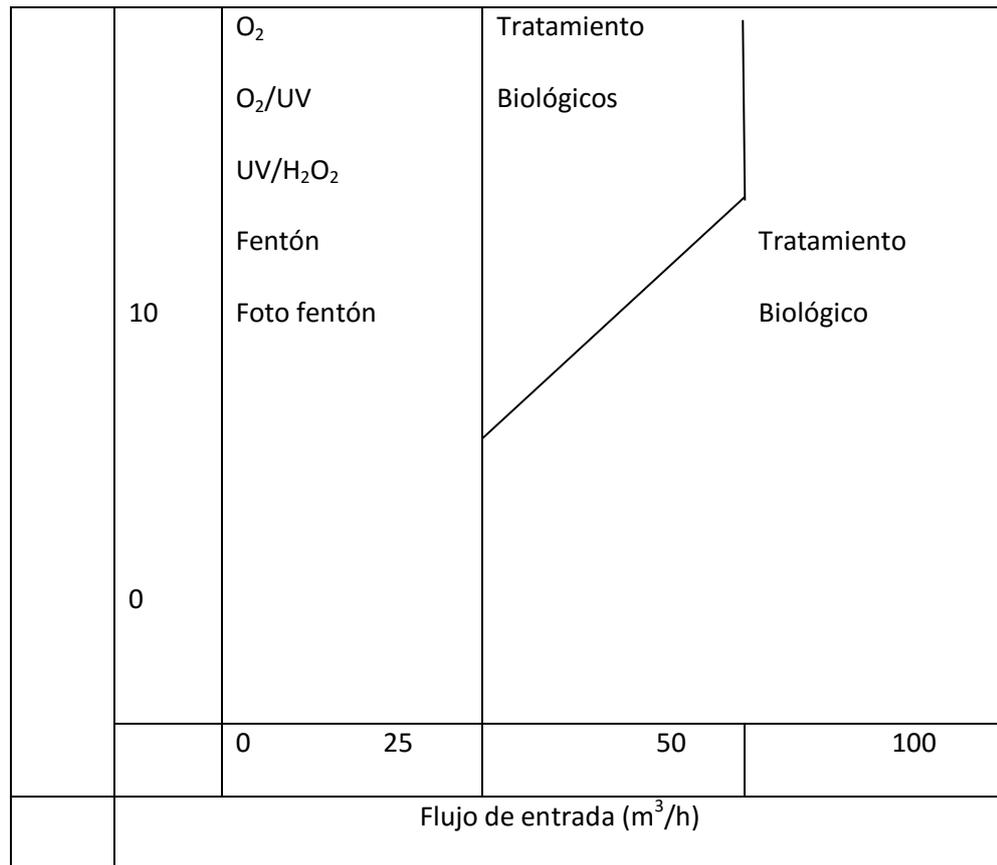
Procesos homogéneos
a) Sin aporte externo de energía
○ Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-)
○ Ozonización con peróxido de hidrógeno ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$) y ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{OH}^-$)
○ Peróxido de hidrógeno y catalizador ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}$)
b) Con aporte externo de energía
b1) Energía procedente de radiación ultravioleta (UV)
○ Ozonización y radiación ultravioleta (O_3/UV)
○ Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$)
○ Foto-Fenton ($\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$)
b2) Energía procedente de ultrasonidos ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{US}$)
○ Ozonización y ultrasonidos (O_3/US)
○ Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{US}$)
b3) Electroquímica
○ Oxidación electroquímica

○ Oxidación anódica
○ Electro-Fenton
Procesos heterogéneos:
Ozonización catalítica (O ₃ /Cat.)
Ozonización fotocatalítica(O ₃ /TiO ₂ /UV)
Fotocatálisis heterogénea (H ₂ O ₂ /TiO ₂ /UV)

Fuente: Tratamientos Industriales avanzados de aguas industriales, Fernández Alba (2006)

Figura 2.1
DIAGRAMA DE LAS TECNOLOGÍA EXISTENTES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN EL RANGO DE CARGA ORGÁNICA Y VOLUMEN A TRATAR PARA LOS QUE SON MÁS EFICIENTES.

TOC(mg/L)	1000	Incineración	Incineración de Oxidación Húmeda	Oxidación Húmeda Avanzada
	100	Fentón Foto fentón	AOPs	Oxidación Húmeda Tratamiento Biológico



Fuente: Bacardit (2007)

Cuadro 2.3

POTENCIAL DE REDUCCIÓN ESTÁNDAR DE LAS PRINCIPALES ESPECIES OXIDANTES.

Espece	E°/V(25°C)
Fluor: F ² /F ⁻	2,87
Radical hidroxilo: [•] OH/H ₂ O	2,8
Oxígeno atómico: O/ H ₂ O	2,42
Ozono: O ₃ / H ₂ O	2,07
Peróxido de Hidrógeno: H ₂ O ₂ / H ₂ O	1,77
Radical hidroperoxilo: HO ₂ [•] /H ₂ O	1,7
Permanganato: MnO ₄ ⁻ /MnO ₂	1,68

Ácido hipobromico: HBrO/Br ₂ (aq)	1,57
Ácido hipoyodico: HIO/I ₂	1,45
Cloro: Cl ² /Cl ⁻	1,36
Oxígeno: O ₂ /H ₂ O	1,23
Bromo: Br ₂ (aq)/Br ⁻	1,09
Iodo: I ₂ /I ⁻	0,54

Fuente: Vanysek 2004; Hager 1990

2.3 Colorantes

Los colorantes son compuestos orgánicos que absorben radiación electromagnética entre 400,00 – 900,00 nm (rango del espectro electromagnético que pertenece a la zona del visible), e interaccionan con diferentes substratos (fibras textiles, papel, cueros...) impartiendo color.

2.3.1 Espectro electromagnético.

Según Y. Freedman(2009) las ondas electromagnéticas abarcan un espectro extremadamente amplio de longitud de onda y frecuencia; la zona del espectro electromagnético en la que el ojo humano es sensible, se llama luz visible. El ojo humano es sensible a las radiaciones electromagnéticas comprendidas entre 700,00 nm y 400,00 nm. Las radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda ligeramente inferiores a las de la luz visible se denominan "rayos ultravioleta".

2.3.2 Colorantes azoicos

Ollgaard et. al. (1998) indican que los colorantes azoicos forman parte de una familia de sustancias químicas orgánicas caracterizadas por la presencia de un grupo peculiar que contiene nitrógeno unido a anillos aromáticos. Los colorantes azoicos constituyen el grupo más extenso, de todos los colorantes orgánicos disponibles en el mercado. La estructura química de este tipo de colorantes, se caracteriza por la presencia del grupo azo $R-N=N-R'$.

La fabricación de los colorantes azo tiene lugar mediante la diazotación de una arilamina primaria, obteniéndose la sal de diazonio. Para la diazotación, se emplea ácido nitroso, que se obtiene por disolución de nitrito sódico en agua y posterior adición de ácido clorhídrico, éste se hace reaccionar con una amina aromática o un compuesto alcohólico, con objeto de formar el colorante. Esta reacción es denominada de “acoplamiento” o “copulación”, se realiza en medio ácido en el caso de las aminas y en medio básico en el caso de alcoholes.

2.3.3 Colorante amarillo de tartrazina (Amarillo 5)

Según W.Beyer (1987) el colorante artificial amarillo de tartrazina es uno de los colorantes más usados en todo el mundo para colorear alimentos,

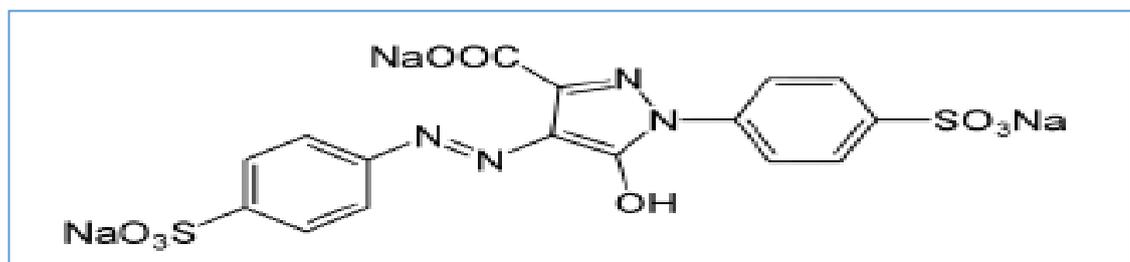
medicamentos y cosméticos. Su peso molecular es 534.30 g/mol, pertenece a la familia de los colorantes azoicos (contienen el grupo azo $-N=N-$). Se presenta en forma de polvo y es soluble en agua; haciéndose de color más amarillo en tanto más disuelta esté.

La tartrazina es un colorante ampliamente utilizado en ciertas marcas de bebidas gaseosas, postres instantáneos, aditivos para pasteles, natillas en polvo, sopas, salsas, helados, caramelos, dulces, goma de mascar, mazapán, mermelada, jalea, mostaza, refrescos, yogur. Es más barato que el beta-caroteno y por lo tanto se utiliza como una alternativa a este para lograr colores similares. Gracias a la solubilidad en agua la tartrazina se utiliza en medicamentos especialmente comprimidos, jarabes y cosméticos. Pertenece a los colorantes azoicos, que son la clase de colorantes más usados en la industria de los alimentos. Se caracterizan por la presencia de un enlace azo ($-N = N-$) en asociación con dos anillos aromáticos, también puede llevar a grupos de ácido sulfónico. Algunas personas son sensibles a la tartrazina y pueden presentar reacciones alérgicas y aunque la susceptibilidad a presentar alergias es baja (1 de cada 10,00), aumenta entre las personas hipersensibles a la aspirina (el 10,00 % de ellas son alérgicas a la tartrazina). La tartrazina está relacionada con un gran porcentaje de los casos de síndrome de hiperactividad en los niños, Así mismo, las personas asmáticas también pueden experimentar síntomas tras el consumo de este aditivo, ya que actúa como un agente liberador de histamina.

Según F. Klages (2005) en la teoría de Witt el color aparece siempre como consecuencia de la acción conjunta de dos grupos atómicos diferentes, a los que dio los nombres de grupos cromóforos y auxocromos (véase Figura 2.3, en la página 34).

Figura 2.2

FÓRMULA MOLECULAR DEL COLORANTE AMARILLO DE



TARTRAZINA

Fuente: Easton, (1995).

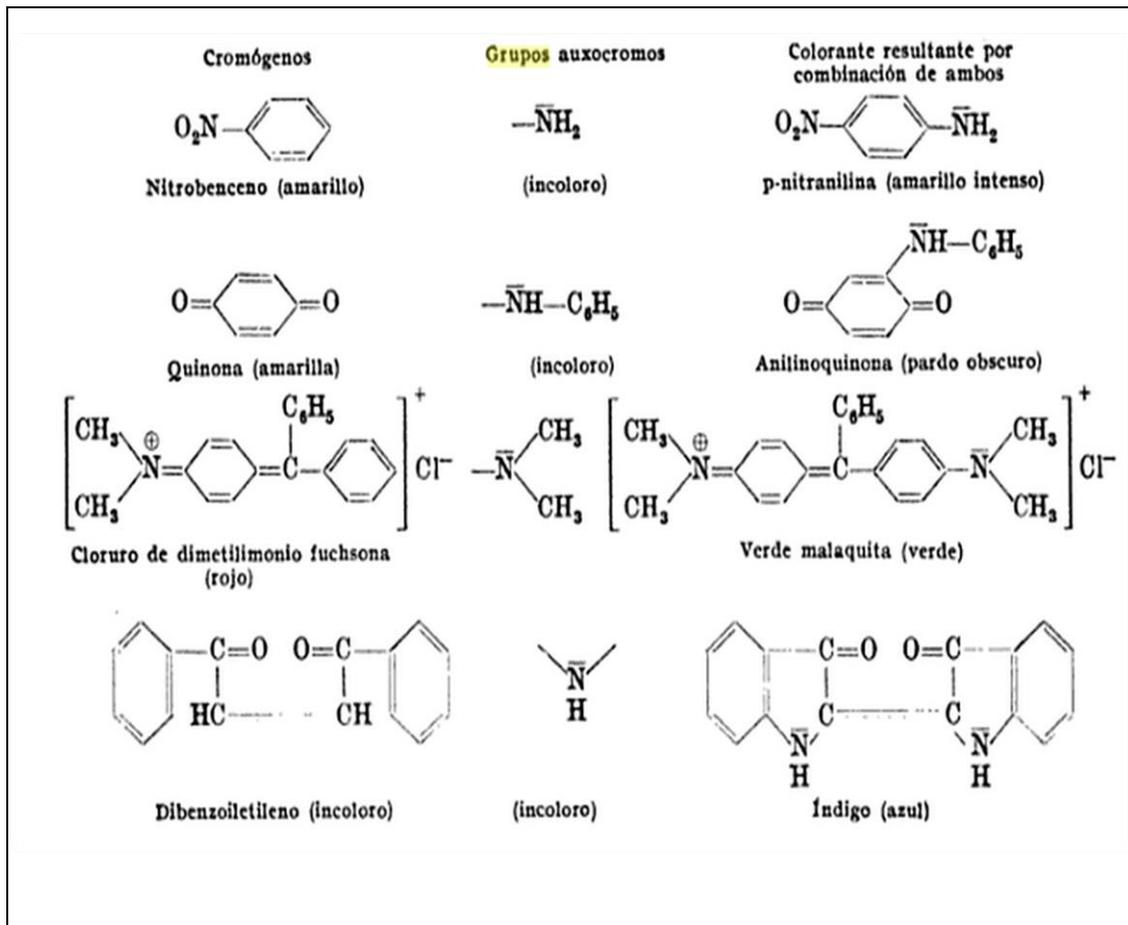
Los grupos cromóforos o portadores del color, son la causa inmediata de la posible aparición del color, aun cuando ellos la mayor parte de las veces presentan colores propios muy débiles. Entre ellos figuran en primer lugar todas las combinaciones de dobles enlaces apolares C=C con C=N, tal como pueden observarse en las quinonas, en el nitrobenzeno, nitrosobenzeno, y también los grupos azo. Todas las sustancias que contienen uno de estos grupos cromóforos reciben el nombre de sustancias cromógenas (engendradoras de color).

Los grupos auxocromos, entre los principales tenemos a los grupos OH⁻¹ y NH₂, estos no comunican color a las combinaciones saturadas, pero tienen la propiedad de intensificar considerablemente la acción coloreante de los grupos cromóforos antes mencionados en un doble aspecto, es decir disminuyen el tono del color o aumentan la intensidad del mismo.

La molécula de amarillo de tartrazina presenta un grupo azo y 2 anillos aromáticos, siendo estos los grupos cromóforos (véase la Figura 2.3). La molécula de amarillo de tartrazina presenta un grupo azo y 2 anillos aromáticos, siendo estos los grupos cromóforos.

Figura 2.3

COLORANTES ORGÁNICOS



Fuente: Tratado de química orgánica (Federico Klage)

2.3.4 Fotocatálisis.

Según Fonseca et.al (2012), la fotocatálisis puede ser definida como la “aceleración de una fotoreacción mediante la presencia de un catalizador”. El catalizador activado por la absorción de la luz acelera el proceso interaccionando con el reactivo a través de un estado excitado.

2.3.5 Fotodegradación.

Según L. Sánchez (2007) es una reacción química que se produce bajo la influencia de la luz; puede tener lugar en la atmósfera, en la superficie del suelo y del agua. Uno de los factores que condicionan este proceso es la intensidad de la radiación UV, a su vez, depende de la época del año, hora del día, latitud, altura sobre el nivel del mar, la presencia de nubes, el tamaño del agujero de la capa de ozono.

El proceso de fotodegradación se inicia cuando la molécula absorbe energía (fotón) y como resultado, se produce la rotura de enlaces químicos en la molécula. Este conlleva a la formación de radicales muy reactivos.

Antes de que la fotodegradación alcance el punto final, se forman productos intermedios de degradación de los compuestos primarios. La identificación de estos fotoproductos intermedios es de gran importancia ya que puede suceder que posean una toxicidad para microorganismos, animales y humanos, más elevada que los compuestos de los que procede.

2.3.6 Constante de velocidad de reacción.

Según S. Fogler (2001) la velocidad de desaparición de un compuesto A ($-r_A$), depende de la temperatura y la composición, y en el caso de muchas reacciones se puede escribir como el producto de una constante

de velocidad de reacción "k" y una función de las concentraciones (actividades) de las diversas especies que participan en la reacción:

$$-r_A = k_{A(T)} * f(C_A, C_B, \dots) \quad (8)$$

La ley de la velocidad da la relación entre velocidad de reacción y concentración, la ecuación algebraica que relaciona $-r_A$ con las concentraciones de las especies se denomina expresión cinética o ley de velocidad. La constante de velocidad (k_A), al igual que la velocidad de reacción ($-r_A$) siempre se toma como referencia a una especie dada de las reacciones y normalmente debe llevar el subíndice correspondiente a esa especie.

La constante de velocidad de reacción k es independiente de las concentraciones de las especies que intervienen en la reacción. La constante de velocidad depende de la temperatura; en reacciones en fase gaseosa también depende del catalizador y podría ser función de la presión total, y además puede depender de otros parámetros, como concentración iónica y disolvente. Estas otras variables tienen un efecto mucho menor que el de la temperatura sobre la velocidad de reacción específica, así que para los fines de nuestra presentación supondremos que k_A sólo depende de la temperatura. Este supuesto es válido en la mayor parte de las reacciones químicas de laboratorio e industriales, y ha funcionado de forma muy aceptable.

2.3.7 Reacciones fotoquímicas.

Según L. Sánchez (2007), las reacciones fotoquímicas juegan un papel muy importante en el medioambiente. La activación fotoquímica es la principal fuerza conductora de la transformación de sustancias en la atmósfera y determina la degradación de compuestos que no se biodegradan de un modo eficaz en el agua.

2.3.8 Cinética de las reacciones de foto-degradación.

Según L. Sánchez (2007) los procesos de fotodegradación se pueden describir mediante ecuaciones cinéticas de primer orden.

Las mismas que se expresan (para la fase líquida):

$$\frac{dC_A}{dt} = -k * C_A \quad (9)$$

C_A : concentración de un compuesto reactante A, degradado en el tiempo t
y k es la constante de velocidad de primer orden.

La ecuación también puede expresarse como:

$$\ln C_A = \ln(C_{A0}) - k * t \quad (10)$$

2.3.9 Cinética de degradación del amarillo de tartrazina.

Los Autores Petruta(2013) y Bielski(1985) estudiaron ampliamente la fotólisis del H_2O_2 y UV_{VIS} , en agua pura con el fin de estudiar el mecanismo de reacción.

Es conocido que la radiación UV en solución acuosa de H₂O₂ conduce a la producción de radicales hidroxilos (Ver ecuación 11)



Donde:

hv = Energía de un fotón

h = constante de Plank

v = Frecuencia de onda

Estos radicales hidroxilos reaccionan con el sustrato tartrazina (S) formando productos intermedios (INT). Además estos productos intermedios reaccionan con los radicales hidroxilos y forman productos finales (Ver ecuación 12 y 13)



También existen otras reacciones implicadas en este proceso como la reacción de los hidroxilos frente al H₂O₂ generando hidroperóxidos (HO*₂) que y a su vez se generan radicales de oxígeno e hidrógenos. Finalmente los hidroxilos frente a los piróxilos generan agua y los radicales hidroxilos generan residuales de peróxido de hidrógeno (Ver ecuación 14 al 17)



Debido a que el potencial de oxidación del radical peroxilo (HO_2^*) es bajo se pueden despreciar su efecto, frente a la del radical hidroxilo.

La fotooxidación de tartrazina con H_2O_2 en presencia de radiación UV se supone que es una reacción de pseudo-primer orden con respecto a la concentración tartrazina:

$$\frac{-dC_S}{dt} = k_{Obs} C_S; \quad \frac{-dC_{(HO^*)}}{dt} = k_{Obs} C_{(HO^*)} \dots \dots \dots (18)$$

Donde $C(S)$ representa la concentración tartrazina, t es el tiempo de irradiación y $C_{(HO^*)}$ es la concentración del radical hidroxilo.

Según V.Petruta (2014), demostró que la velocidad de degradación sigue la cinética de pseudo-primer orden con respecto a la concentración del colorante.

Integrando la ecuación (18) obtenemos:

$$-\ln \left[\frac{C_S}{C_0(S)} \right] = k_{Obs} * t \quad (19)$$

Según Gil Pavas (2014) pocos estudios se han reportado en la literatura relacionados con la degradación y mineralización de la tartrazina.

Modirshahla et al. (2007) compararon diferentes materiales de electrodos para la decoloración de la tartrazina mediante electrocoagulación. Sus resultados indicaron que las variables que más influyen en la remoción del color fueron la densidad de corriente, el tiempo de electrólisis, distancia entre los electrodos, concentración de electrolito y pH de la solución. Emplearon una celda electroquímica simple con un ánodo y un cátodo, una solución de 40,00 mg/L de tartrazina con 400,00 mg/L de NaCl y

DQO de 30,00 mg/L. Se obtuvo como resultado la remoción casi del 100% de color y 90% de DQO; en condiciones de pH = 5,78, tiempo de electrolisis = 6 minutos, densidad de corriente = 120,00 mA/cm², distancia entre electrodos = 1,50 cm, con un ánodo de hierro y un cátodo de aluminio. Adicionalmente, compararon la eficiencia de la celda electroquímica con electrodos monopolares en serie y en paralelo y con electrodos bipolares. Los resultados obtenidos con los electrodos en configuración monopolar con conexión en serie fue la más eficaz. Concluyeron que el proceso con electrodo Fe/Al (ánodo/cátodo) fue más eficaz para el tratamiento, en comparación a los electrodos de Fe/Fe.

2.4 Reactor fotocatalítico anular

Según Blanco, J (2001) en esta clase de reactores, dos cilindros coaxiales delimitan la zona de reacción mientras que la lámpara es colocada en el

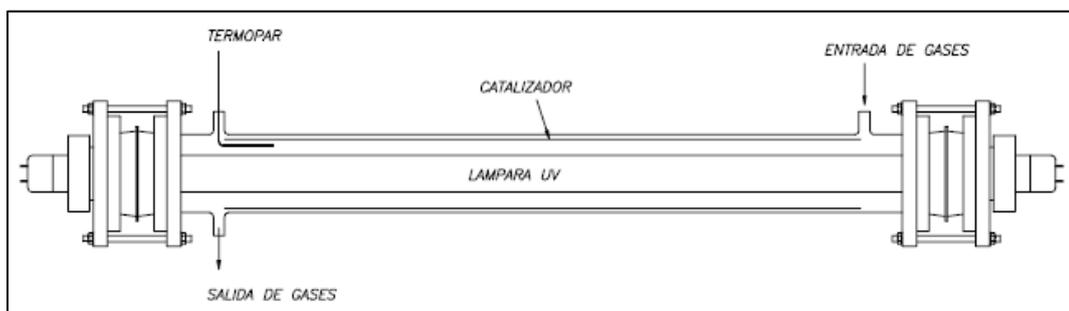
eje axial de simetría. Esta simple geometría permite la modelización del campo de radiación, y prácticamente todos los fotones emitidos por la lámpara alcanzan el medio reactante. En el caso de que una cantidad relevante de fotones alcanzara la pared exterior del reactor, debido a una baja anchura óptica de la disolución podría colocarse un espejo exterior parcialmente recubriendo el sistema.

En el caso de reactores de flujo continuo, el flujo en el interior del reactor puede ser organizado de tal forma que los reactantes crucen la longitud del reactor más de una vez. Esto tiene la ventaja de asegurar que todo el elemento fluido es llevado, al menos una vez, a la región altamente irradiada cercana a la pared interna del reactor. Aunque este reactor se utiliza industrialmente especialmente en el campo de la esterilización del agua, y en la oxidación de compuestos orgánicos de difícil degradación, también puede utilizarse para procesos en fase gaseosa.

En este sentido el reactor (véase la Figura 2.4, página 42) ha sido utilizado para el estudio comparativo de las eficiencias de destrucción de tricloroetileno en fase gas por vía fotocatalítica utilizando diferentes catalizadores basados en TiO_2 y para el estudio de la influencia de la temperatura en la degradación de tricloroetileno.

Figura 2.4

REACTOR TUBULAR PARA ENSAYOS FOTOCATALÍTICOS EN FASE



GAS CON LÁMPARA UV

Fuente: Blanco (2015)

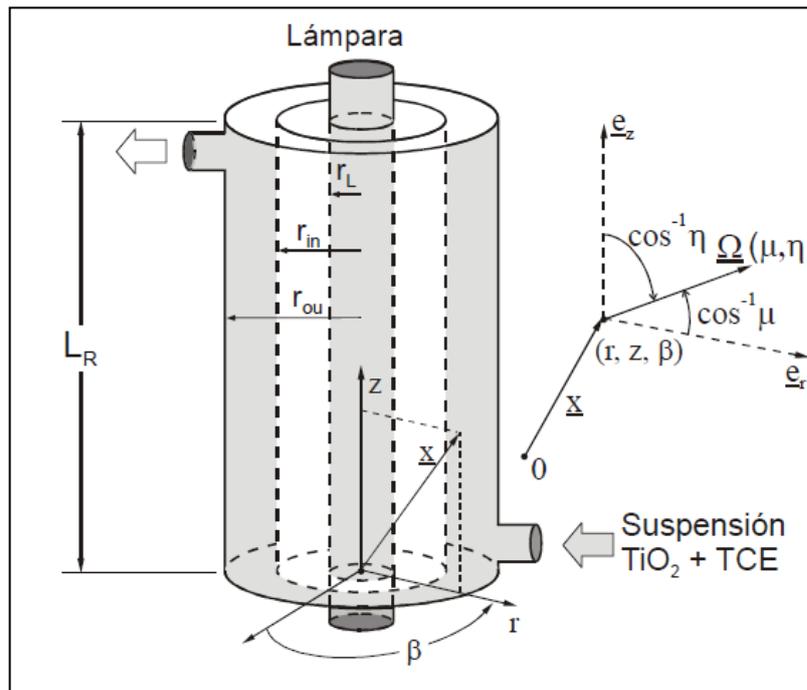
Según R. Romero (2005), para el modelamiento de la degradación de tricloroetileno (TCE) en un reactor anular fotocatalítico con TiO_2 en suspensión acuosa, obtiene datos experimentales y teóricos.

El sistema reaccionante está contenido en una sección anular cilíndrica que rodea a una lámpara tubular que actúa como fuente de radiación UV (véase Figura 2.5, en la página 44). Por el espacio hace circular una suspensión acuosa de TCE (en concentraciones $\leq 70,00$ ppm) que contiene una distribución uniforme de partículas sólidas de TiO_2 en concentraciones $\leq 1,0 \times 10^{-3} \text{ g x cm}^{-3}$.

Asume que la fase fluida es transparente a la radiación en el rango de longitudes de onda de trabajo.

Figura 2.5

FOTOREACTOR ANULAR



Fuente: Romero (2005)

El dispositivo experimental completo consiste en un reactor anular con la fuente de radiación UV montada sobre su eje; el reactor está rodeado a su vez por una camisa que contiene agua de refrigeración (véase la Figura 2.6, en la página 44). La operación es de lazo cerrado, tipo discontinua en reciclo (recirculación entre el reactor y el tanque de almacenamiento). La bomba de tipo centrifuga provee un alto caudal de recirculación que asegura un buen mezclado. Se efectúa un bypass para mejorar la agitación ya provista por la recirculación. Esto permite regular el caudal, en caso de ser necesario. El intercambiador de calor mantiene aproximadamente constante la temperatura.

Figura 2.6

$$\epsilon_L \frac{dC_{i,Tk}^{ou}}{dt} = Q/V_{Tk} \times [C_{i,Tk}^{in}(x, t)_{A_{Tk}^{in}} - C_{i,Tk}^{ou}(t)] \quad (20)$$

$$C_{i,Tk}^{ou}(t = 0) = C_i^o \quad (21)$$

Donde:

Q: Caudal

V_{Tk} : Volumen del tanque

$\langle C_{i,Tk}^{in}(x, t) \rangle_{A_{Tk}^{in}}$: Concentración del componente i, a la entrada del reactor en el tiempo t, en la posición x.

$C_{i,Tk}^{ou}(t)$: Concentración del componente i, a la salida del reactor en el tiempo t.

ϵ_L Porosidad del catalizador, para nuestro caso $\epsilon_L = 1$

La corriente que ingresa al tanque proviene del reactor. Para conocer su concentración se debe plantear el balance en este último, considerando un modelo pseudohomogéneo bidimensional, flujo laminar y en estado no estacionario:

$$\epsilon_L D_{L,mix} * \frac{1}{r} * \frac{\partial \left(r \frac{\partial C_{i,R}(r,z,t)}{\partial r} \right)}{\partial r} - \epsilon_L v_z(r) * \frac{\partial \left(r \frac{\partial C_{i,R}(r,z,t)}{\partial r} \right)}{\partial r} + v_i * a_v * R_{het}(r, z, t) = \epsilon_L * \frac{\partial C_{i,R}(r,z,t)}{\partial t} \quad (22)$$

$$C_{i,R}(r,z=0,t) = C_{i,Tk}^{ou}(t) \quad (23)$$

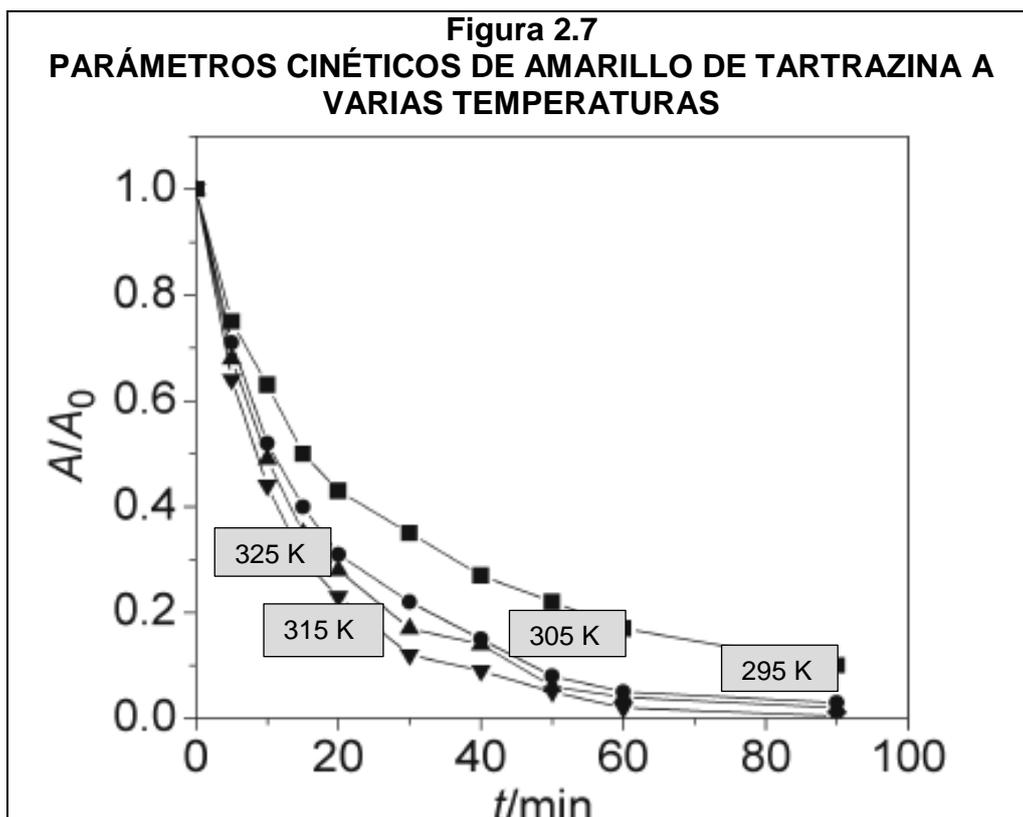
$$C_{i,R}(r,z,t=0) = C_{i,R}^o \quad (24)$$

$$\frac{\partial C_{i,R}}{\partial r}(r = r_{in}, z, t) = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial C_{i,R}}{\partial r}(r = r_{ow}, z, t) = 0 \quad (26)$$

2.4.2 Efecto de la temperatura en la degradación del amarillo de tartrazina.

Según V. Petruta (2014) el valor de la constante de velocidad se incrementa al aumentar la temperatura, de acuerdo con las constantes de velocidad.



Fuente: Petruta, (2013)

Cuadro 2.4
PARÁMETROS CINÉTICOS DE AMARILLO DE TARTRAZINA A VARIAS TEMPERATURAS

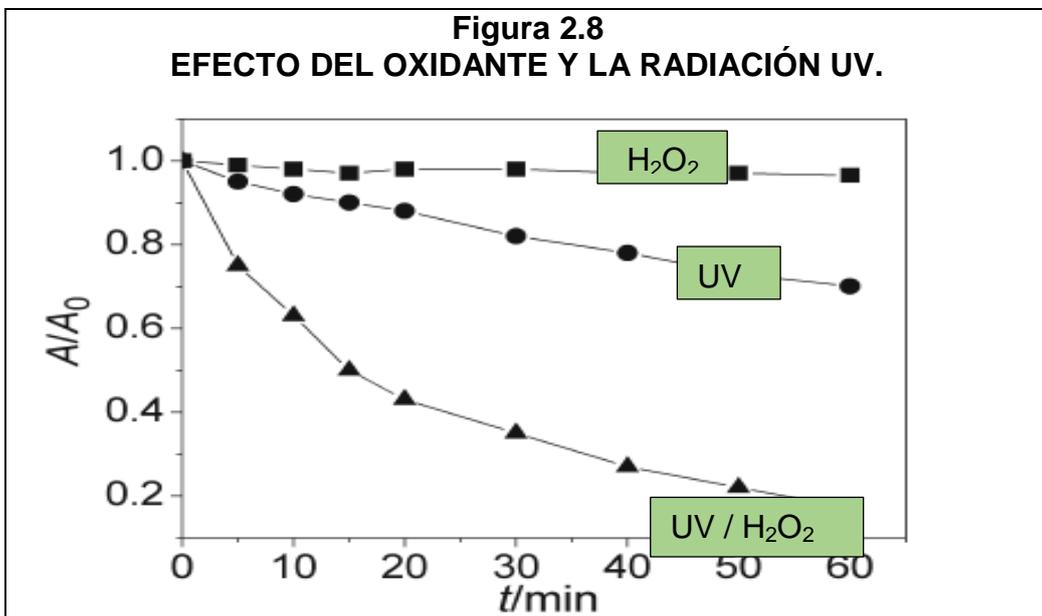
T/K	k_{obs}/s^{-1}	$t_{1/2}/s$	$\eta/\%$
295	$7,91 \times 10^{-4}$	876	97
305	$9,02 \times 10^{-4}$	768	98
315	$10,70 \times 10^{-4}$	648	99
325	$11,50 \times 10^{-4}$	603	99

Fuente: Petruta, (2014)

Además el autor utilizando la ecuación de Arrhenius y graficando $\ln(k_{obs})$ frente a $(1/T)$ reportó la energía activación (E_a) para la degradación de tartrazina $E_a = 10,08 \text{ kJ mol}^{-1}$, $\Delta H^* = 9,21 \text{ kJ mol}^{-1}$, $\Delta S^* = 55,54 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, y $\Delta G^* = -7,16 \text{ kJ mol}^{-1}$ valores que indican que el proceso oxidativo es espontáneo y tiene pequeños requerimientos energéticos (véase Cuadro 2.4).

2.4.3 Efecto del oxidante y la radiación UV.

V. Petruta, (2014), Presenta una relación gráfica en que se observa el efecto independiente y combinado del oxidante y la radiación; dando una clara evidencia que el efecto UV es ligeramente significativo frente al efecto oxidante (H_2O_2), pero lo concluyente es que el efecto combinado UV y oxidante son más significativos en la degradación del colorante (véase Figura 2.8).



Fuente: Petruta, (2014)

2.4.4 Degradación a condiciones constantes de oxidante (H₂O₂) y a diferentes concentraciones de amarillo de tartrazina.

V. Petruta (2014), investigó la degradación de amarillo de tartrazina con una concentración de oxidante (H₂O₂) $4,140 \times 10^{-4}$ M (14,076 ppm) a diferentes concentraciones de amarillo de tartrazina en los rangos de $0,52$ a $8,280 \times 10^{-4}$ M (2,77 a 44,21 ppm) (véase Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5

DIFERENTES CONCENTRACIONES DE AMARILLO DE TARTRAZINA Y LA CONCENTRACIÓN DEL OXIDANTE (H₂O₂) CONSTANTE.

$C_{\text{tart/M}}$	$C_{\text{HP/M}}$	$k_{\text{obs/S}}^{-1}$	$t_{1/2/s}$	$\eta/\%$
$0,520 \times 10^{-5}$	$4,140 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-3}$	471	99
$1,035 \times 10^{-5}$	$4,140 \times 10^{-4}$	$7,91 \times 10^{-4}$	876	97
$2,070 \times 10^{-5}$	$4,140 \times 10^{-4}$	$6,48 \times 10^{-4}$	1069	85
$4,140 \times 10^{-5}$	$4,140 \times 10^{-4}$	$5,05 \times 10^{-4}$	1372	80
$8,280 \times 10^{-5}$	$4,140 \times 10^{-4}$	$4,53 \times 10^{-4}$	1530	78

Fuente: Petruta, (2014)

Se observa que a menor concentración del amarillo de tartrazina el valor de la constante de velocidad se incrementa e implícitamente la degradación del colorante aumenta (véase Cuadro 2.5)

2.4.5 Degradación a condiciones constantes de concentraciones de amarillo de tartrazina y a diferentes concentraciones de oxidante (H₂O₂)

V. Petruta (2014), investigó la degradación de amarillo de tartrazina a una concentración constante de $1,03 \times 10^{-5}$ M (5,53 ppm) a diferentes concentraciones del oxidante H₂O₂ en los rangos de 1,03 a $6,75 \times 10^{-4}$ M (3,51 a 22,95 ppm)

Cuadro 2.6

DIFERENTES CONCENTRACIONES DEL OXIDANTE (H₂O₂), Y LA CONCENTRACIÓN DE AMARILLO DE TARTRAZINA CONSTANTE.

C _{tar} /M	C _{HP} /M	C _{tar} /C _{HP} ratio	k _{obs} /S ⁻¹	t _{1/2} /s	η/%
1,035x10 ⁻⁵	1,035x10 ⁻⁵	1:20	2,47x10 ⁻⁴	2806	60
1,035x10 ⁻⁵	2,070x10 ⁻⁴	1:20	3,63x10 ⁻⁴	1900	73
1,035x10 ⁻⁵	3,105x10 ⁻⁴	1:30	4,44x10 ⁻⁴	1554	80
1,035x10 ⁻⁵	4,140x10 ⁻⁴	1:40	7,91x10 ⁻⁴	876	97
1,035x10 ⁻⁵	6,750x10 ⁻⁴	1:50	7,80x10 ⁻⁴	920	93

Fuente: Petruta, (2014)

Se observa que a mayor concentración del oxidante el valor de la constante de velocidad se incrementa e implícitamente la degradación del colorante aumenta (véase Cuadro 2.6).

2.4.6 Estudios de fotodegradación de compuestos orgánicos presentes en aguas residuales.

Según Fonseca et.al (2012) los procesos de oxidación permiten destruir una gran variedad de compuestos tóxicos que son persistentes a la degradación natural. Estos procesos se han venido desarrollando desde la década de los ochenta y han probado ser efectivos en la destrucción de muchos contaminantes orgánicos.

Silva, Maraíssa (2010) investigó la optimización del proceso H_2O_2/UV para decolorar un efluente de la industria textil, las variables independientes a optimizar fueron el pH, la temperatura y concentración de peróxido de hidrógeno. Obtuvo un polinomio compuesto por 13 parámetros obtenidos estadísticamente.

Silva, Maraíssa (2010) afirma que las condiciones óptimas de tratamiento para aguas de la industria textil, son: pH=12,30; temperatura=52°C y $H_2O_2=3,1 \times 10^{-4}$ mol/L (10,50 ppm). Para el efluente tratado con H_2O_2/UV , se obtuvo una remoción de color de aproximadamente 75,00-80,00 %, se observa una cinética de primer orden con constante de velocidad igual a $(1,5 \pm 0,36) \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Fonseca et.al (2012) estudian la cinética de la degradación de dos colorantes: Ponceau 4R e Amarelo Tartrazina. El estudio es realizado con solución acuosa de Ponceau 4R y Tartrazina con concentraciones de 30

ppm cada uno, trabajando con diversas concentraciones de peróxido de hidrógeno. Logrando obtener un 90% de decoloración.

Fonseca et.al (2012) demuestran que el proceso sigue una cinética de primer orden y recomienda hacer un estudio detallado sobre los productos formados después de aplicado el proceso.

AL-Dawery (2013) estudia la fotodegradación de tartrazina, mediante UV/TiO₂; obtuvo que la velocidad específica de reacción es $3,4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ con una concentración de TiO₂ de 500 ppm, también concluye que las oscilaciones del pH no tienen impacto en el proceso.

Petruta, Viorica (2014), estudia la fotodegradación de tartrazina mediante UV/H₂O₂ en solución acuosa; en un reactor batch de laboratorio. Los parámetros de optimización son la concentración de H₂O₂ y la temperatura para concentraciones constantes de tartrazina $1,035 \times 10^{-5} \text{ M}$ (5,53 ppm) y también concluye que la cinética es de pseudo primer orden.

Petruta, Viorica (2014) realiza ensayos para diferentes concentraciones de H₂O₂ (3,51 a 22,95 ppm) y a concentración constante de tartrazina (5,53 ppm) obteniendo diferentes velocidades de reacción específica (véase Cuadro 2.6, en la página 49); también hace otros ensayos a diferentes concentraciones de tartrazina (2,77 a 44,21 ppm), obteniendo diferentes velocidades de reacción específica (véase Cuadro 2.5, en la página 48).

Petruta, Viorica (2014) concluye que la fotodegradación es posible mediante UV/H₂O₂, obteniendo un 54% de mineralización en tiempos

prolongados de irradiación, además encuentra que la temperatura influye en la velocidad de degradación de tartrazina y por encima de los 22,5 ppm de H₂O₂, la velocidad de degradación disminuye debido al exceso de H₂O₂ y radicales OH⁻ (véase Cuadro 2.6, en la página 49).

Rodríguez, Tatiana et. Al (2008), realiza un estudio de todos los trabajos relacionados al tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta.

La tecnología POA mediante H₂O₂/UV se aplicó en:

- Efluentes del proceso de blanqueamiento de celulosa, condiciones experimentales: H₂O₂ (2584,81 y 11526,00 ppm) pH=2,19 a 11,15 UV= 0 a 180 min), lámpara de Hg media presión.
- Efluentes industriales de destilería (DQO= 750-3000 ppm) y procesamiento de tomates (DQO entre 250-960 ppm), condiciones experimentales: H₂O₂ 0 (0.00 a 34000,00 ppm), pH=3.00-5.00 (destilería); pH=6,00-7,50 (tomates), UV = 0.00 -120.00 min, lámpara de Hg de baja presión (254.00 nm).
- Colorante remazol, negro-B (36 ppm), condiciones experimentales: H₂O₂ =0.00 a 1326.00 ppm, UV= 0.00 a 20.00 min), lámpara de Hg 8 200.00 a 300.00 mmHg).
- Dos mezclas de surfactantes Barquat y Bardac (1000.00 ppm DQO), condiciones experimentales: H₂O₂ =1000.00, pH=8.00, UV= 0.00, 30.00 y 120.00 min), lámpara de Hg baja presión (254.00 mm Hg).

- Efluente secundario de industria textil (DQO=168.00 ppm, Color 420 ADMI units), condiciones experimentales: H_2O_2 =0.00 a 748.00 ppm, pH=7.20, UV= 0.00 a 40.80 min), lámpara de baja presión 254.00 nm.

Garcés et. al (2004) estudia a la fotocátalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales, analiza todos los parámetros que influyen en el proceso de fotocátalisis con TiO_2 .

Estos parámetros son:

- Influencia de la longitud de onda e intensidad de luz.
- Influencia del oxígeno.
- Influencia de la temperatura y el pH.
- Influencia de la calidad del agua a tratar.
- Influencia de la concentración del contaminante a tratar.

2.4.7 Influencia de la longitud de onda e intensidad de la luz

Según Fonseca et.al (2012) el aprovechamiento de la energía absorbida es mayor cuanto menor es la longitud de onda empleada. El catalizador: Cuanto mayor sea la dosis del catalizador (TiO_2), mayor será en principio la eficiencia obtenida, si bien el efecto de la turbidez ocasionada por sus partículas también aumenta, dificultando la difusión de la luz ultravioleta.

2.4.8 Influencia del oxígeno

Según Fonseca et.al (2012) el oxígeno molecular actúa como aceptor de electrones generándose el radical superóxido, promotor de más radicales hidroxilos. La presencia de oxígeno es por tanto esencial para que se produzca una oxidación efectiva.

Según Fonseca et.al (2012) el oxígeno es el oxidante más empleado ya que es el más barato y no compite con el sustrato en el proceso de absorción. Se ha comprobado que cuando desaparece el oxígeno disuelto en el agua y no existe ninguna otra especie oxidante el proceso fotocatalítico, se detiene totalmente.

2.4.9 Influencia de la concentración de H₂O₂

Según Pignatello et al. (2006) la cantidad de agente oxidante es una variable determinante en la eficacia del proceso.

Según Arslan et al. (2009), se debe prestar especial atención en la determinación de la dosis de agente oxidante ya que concentraciones muy elevadas pueden dar lugar a la degradación del mismo por parte de los radicales hidroxilos, además de los inconvenientes desde un punto de vista económico dado el costo del reactivo y de la concentración residual que puede obtener el efluente tratado.

2.4.10 Influencia de la Temperatura y pH.

Según Fonseca et. al (2012) la variación de la temperatura no afecta significativamente la velocidad de las reacciones fotocatalíticas.

Según Zhang et al. (2005), el aumento de la temperatura mejora la velocidad de degradación de los compuestos orgánicos presentes en el efluente, aunque dependiendo del efluente, las diferencias de temperatura en el proceso no dan lugar a cambios significativos.

Según Fonseca et.al (2012) aparentemente el pH no afecta notablemente este tratamiento ya que se han obtenido buenos resultados empleando TiO_2 a diferentes rangos de pH, pero también se ha comprobado que éste afecta el tamaño de las partículas, la carga superficial y las posiciones de los máximos y mínimos de las bandas del TiO_2 debido a su carácter anfotérico, debe trabajarse a un pH diferente al punto isoeléctrico para el TiO_2 (pH 7.00), donde la superficie del óxido no está cargada.

2.4.11 Influencia de la calidad del agua a tratar

Según Fonseca et.al (2012), la presencia de turbidez, sólidos en suspensión y materia orgánica e inorgánica en el agua a tratar pueden restar eficiencia a la oxidación fotocatalítica con TiO_2 . La turbidez interfiere en la interacción de la luz ultravioleta y el catalizador, reduciendo la eficacia de la reacción de destoxificación.

2.5 Normatividad.

2.5.1 Normatividad Nacional e internacional

La Ley General de Recursos Hídricos (Ley N° 29338) fija las funciones de la Autoridad Nacional del agua (ANA).

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) es el organismo que autoriza los vertimientos de aguas residuales tratadas con las opiniones previas técnicas favorables de la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud y de la autoridad ambiental sectorial, las cuales son vinculantes.

El Artículo N°76 de la Ley General de Recursos Hídricos, dice:

"Vigilancia y fiscalización del agua: La Autoridad Nacional del agua en coordinación con el Consejo de Cuenca, en el lugar y el estado físico en que se encuentre el agua, sea en sus cauces naturales o artificiales, controla, supervisa, fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y las disposiciones y programas para su implementación establecidos por autoridad del ambiente. También establece medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua y los bienes asociados a esta. Asimismo, implementa actividades de vigilancia y monitoreo, sobre todo en las cuencas donde

existan actividades que pongan en riesgo la calidad o cantidad del recurso.”

El estándar de calidad ambiental es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente.

El Reglamento De La Ley N° 29338 - Ley De Recursos Hídricos, Aprobado Por Decreto Supremo N° 001-2010-Ag, en su artículo 113, fija las condiciones para autorizar el vertimiento de aguas residuales.

- a. Las aguas residuales deben de ser sometidas a un tratamiento previo, que permitan el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles – LMP.
- b. No se transgredan los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, ECA - Agua en el cuerpo receptor, según las disposiciones que dicte el Ministerio del Ambiente para su implementación.
- c. Las condiciones del cuerpo receptor permitan los procesos naturales de purificación.
- d. No se cause perjuicio a otro uso en cantidad o calidad del agua.
- e. No se afecte la conservación del ambiente acuático.
- f. Se cuente con el instrumento ambiental aprobado por la autoridad ambiental sectorial competente.

g. Su lanzamiento submarino o subacuático, con tratamiento previo, no cause perjuicio al ecosistema y otras actividades lacustre, fluviales o marino costeras, según corresponda.

El reglamento de la ley general de recursos hídricos en su Artículo 148°, fija las condiciones que las empresas deben de cumplir para poder reusar sus aguas:

"Podrá autorizarse el reúso de aguas residuales únicamente cuando se cumplan con todas las condiciones que se detallan a continuación:

a. Sean sometidos a los tratamientos previos y que cumplan con los parámetros de calidad establecidos para los usos sectoriales, cuando corresponda.

b. Cuenten con la certificación ambiental otorgada por la autoridad ambiental sectorial competente, que considere específicamente la evaluación ambiental de reúso de las aguas.

c. En ningún caso se autorizará cuando ponga en peligro la salud humana y el normal desarrollo de la flora y fauna o afecte otros usos."

En el decreto supremo N°002-2008-MINAM, se fijan los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua). En este decreto supremo se establece 4 categorías según el uso del agua.

Estas categorías son:

Categoría 1: Poblacional y recreacional

Categoría 2: Actividades Marino costeras.

Categoría 3: Riego de vegetales y bebidas animales.

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático.

Según el libro verde de la Unión Europea (2001) la responsabilidad social es la integración voluntaria, por parte de las empresas, de las ocupaciones sociales y medioambientales en sus operaciones comerciales y sus relaciones con sus interlocutores.

Según J. Angel (2011) las empresas adoptan un papel social activo a través de la incorporación en todos sus procesos de los valores sociales y la naturaleza voluntaria de esa adopción.

Según la Asamblea general de las Naciones Unidas (1987), el desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Según J. Xercavins (2005), el desarrollo humano es un proceso de ampliación de las opciones de la persona, a todos los niveles. Las capacidades básicas para el desarrollo humano se dirigirían a:

- Obtener una vida más larga y saludable
- Conseguir conocimientos
- Acceder a los recursos necesarios para un nivel de vida adecuado.

Según F. Morales (2002) el desarrollo sostenible tiene una visión a largo plazo en la cual se busca compatibilizar el desarrollo económico y la conservación de recursos teniendo en cuenta las necesidades del presente y las del futuro.

2.5.2 Química Verde

Según Cabildo (2006) la química verde surgió con el fin de minimizar la contaminación y desarrollar nuevos métodos menos agresivos con el medio ambiente; algunos autores prefieren usar el término química sostenible para evitar una posible connotación política.

2.5.3 Los doce principios de la química verde.

Según Anastas y J.C Warner (1998) el diseño de productos y procesos medioambientales benignos debe seguir los 12 principios de la Química Verde (véase Cuadro 2.7).

Cuadro 2.7

LOS DOCE PRINCIPIOS DE LA QUÍMICA VERDE.

1. Prevención de residuos.
2. Economía atómica.
3. Metodología de síntesis de toxicidad reducida.
4. Diseño de compuestos químicos más seguros.
5. Disminución del uso de sustancias auxiliares.
6. Eficiencia energética.
7. Utilización de materias primas renovables.
8. Reducción de derivados.
9. Potenciación de la catálisis.
10. Diseño de productos biodegradables.

11. Desarrollo de técnicas para análisis en tiempo real.

12. Minimizar el potencial de accidentes químicos.

Fuente: Envirowise(UK), 1998

2.6 Diseño experimental.

Según Siqueiros (2004), se entiende por diseño experimental la planeación de una serie de experimentos donde se varían los valores de las variables de entrada de un proceso o sistema y se miden los valores de la variable respuesta o variable de salida, generalmente con el fin de optimizarla en algún sentido. También se llama diseño experimental al resultado de dicha planeación.

2.6.1 Diseños factoriales con tres factores

Lara (2000), clasificó el diseño factorial en 02 modelos, sin réplica y con réplica.

2.6.2 El modelo sin réplica

El modelo estadístico para este diseño es:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + u_{ijk} \quad (27)$$

Con $i = 1, 2, \dots, \alpha; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, c$

Donde:

- $\tau_i, \beta_j, \gamma_k$: Son los efectos producidos por el nivel i -ésimo del factor A, $\sum_i \tau_i = 0$, por el nivel j -ésimo del factor B, $\sum_j \beta_j = 0$, y por el nivel k -ésimo del factor C, $\sum_k \gamma_k = 0$, respectivamente.
- $(\tau\beta)_{ij}, (\tau\gamma)_{ik}, (\beta\gamma)_{jk}, (\tau\beta\gamma)_{ijk}$: Son los efectos producidos por las interacciones entre $AxB, Ax C, BxC$ y $AxBxC$, respectivamente

$$\sum_i (\tau\beta)_{ij} = \sum_j (\tau\beta)_{ij} = \sum_i (\tau\gamma)_{ik} \quad (28)$$

$$\sum_i (\tau\gamma)_{ik} = \sum_j (\beta\gamma)_{jk} = \sum_k (\beta\gamma)_{jk} = \sum_i (\tau\beta\gamma)_{ijk} \quad (29)$$

$$\sum_j (\tau\beta\gamma)_{ijk} = \sum_k (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0 \quad (30)$$

Supongamos que se toma una observación por cada combinación de factores, por tanto, hay un total de $n = abc$ observaciones.

A pesar de las restricciones impuestas al modelo, el número de parámetros $(abc+1)$ supera al número de observaciones (abc) . Por lo tanto, algún parámetro no será estimable (véase Cuadro 2.8).

Cuadro 2.8
PARAMETROS ESTADÍSTICOS

Parámetros	Números
μ (media general)	1
τ_i	a-1
β_j	b-1
γ_k	c-1
$(\tau\beta)_{ij}$	(a-1)(b-1)
$(\tau\gamma)_{ik}$	(a-1)(c-1)
$(\beta\gamma)_{jk}$	(b-1)(c-1)
$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$	(a-1)(b-1)(c-1)
σ^2	1
Total	abc+1

Fuente: Lara Porras, A.M. (2000).

- **Estimación de los parámetros del modelo.**

Los estimadores máximos verosímiles (EMV) de los parámetros del modelo son:

- El E.M.V de μ es $\hat{\mu} = \bar{y} \dots$
- Los E.M.V. de los efectos principales son:

$$\hat{\tau}_i = \bar{y}_i - \bar{y}; \hat{\beta}_j = \bar{y}_j - \bar{y}; \hat{\gamma}_k = \bar{y}_k - \bar{y} \dots$$

- Los E.M.V. de las interacciones de segundo orden son:

$$(\hat{\tau\beta})_{ij} = \bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y} \dots$$

$$(\hat{\tau\gamma})_{ik} = \bar{y}_{ik} - \bar{y}_i - \bar{y}_k + \bar{y} \dots$$

$$(\hat{\beta\gamma})_{jk} = \bar{y}_{jk} - \bar{y}_j - \bar{y}_k + \bar{y} \dots$$

- El E.M.V de la interacción de tercer orden:

$$\begin{aligned} (\hat{\tau\beta\gamma})_{ijk} &= y_{ijk} - \hat{\mu} - \hat{\tau}_i - \hat{\beta}_j - \hat{\gamma}_k - (\hat{\tau\beta})_{ij} - (\hat{\tau\gamma})_{ik} - (\hat{\beta\gamma})_{jk} \\ &= y_{ijk} - \bar{y}_{ij} - \bar{y}_{ik} - \bar{y}_{jk} - \bar{y}_{i..} + \bar{y}_j + \bar{y}_{..j} - \bar{y} \end{aligned}$$

- **Descomposición de la variabilidad**

En este modelo la variabilidad total se descompone en:

$$SCT = SCA + SCB + SCC + SC(AB) + SC(AC) + SC(BC) + SC(ABC) + SCR \quad (31)$$

Estas sumas de cuadrados se pueden expresar como:

$$SCT = \sum_{i,j,k} y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abc} ; SCA = \frac{(\sum_i y_i^2)}{bc} - \frac{y^2 \dots}{abc}$$

$$SC(AB) = \left(\sum_{i,j} y_{i,j}^2 \right) / c - \frac{y^2 \dots}{abc} - SCA - SCB: S.C \text{ de la interacción } AxB$$

$$SC(AC) = \left(\sum_{i,k} y_{i,k}^2 \right) / b - \frac{y^2 \dots}{abc} - SCA - SCC: S.C \text{ de la interacción } AxC$$

$$SC(BC) = \left(\sum_{j,k} y_{j,k}^2 \right) / a - \frac{y^2 \dots}{abc} - SCB - SCC: S.C \text{ de la interacción } BxC$$

$$SC(ABC) = \left(\sum_{i,j,k} y_{i,j,k}^2 \right) / abc - \frac{y^2 \dots}{abc} - SCA - SCB - SCC - SC(AB) -$$

$$SC(AC) - SC(BC): \quad S.C \text{ de la interacción } ABxC$$

Al tratarse de un modelo sin replicación, los contrastes sólo se pueden realizar si se supone que la interacción de tercer orden es cero. En esta hipótesis, $CM_{(ABC)} = CM_R$ y los contrastes de cada uno de los factores e interacciones comparan su cuadrado medio correspondiente con la varianza residual para construir el estadístico de contraste.

El objetivo del análisis es realizar los contrastes de hipótesis nula que se muestran a continuación junto con el estadístico de contraste correspondiente:

- i. $H_{OA} \equiv \tau_1 = \dots \tau_a = 0: F_A = \frac{CMA}{CMR} \rightarrow H_{OA} F_{(a-1),(a-1)(b-1)(c-1)}$
- ii. $H_{OB} \equiv \beta_1 = \dots \beta_b = 0: F_B = \frac{CMB}{CMR} \rightarrow H_{OB} F_{(b-1),(a-1)(b-1)(c-1)}$
- iii. $H_{OC} \equiv \tau_1 = \dots \tau_c = 0: F_C = \frac{CMC}{CMR} \rightarrow H_{OC} F_{(c-1),(a-1)(b-1)(c-1)}$
- iv. $H_{O(AB)} \equiv (\tau\beta)_{ij} = 0: F_{(AB)} = \frac{CM(AB)}{CMR} \rightarrow H_{O(AB)} F_{(a-1),(a-1)(b-1)(c-1)}$
- v. $H_{O(AC)} \equiv (\tau\gamma)_{ik} = 0: F_{(AC)} = \frac{CM(AC)}{CMR} \rightarrow H_{O(AC)} F_{(a-1),(a-1)(b-1)(c-1)}$

vi. $H_{0(BC)} \equiv (\beta\gamma)_{jk} = 0: F_{(BC)} = \frac{CM(BC)}{CMR} \rightarrow$

$H_{0(AOB)} F_{(b-1)(c-1),(a-1)(b-1)(c-1)}$

Fijado un nivel de significación α , se rechaza la H_0 correspondiente, si $F_{exp} > F_{teórico}$ (véase Cuadro 2.9, página 65).

Cuadro 2.9

**ANOVA: MODELO FACTORIAL CON TRES FACTORES
(SIN RÉPLICA)**

F.V.	S.C	G.L	C.M	F_{exp}
Factor A	SCA	a-1	CMA	CMA/CMR
Factor B	SCB	b-1	CMB	CMB/CMR
Factor C	SCC	c-1	CMC	CMC/CMR
AxB	SC(AB)	(a-1)(b-1)	CM(AB)	CM(AB)/CMR
AxC	SC(AC)	(a-1)(c-1)	CM(AC)	CM(AC)/CMR
BxC	SC(BC)	(b-1)(c-1)	CM(BC)	CM(BC)/CMR
AxBxC	SC(ABC)	(a-1)(b-1)(c-1)	CMR	CM(ABC)/CMR
TOTAL	SCT	Abc-1	CMT	

Fuente: Lara Porras, A.M. (2000).

2.6.3 El modelo con réplica.

El modelo estadístico para este diseño es:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + u_{ijkl} \quad (32)$$

Con $i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, c; l = 1, 2, \dots, r$

Donde r es el número de replicaciones y $n = abcr$ es el número de observaciones.

El número de parámetros de este modelo es, como en el modelo de tres factores sin replicación, $abc+1$ pero en este caso el número de observaciones es $abcr$.

Las sumas de cuadrados tienen las siguientes expresiones:

$$SCT = \sum_{i,j,k,l} y_{ijkl}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcr}; SCA = \frac{(\sum_i y_i^2)}{bcr} - \frac{y^2 \dots}{abcr}$$

$$SCB = \frac{(\sum_j y_j^2)}{acr} - \frac{y^2 \dots}{abcr}; SCC = \frac{(\sum_k y_k^2)}{bcr} - \frac{y^2 \dots}{abcr}$$

$$SC(AB) = \frac{(\sum_{i,j} y_{i,j}^2)}{cr} - \frac{y^2 \dots}{abcr} - SCA - SCB$$

$$SC(AC) = \frac{(\sum_{i,k} y_{i,k}^2)}{br} - \frac{y^2 \dots}{abcr} - SCA - SCC$$

$$SC(ABC) = \frac{(\sum_{i,j,k} y_{i,j,k}^2)}{r} - \frac{y^2 \dots}{abcr} - SCA - SCB - SCC - SC(AB) - SC(AC) - SC(BC)$$

En este modelo (véase Cuadro 2.10, en la página 67), el objetivo del análisis es realizar los contrastes de hipótesis nula que, junto al estadístico de contraste, se muestran a continuación:

$$i. \quad H_{OA} \equiv \tau_1 = \dots = \tau_a = 0: F_A = \frac{CMA}{CMR} \rightarrow H_{OA} F_{(a-1), abc(r-1)}$$

- ii. $H_{OB} \equiv \beta_1 = \dots \beta_b = 0: F_B = \frac{CMB}{CMR} \rightarrow H_{OB} F_{(b-1),abc(r-1)}$
- iii. $H_{OC} \equiv \tau_1 = \dots \tau_c = 0: F_C = \frac{CMC}{CMR} \rightarrow H_{OC} F_{(c-1),abc(r-1)}$
- iv. $H_{0(AB)} \equiv (\tau\beta)_{ij} = 0: \forall_{i,j}: F_{(AB)} = \frac{CM(AB)}{CMR} \rightarrow H_{0(AB)} F_{(a-1)(b-1),abc(r-1)}$
- v. $H_{0(AC)} \equiv (\tau\gamma)_{ik} = 0: \forall_{i,k}: F_{(AC)} = \frac{CM(AC)}{CMR} \rightarrow H_{0(AC)} F_{(a-1)(c-1),abc(r-1)}$
- vi. $H_{0(BC)} \equiv (\beta\gamma)_{jk} = 0: \forall_{j,k}: F_{(BC)} = \frac{CM(BC)}{CMR} \rightarrow H_{0(BC)} F_{(b-1)(c-1),abc(r-1)}$
- vii. $H_{0(ABC)} \equiv (a\beta\gamma)_{ijk} = 0: \forall_{i,j,k}: F_{(ABC)} = \frac{CM(ABC)}{CMR} \rightarrow H_{0(ABC)} F_{(a-1)(b-1)(c-1),abc(r-1)}$

Cuadro 2.10

**TABLA ANOVA: MODELO FACTORIAL CON TRES FACTORES
(CON RÉPLICA)**

F.V	S.C	G.L	C.M	F _{exp}
Factor A	SCA	a-1	CMA	CMA/CMR
Factor B	SCB	b-1	CMB	CMB/CMR
Factor C	SCC	c-1	CMC	CMC/CMR
AxB	SC(AB)	(a-1)(b-1)	CM(AB)	CM(AB)/CMR
AxC	SC(AC)	(a-1)(c-1)	CM(AC)	CM(AC)/CMR
BxC	SC(ABC)	(b-1)(c-1)	CM(BC)	CM(BC)/CMR
AxBxC	SC(ABC)	(a-1)(b-1)(c-1)	CM(ABC)	CM(ABC)/CMR
Residual	SCR	abc(r-1)	CMR	
TOTAL	SCT	Abcr-1	CMT	

Fuente: Lara (2000).

2.6.4 Optimización de procesos con superficies de respuesta

Según Gudelia.F.(2006), la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), fue introducida por Box y Wilson y es una colección de técnicas que permite al investigador inspeccionar una respuesta, que se puede mostrar como una superficie, cuando los experimentos investigan el efecto que tiene el variar factores cuantitativos en los valores que toma una variable dependiente o respuesta; ejemplo de esto puede ser estudiar cómo los valores de temperatura y presión que afectan la velocidad de una reacción química y tratar de encontrar los valores que optimicen esta respuesta. Esto es, se trata de encontrar los valores óptimos para las variables independientes que maximizan, minimizan o cumplen ciertas restricciones en la variable respuesta.

Un modelo de primer orden (lineal) sin interacciones o productos cruzados:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + e \quad (33)$$

El modelo lineal de primer orden con interacciones:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + e \quad (34)$$

y el modelo cuadrático o de segundo orden:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + e \quad (35)$$

Donde e representa el ruido o error observado en la respuesta.

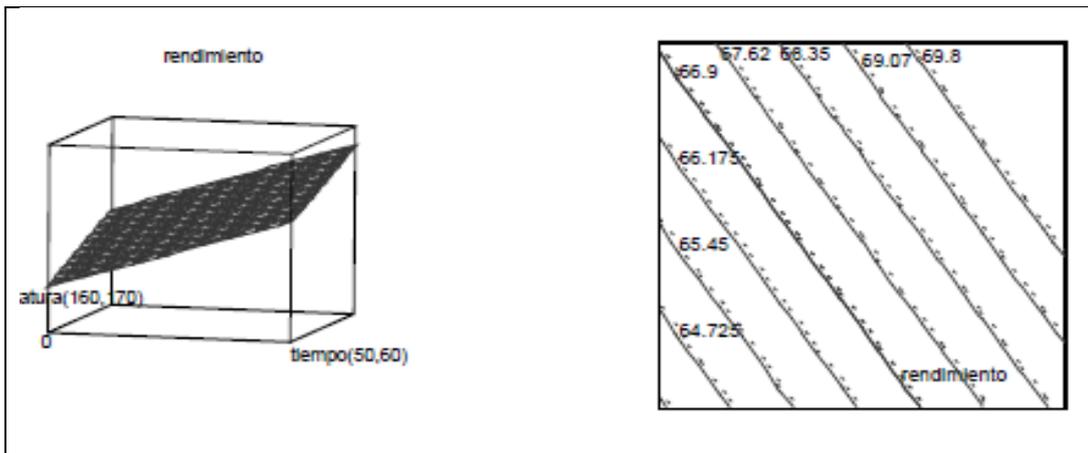
En la metodología de superficie de respuesta se supone que la variable respuesta y está en función de los niveles de los factores cuantitativos representados por las variables x_1, x_2, \dots, x_k . Los modelos polinomiales se utilizan como una aproximación a la función de respuesta real, y generalmente son buenas aproximaciones cuando se trabaja en pequeñas zonas de los factores cuantitativos.

Cuando se trabaja con dos factores y se utiliza el modelo lineal ajustado de primer orden.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 \quad (36)$$

La superficie de respuesta y sus curvas de nivel, que son las líneas con valores iguales de respuesta, se podrían representar con las siguientes gráficas tomadas de un ejemplo (véase la Figura 2.9), donde los factores son temperatura y tiempo y la respuesta es el rendimiento.

Figura 2.9
REPRESENTACIÓN DE VARIABLES Y RESPUESTA.
(PRIMER ORDEN)



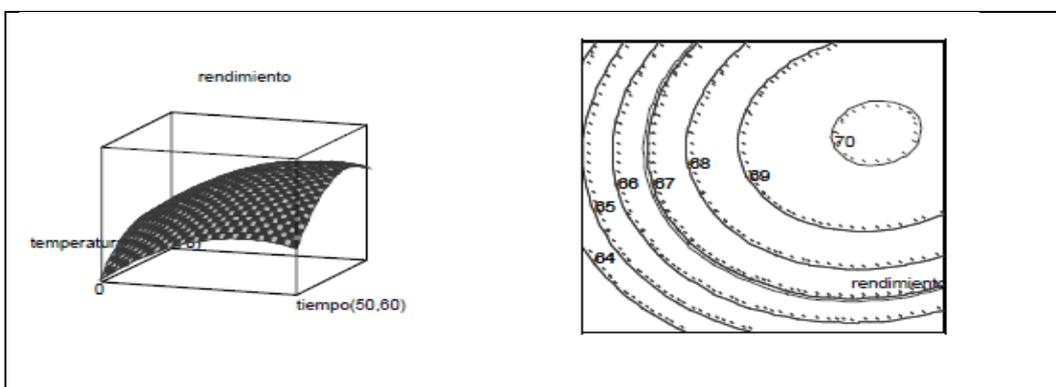
Fuente: Siqueiros (2004)

Si el modelo anterior lo convertimos en un modelo de segundo orden, el modelo ajustado sería:

$$\hat{y} = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 x_1 + \widehat{\beta}_2 x_2 + \widehat{\beta}_{11} * x_1^2 + \widehat{\beta}_{22} * x_2^2 + \widehat{\beta}_{12} * x_2^2 + \widehat{\beta}_{12} \quad (37)$$

Podría ser representado gráficamente de la siguiente manera (véase la Figura 2.10, página 70).

Figura 2.10
REPRESENTACIÓN DE VARIABLES Y RESPUESTA.
(SEGUNDO ORDEN)



Fuente: Siqueiros (2004)

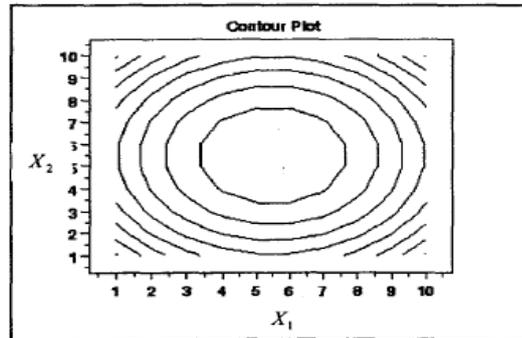
2.6.5 Análisis de gráfico de una Superficie de Respuesta

Según Siqueiros (2004), una superficie de respuesta se puede analizar también gráficamente por medio de los contornos de ésta, conocidos como curvas de nivel. En la metodología de superficie de respuesta el método gráfico tiene muchas ventajas, pues permite determinar visualmente cómo se espera que sea el comportamiento de la respuesta en estudio. Un máximo o un mínimo puede estar representado (véase la Figura 2.11, en la página N° 71), se tendrá un máximo si los círculos en el interior tienen valores más grandes, y estos disminuyen conforme se alejan del centro y un mínimo cuando se comporten de una manera contraria a lo anterior.

El método también permite visualizar superficies de respuesta simultáneamente, esto es, cuando se están manejando los mismos factores o variables independientes y dos o más respuestas al mismo tiempo. De esta manera el experimentador se asegura que el punto óptimo simultáneo encontrado sea en realidad un óptimo global.

Al optimizar varias respuestas el método gráfico sobrepone sobre la región experimental las superficies de respuesta descritas por los diferentes modelos ajustados y se trata de localizar dentro de ella subregiones en las cuales todos los modelos predicen valores aceptables para las respuestas.

Figura 2.11
REPRESENTACIÓN DE VARIABLES Y RESPUESTA.



Fuente: Siqueiros (2004)

2.7 Definición de términos básicos

- **Unidad experimental:** son los objetos, individuos, intervalos de espacio o tiempo sobre los que se experimenta.
- **Variable de interés o respuesta:** es la variable que se desea estudiar y controlar su variabilidad.
- **Factor:** son las variables independientes que pueden influir en la variabilidad de la variable de interés.
- **Factor tratamiento:** es un factor del que interesa conocer su influencia en la respuesta.
- **Niveles:** cada uno de los resultados de un factor, según sean elegidos por el experimentador o elegidos al azar de una amplia población se denominan factores de efectos fijos o factores de efectos aleatorios.
- **Tratamiento:** es una combinación específica de los niveles de los factores en estudio. Son, por tanto, las condiciones experimentales que se desean comparar en el experimento. En un diseño con un único factor son los distintos niveles del factor y en un diseño con

varios factores son las distintas combinaciones de niveles de los factores.

- **Observación experimental:** es cada medición de la variable respuesta.
- **Tamaño del Experimento:** es el número total de observaciones recogidas en el diseño.
- **Interacción de factores:** existe interacción entre dos factores F_i y F_j si el efecto de algún nivel de F_i cambia al cambiar de nivel en F_j . Esta definición puede hacerse de forma simétrica y se puede generalizar a interacciones de orden tres o superior.
- **Diseño estadístico de experimentos:** es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados que puedan ser analizados mediante métodos estadísticos, con objeto de producir conclusiones válidas y objetivas.
- **Flujo volumétrico:** Para algunos autores también llamado "Caudal", se define como el volumen por unidad de tiempo, también conocido como Caudal volumétrico, las unidades son litros/minuto (LPM).
- **Grado de acidez:** O también potencial de hidrogeniones pH; la escala del pH mide qué tan ácida o básica es una sustancia. Varía de 0 a 14. Un pH de 7 es neutro. Si el pH es inferior a 7 es ácido y si es superior a 7 es básico.

- **Valor p** : (a veces conocido simplemente como el p-valor, o bien directamente en inglés **P-Value**); en contrastes de hipótesis, en Estadística, está definido como la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el que realmente se ha obtenido (valor del estadístico calculado), suponiendo que la *hipótesis nula es cierta*. Es fundamental tener en cuenta que el valor p está basado en la asunción de la hipótesis de partida (o hipótesis nula).
- Prueba F: Prueba en la que el estadístico utilizado sigue una distribución F si la hipótesis nula no puede ser rechazada.
- Fotón: La radiación está compuesta de unidades (cuantos) indivisibles. En cada proceso elemental sólo puede emitirse o absorberse un cuanto de luz. A cada uno de estos cuantos se les denominó "fotón". La energía (E) de un fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación(ν) tal que: $E=h * \nu$, donde h es la constante de plank.

III. VARIABLES E HIPÓTESIS.

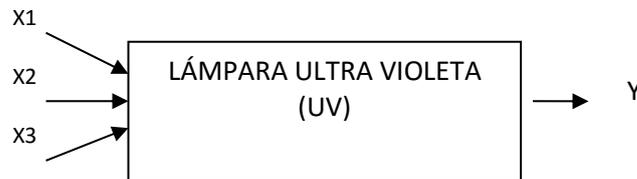
3.1 Definición de las variables.

Las variables han sido definidas como: Las variable dependiente (Y) es % de degradación de colorante amarillo de tartrazina y las variables independientes son: relación de concentración amarillo de

tartrazina/concentración de peróxido de hidrógeno (X1), pH (X2), Flujo volumétrico (X3).

3.2 Operacionalización de las variables.

La investigación se realizará con 03 factores y 03 Niveles de estudio y el valor esperado es 01 respuesta (véase Cuadro 3.1, en la página 75).



Variables independientes

X1 = Grado de acidez de la muestra experimental.
X2 = Concentración de peróxido de hidrógeno en la muestra experimental.
X3 = Flujo volumétrico de la muestra experimental.

Variables dependientes

Y= Reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂

Cuadro 3.1
OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cómo será la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	Conocer la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	Y=Reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	Absorbancia del colorante en la muestra	Porcentaje	Aplicación estadística y espectrofotometría
a) ¿Cómo Influyen los cambios del grado de acidez, en la reducción de la concentración del colorante amarillo contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	a) Determinar la influencia del grado de acidez en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	X1= Grado de acidez de la muestra experimental	Absorbancia del colorante en la muestra	Porcentaje	Ensayos y espectrofotometría
b) ¿Cómo Influyen los cambios de concentración de peróxido de hidrógeno (ppm de H ₂ O ₂) en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	b) Determinar la influencia de la concentración de peróxido en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	X2= Concentración de peróxido de hidrógeno en la muestra experimental	Absorbancia del colorante en la muestra	Porcentaje	Ensayos y espectrofotometría
c) ¿Cómo Influyen los cambios de flujo volumétrico en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	c) Determinar la influencia de los cambios de flujo volumétrico en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	X3= Flujo volumétrico de la muestra experimental en el foto-reactor	Absorbancia del colorante en la muestra	Porcentaje	Ensayos y espectrofotometría

RELACIÓN DE VARIABLES: $Y = F(X1, X2, X3)$

Y= Reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?

X1 = Grado de acidez de la muestra experimental

X2 = Concentración de peróxido de hidrógeno en la muestra experimental

X3 = Flujo volumétrico de la muestra experimental en el foto-reactor

Fuente: Los Autores (2015)

3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas

Los autores plantean la siguiente hipótesis.

Hipótesis general

Se reduce la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂

Hipótesis específicas

- a) El grado de acidez influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂
- b) La concentración de peróxido influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂
- c) El flujo volumétrico influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?

IV. METODOLOGÍA.

4.1 Tipo de investigación.

El presente trabajo es una investigación de tipo experimental, se realizaron 27 pruebas experimentales en el equipo de oxidación avanzada del laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la FIQ-UNAC, se tomaron muestras hacer el seguimiento de la concentración de amarillo de tartrazina, para lo cual usamos el espectrofotómetro UV-Visible del laboratorio de investigación de la FIQ-UNAC.

4.2 Diseño de la investigación.

Figura 4.1
Etapas del diseño de Investigación



Fuente: Los autores (2015)

4.2.1 Equipo experimental.

Para el desarrollo de las pruebas experimentales se usó el equipo multipropósito de tratamiento de agua- AQUASUR PERU-SAC, este equipo cuenta con:

- Rotámetro en el rango 2.00 a 18.00 LPM.
- Válvulas reguladoras de caudal.
- Bomba 5.00-45.00 LPM (1.00 Hp).
- Reactor, incorporado con lámpara UV (véase Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1

ESPECIFICACIONES DEL REACTOR UV.

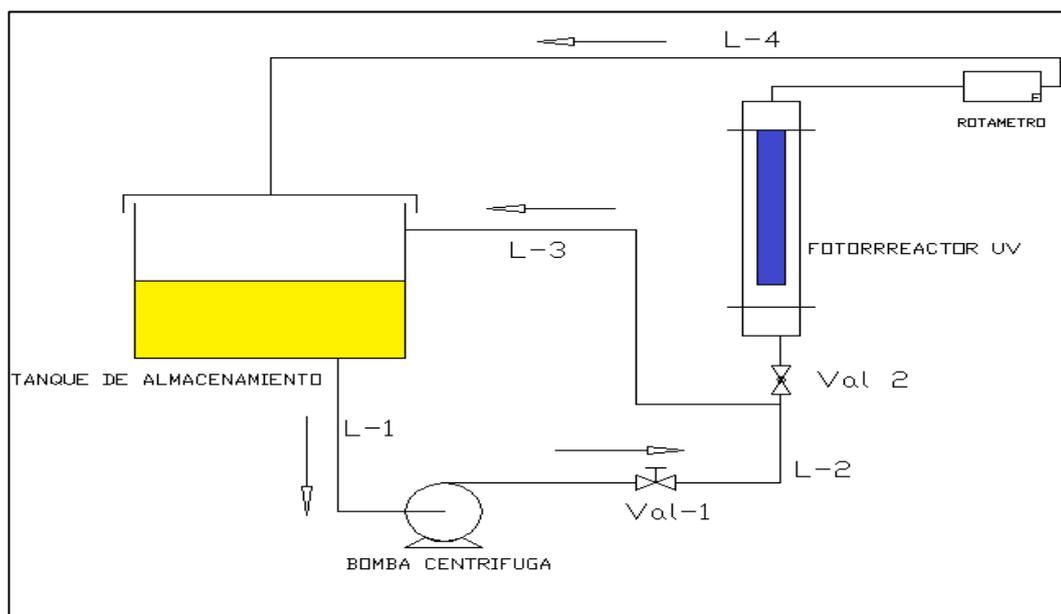
ESPECIFICACIONES EQUIPO EXPERIMENTAL	MODELO-SSQ-PA
US Public Health 16 MJ/cm ²	41.6 lpm (11 gpm) (2.5 m ³ /Hr)
R-Can Estándar 30 MJ/cm ²	22.7 lpm (6 gpm) (1.4 m ³ /Hr)
NSF/EPA	17 0 lpm (4.5 gpm)
Dimensiones	
Longitud	56.00 cm
Diámetro	6.50 cm
Entrada/salida , diámetros	3/4" MNPT
Eléctrica	
Voltaje	100-240 V/ 50-60 Hz
Potencia de consumo	30.00 watt
Potencia de lámpara	25.00 watt
Presión Máxima de operación	8.62 bar
Temperatura ambiental del agua	2 - 40 °C
Tipo de lámpara	
Material de construcción	304.S.S
Lámpara UV	254.00 nm
Potencia	0.95 Kw

Fuente: Aquasur (2015)

La operación del equipo experimental (véase Figura 4.2, en la página 80) es de la siguiente forma:

- Llenar el tanque de almacenamiento con 100 litros de agua y 0.5 gramos de AMT.
- Regular el pH de trabajo.
- La línea L-1 es la succión y la línea L-2 es la descarga de la bomba (asegurarse que la línea de succión no tenga presencia de aire), la línea L-3 sirve para regular el flujo volumétrico que ingreso al foto-reactor.
- Mediante el tablero de control se acciona el botón de funcionamiento en automático (véase Gráfico 10.12, en la página 168).
- Mediante la válvula Val 2 (la válvula Val -1 está completamente abierta) regulamos el Flujo volumétrico de trabajo, verificamos el flujo volumétrico mediante el rotámetro.
- Las muestras fueron tomadas a la salida de la línea L-4.
- Las muestras fueron almacenadas Erlenmeyer; teniendo cuidado de codificar de forma correctas (véase figura 4.3, en la página 80), terminada la experiencia las muestras fueron llevadas al laboratorio de investigación de la FIQ-UNAC, para su respectivo análisis.

Figura 4.2
EQUIPO FOTO-REACTOR EXPERIMENTAL- LOPU



Fuente: Aquasur (2015).

Figura 4.3



MUESTRAS A DIFERENTES TIEMPOS DE REACCIÓN

Fuente: Los autores (2015).

4.3 Población y muestra.

El criterio población y muestra, no se aplica a la presente investigación por las características de la investigación.

La investigación utilizó la infraestructura del Laboratorio de Operaciones y procesos unitarios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao y el Laboratorio de Investigación de esta casa de estudios, en donde se preparó las muestras experimentales, se realizó todas las experiencias planteadas en el diseño experimental (véase Cuadro 4.3, en la página 86), así como también los análisis de laboratorio necesarios para el trabajo de investigación.

4.3.1 Preparación de experimentos.

Para el presente estudio se utilizó agua contaminada con amarillo de tartrazina (agua potable con colorante AMT); que se preparó a 50.00; 25.00 y 12.50 ppm de Amarillo de tartrazina diferentes grados de acidez pH=4.00; pH=6.00 y pH=8.00.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

4.4.1 Determinación de pH.

El pH de cada una de las muestras fue determinado mediante el equipo multi-paramétrico pHmetro-Hanna. Modelo: HI 991300C Low Range Portable pH/EC/TDS/Temperatura Meter), La calibración se realiza con soluciones buffers de 4.00 y 10.00. (Vea Figura 4.4 página 84).

4.4.2 Determinación de concentración de colorante amarillo de tartrazina.

Para seguir la reducción de la concentración del colorante en el tiempo, se utilizó la técnica de espectroscopia (con el espectrofotómetro UV-Visible Cary 50).

El espectrofotómetro UV-Visible Cary 50 es un instrumento que puede hacer mediciones remotas de UV-Visible con fibra óptica. Está provisto de una lámpara de flash de xenón y un haz concentrado. Puede escanear todo el rango de longitudes de onda (190.00-1100.00 nm), además el equipo cuenta con el Software WinUV.

Las concentraciones se determinaron a partir de sus características de absorbancia en el UV-VIS (200.00 - 700.00 nm) y se fueron medidos

basados en la curva de calibración construida a la longitud de onda de máxima absorbancia (431.00 nm) con concentraciones de 2.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00 mg/L. (véase la gráfica N°10.1, en la página 159).

4.5 Determinación de Color en la escala platino/cobalto

La reducción del color en la escala platino/cobalto (PCU) mediante el método colorimétrico adaptado por Hach del método estándar EPA para agua residual edición 21. Para la lectura se usó el medidor Modelo HI727 Checker®HC (Handheld Colorimeter). El mismo que tiene un rango de 0-500 PCU, provista de una lámpara que emite una luz de 470.00 nm de longitud de onda, y una foto celda de silicón. (Véase Figura 4.4, en la página 84).

4.6 Plan de análisis estadísticos de datos.

Para el análisis estadístico se empleó: El diseño factorial completo con 3 factores o variables y 3 niveles, un nivel bajo (-), nivel central (0), y un nivel alto (+).

Los diseños factoriales a tres niveles generan pruebas en cada combinación de estos tres niveles. Con 3 factores experimentales, obtuvimos 27 corridas, como se presentan en la hoja de trabajo (véase Cuadro 4.2 y 4.3, en la página 85 y 86). Para el análisis de los resultados

se empleó el método de superficie respuesta con el software Minitab versión 17. En este software se ingresó los valores obtenidos de la experimentación aleatoria y se analizaron los efectos con los gráficos de contorno y la ecuación estadística propuesta por el software.

Figura 4.4
EQUIPOS PARA LA DETERMINACIÓN DE: pH, COLOR,
CONCENTRACIÓN.

<p>1. Equipo para la determinación de pH.</p>	 <p>EQUIPO MULTIPARAMÉTRICO PHMETRO-HANNA HI 991300C.</p>
<p>2. Equipo para la determinación de concentración de colorante amarillo de tartrazina.</p>	 <p>EQUIPO VARIAN UV VIS CARY-50</p>

<p>3. Equipo para la determinación de color.</p>	 <p>MEDIDOR MODELO HI727 CHECKER®HC</p>
--	--

Fuente: Los autores (2015)

Cuadro 4.2
DISEÑO FACTORIAL COMPLETO
(3³ = 27 pruebas experimentales)

StdOrder	X1 pH	X2 perox(ppm)	X3 Flujo(l/min)
2	0	-1	-1
16	-1	0	+1
14	0	0	0
15	+1	0	0
8	0	-1	+1
23	0	+1	0
27	+1	+1	+1
20	0	+1	-1
13	-1	0	0
18	+1	0	+1
0	-1	+1	+1
24	+1	+1	0
11	0	0	-1
22	-1	+1	0
12	+1	0	-1
1	-1	-1	-1
6	+1	-1	0
10	-1	0	-1

19	-1	+1	-1
4	-1	-1	0
7	-1	-1	+1
5	0	-1	0
17	0	0	+1
26	0	+1	+1
9	+1	-1	+1
3	+1	-1	-1
21	+1	+1	-1

Fuente: Los autores (2015)

Cuadro 4.3

DISEÑO EXPERIMENTAL PARA PRUEBAS

Acidez pH (x1)	ml H2O2 (ppm H2O2)/g AMT (ppm AMT) (x2)	Flujo volumétrico l/min (x3),
8 (+1)	10 (50ppm)/0.5 (5ppm) ; (+1)	6 (+1)
8 (+1)	5 (25ppm)/0.5 (5ppm) ; (0)	6 (+1)
8 (+1)	2.5(12.5ppm)/0.5 (5ppm) ; (-1)	6 (+1)
8 (+1)	10 (50ppm)//0.5 (5ppm) ; (+1)	4 (0)
8 (+1)	5(25ppm)/0.5 (5ppm) ; (0)	4 (0)
8 (+1)	2.5(12.5ppm)/0.5 (5ppm) ; (-1)	4 (0)
8 (+1)	10 (50ppm)/0.5 (5ppm) ; (+1)	2 (-1)
8 (+1)	5(25ppm)/0.5 (5ppm) ; (0)	2 (-1)
8 (+1)	2.5(12.5ppm)/0.5 (5ppm) ; (-1)	2 (-1)
6 (-1)	10 (50ppm)//0.5 (5ppm) ; (+1)	6 (+1)
6 (-1)	5(25ppm)0.5 (5ppm) ; (0)	6 (+1)
6 (-1)	2.5(12.5ppm)/0.5 (5ppm) ; (-1)	6 (+1)
6 (-1)	10 (50ppm)//0.5 (5ppm) ; (+1)	4 (0)
6 (-1)	5(25ppm)/0.5 (5ppm) ; (0)	4 (0)
6 (-1)	2.5(12.5ppm)/0.5 (5ppm) ; (-1)	4 (0)
6 (-1)	10 (50ppm)//0.5 (5ppm) ; (+1)	2 (-1)
6 (-1)	5(25ppm)/0.5 (5ppm) ; (0)	2 (-1)

6(-1)	2.5(12.5ppm)/0.5 (5ppm) ; (-1)	2 (-1)
4 (0)	10 (50ppm)//0.5 (5ppm) ; (+1)	6 (+1)
4 (0)	5(25ppm)/0.5 (5ppm) ; (0)	6 (+1)
4 (0)	2.5(12.5ppm)/0.5 (5ppm) ; (-1)	6 (+1)
4 (0)	10(50ppm)//0.5 (5ppm) ; (+1)	4 (0)
4 (0)	5(25ppm)/0.5 (5ppm) ; (0)	4 (0)
4 (0)	2.5(12.5ppm)/0.5 (5ppm) ; (-1)	4 (0)
4 (0)	10 (50ppm)/0.5 (5ppm) ; (+1)	2 (-1)
4 (0)	5(25ppm)./0.5 (5ppm) ; (0)	2 (-1)
4 (0)	2.5(12.5ppm)/0.5 (5ppm) ; (-1)	2 (-1)

Fuente: Los autores (2015)

V. RESULTADOS.

5.1 Resultados Parciales.

5.1.1. Influencia del grado de acidez, en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina.

- **A pH=4.**

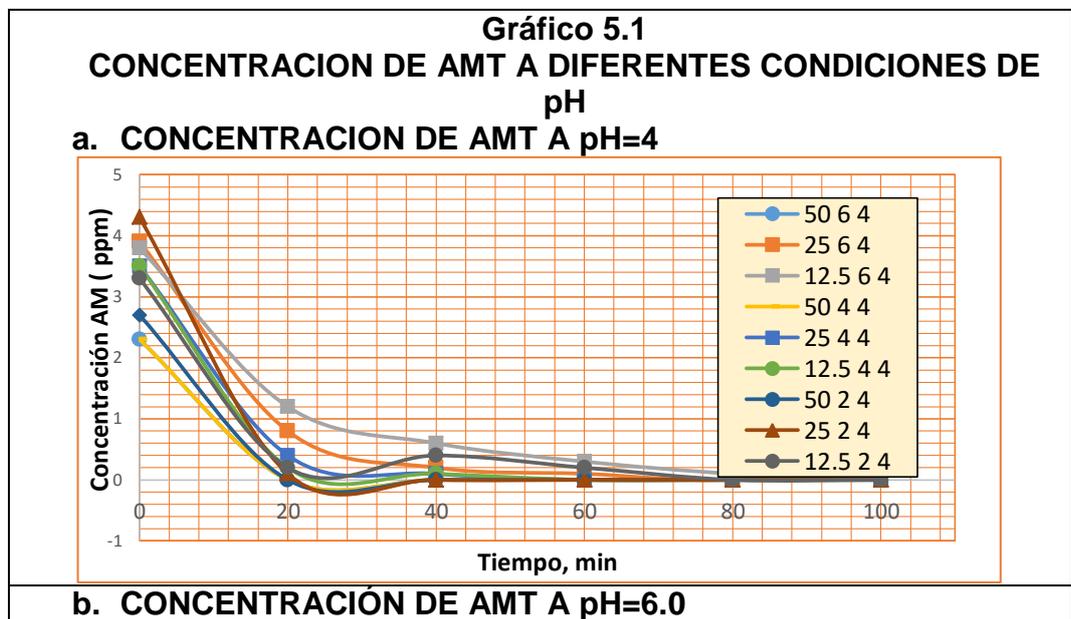
En el cuadro 5.2, en la página 94, se observa que la reducción de la concentración del AMT a los 20.00 minutos y una concentración de $H_2O_2=50.00$ ppm es de 100.00% en las pruebas 19, 22, 25 a los flujos volumétricos de 6.00 LPM, 4.00 LPM y 2.00 LPM respectivamente, (véase gráfico 5.1-a, en la página 88).

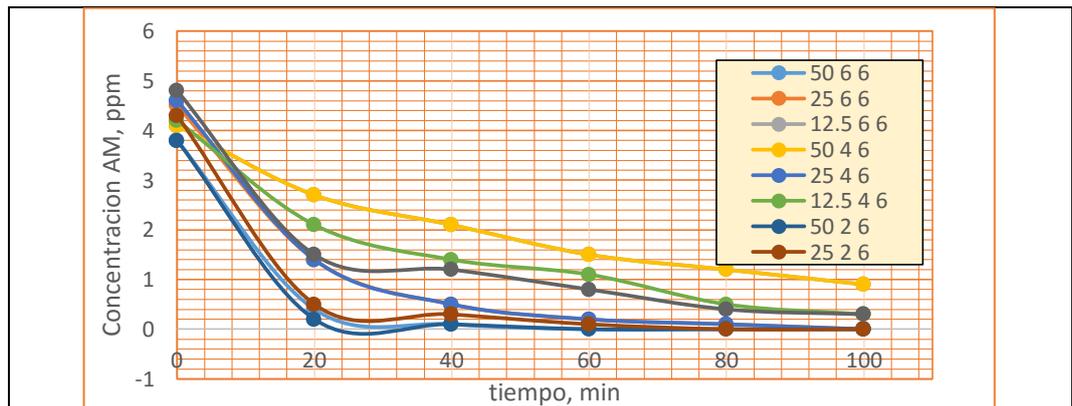
- **A pH=6.**

En el cuadro 5.2, en la página 94, se observa que la reducción de la concentración de AMT a los 20.00 minutos y una concentración de $H_2O_2=50.00$ ppm.es de 94.74% de tratamiento, a un flujo volumétrico de 2.00 LPM (véase gráfico 5.1-b, en la página 88).

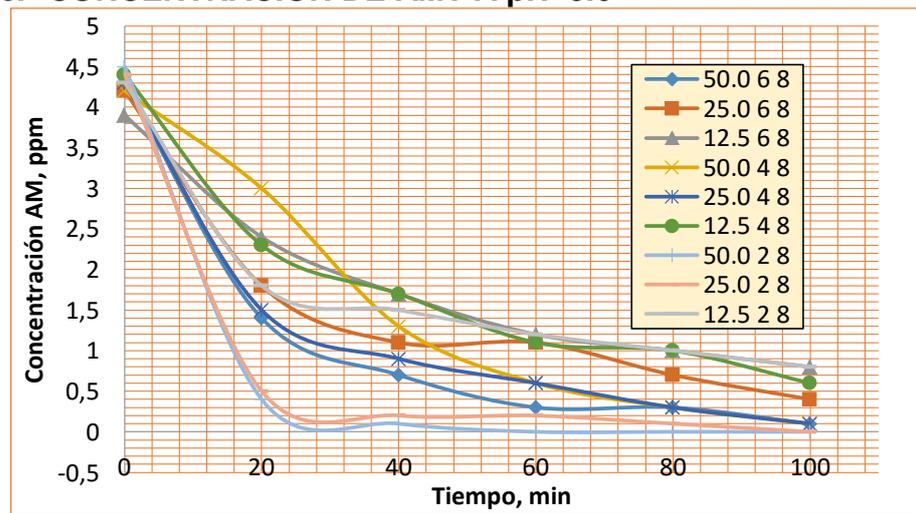
- **A pH=8.**

En el cuadro 5.2, en la página 94, se observa que la reducción de la concentración de AMT a los 20.00 minutos y una concentración de $H_2O_2=25.00$ ppm.es de 88.64% de tratamiento, a un flujo volumétrico de 2.00 LPM (véase gráfico 5.1-c, en la página 88).





c. CONCENTRACIÓN DE AMT A pH=8.0



Fuente: Los autores (2015)

Cuadro 5.1
REDUCCIÓN DEL COLORANTE AMARILLO DE TARTRAZINA A PH=4, 6, 8.

CONCENTRACIÓN DE AMARILLO DE TARTRAZINA A pH=4									
Item	H2O2, ppm	Caudal, LPM	pH	C ₀	C ₂₀	C ₄₀	C ₆₀	C ₈₀	C ₁₀₀
1	50.00	6.00	4.0	2.3	0	0	0	0	0
2	25.00	6.00	4.0	3.9	0.8	0.2	0.1	0	0.3
3	12.50	6.00	4.0	3.8	1.2	0.6	0.3	0.1	0
4	50.00	4.00	4.0	2.3	0	0	0	0	0
5	25.00	4.00	4.0	3.5	0.4	0.1	0	0	0
6	12.50	4.00	4.0	3.5	0.2	0.1	0	0	0
7	50.00	2.00	4.0	2.7	0	0	0	0	0
8	25.00	2.00	4.0	4.3	0.1	0	0	0	0
9	12.50	2.00	4.0	3.3	0.2	0.4	0.2	0	0
CONCENTRACIÓN DE AMARILLO DE TARTRAZINA A pH=6									
Item	H2O2, ppm	FLUJO, LPM	pH	C ₀	C ₂₀	C ₄₀	C ₆₀	C ₈₀	C ₁₀₀
1	50.00	6.00	6.0	3.8	0.4	0.1	0	0	0

2	25.00	6.00	6.0	4.5	1.4	0.5	0.2	0.1	0
3	12.50	6.00	6.0	4.1	2.7	2.1	1.5	1.2	0.9
4	50.00	4.00	6.0	3.7	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
5	25.00	4.00	6.0	4.6	1.4	0.5	0.2	0.1	0
6	12.50	4.00	6.0	4.2	2.1	1.4	1.1	0.5	0.3
7	50.00	2.00	6.0	3.8	0.2	0.1	0	0	0
8	25.00	2.00	6.0	4.3	0.5	0.3	0.1	0	0
9	12.50	2.00	6.0	4.8	1.5	1.2	0.8	0.4	0.3
CONCENTRACIÓN DE AMARILLO DE TARTRAZINA A pH=8									
Item	H ₂ O ₂ (ppm)	FLUJO (LPM)	pH	C ₀	C ₂₀	C ₄₀	C ₆₀	C ₈₀	C ₁₀₀
1	50.00	6.00	8.0	4.3	1.4	0.7	0.3	0.3	0.1
2	25.00	6.00	8.0	4.2	1.8	1.1	1.1	0.7	0.4
3	12.50	6.00	8.0	3.9	2.4	1.7	1.2	1	0.8
4	50.00	4.00	8.0	4.2	3	1.3	0.6	0.3	0.1
5	25.00	4.00	8.0	4.3	1.5	0.9	0.6	0.3	0.1
6	12.50	4.00	8.0	4.4	2.3	1.7	1.1	1	0.6
7	50.00	2.00	8.0	4.5	0.4	0.1	0	0	0
8	25.00	2.00	8.0	4.4	0.5	0.2	0.2	0.1	0
9	12.50	2.00	8.0	4.3	1.8	1.5	1.2	1	0.8

(*) C_i: Concentración de Colorante amarillo de tartrazina (ppm) a un tiempo i=0, 20, 40, 60, 80, 100 min.
Fuente: Los autores (2015)

5.1.2. Influencia de concentración de peróxido de hidrogeno (H₂O₂) en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina.

- **A concentración de H₂O₂= 12.50 ppm**

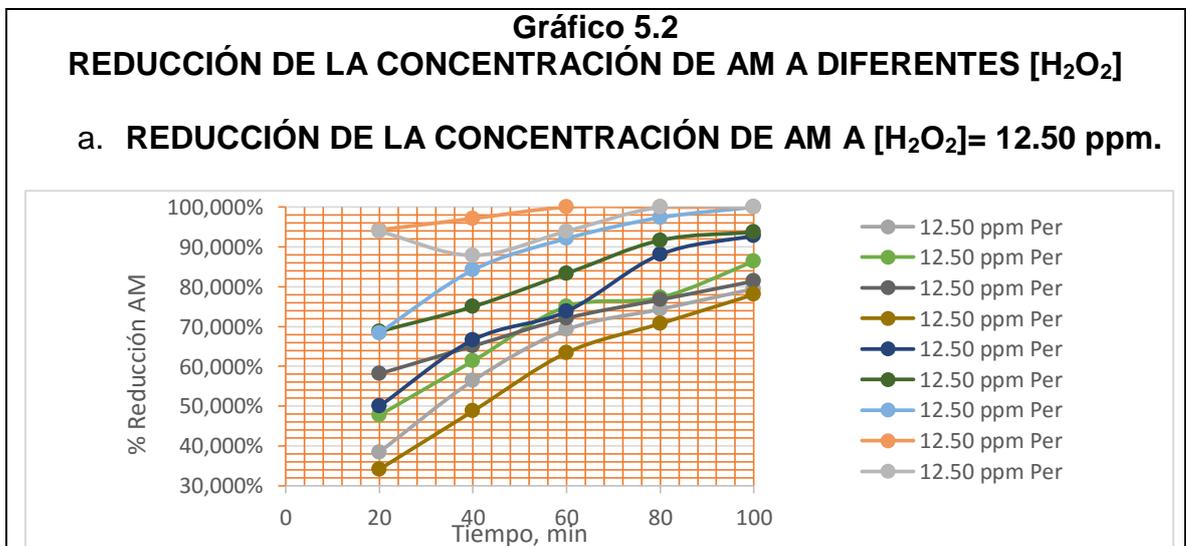
En el cuadro 5.2, en la página 94, se observa que la reducción de la concentración de AMT a los 20.00 minutos de tratamiento, es de 34.14% a un flujo volumétrico de 6.00 LPM y pH=6.00, pero a diferencia de la condición 2.00 LPM y pH=4.00 la reducción es máxima el 93.93%.en el tiempo 20.00 minutos. (véase gráfico 5.2-a, en la página 91)

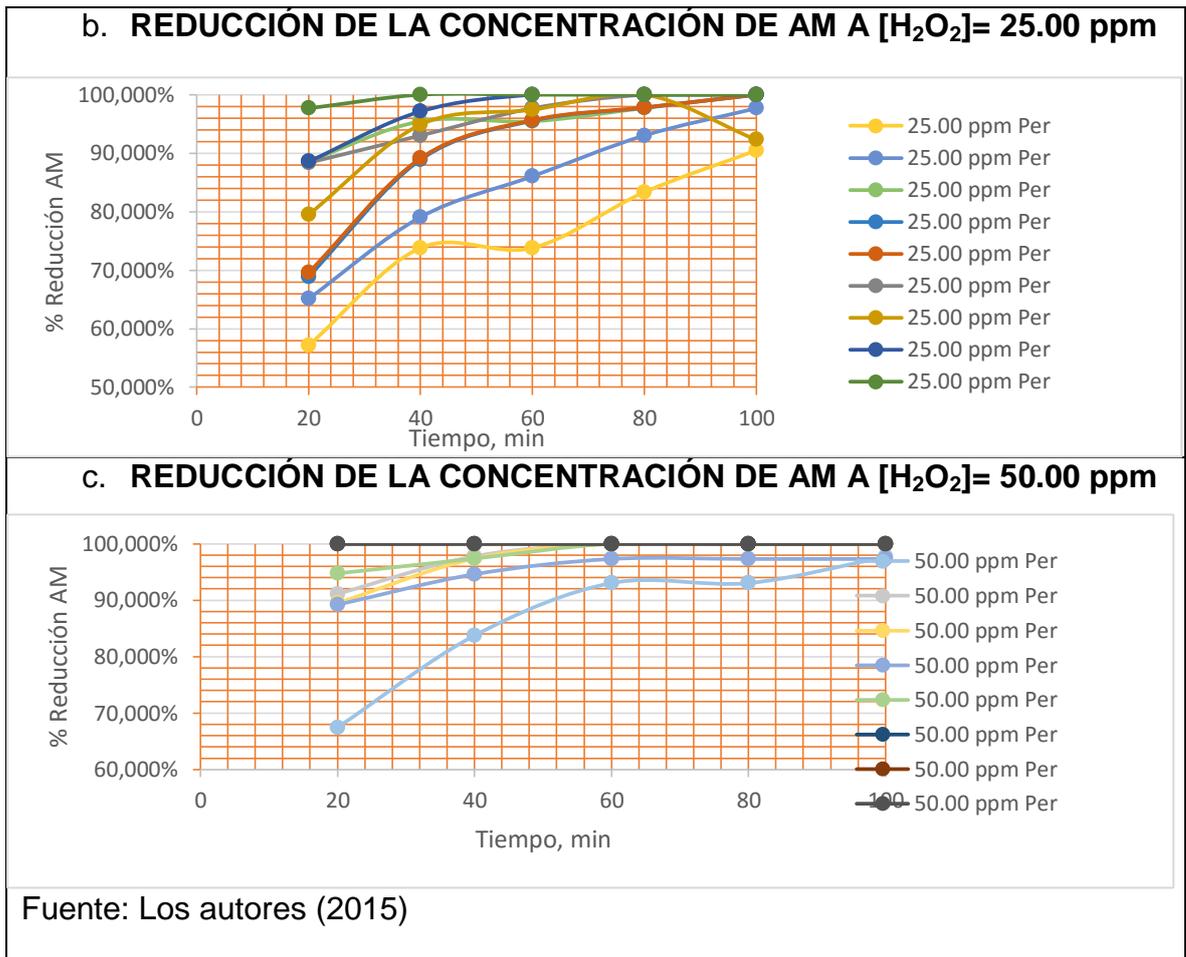
- **A concentración de H₂O₂ = 25.00 ppm**

En el cuadro 5.2, en la página 94, se observa que la reducción de la concentración de AMT a los 20.00 minutos de tratamiento,, es de 57.17% a un flujo volumétrico de 6.00 LPM y pH=8.00, pero a diferencia de la condición 2.00 LPM y pH=4.00 la reducción es máxima el 97.67%.en el tiempo 20.00 minutos. (véase gráfico 5.2-b, en la página 91).

- **A concentración de H₂O₂ = 50.00 ppm**

En el cuadro 5.2, en la página 94, se observa que la reducción de la concentración de AMT a los 20.00 minutos de tratamiento,, es de 67.44% a un flujo volumétrico de 2.00 LPM y pH=8.00, pero a diferencia de la condición 2.00 LPM y pH=4.00 la reducción es máxima el 100%.en el tiempo 20.00 minutos. (véase gráfico 5.2-c).





5.1.3. Influencia de los cambios de flujo volumétrico en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina.

- **A caudal (flujo volumétrico) = 2.00 l/min**

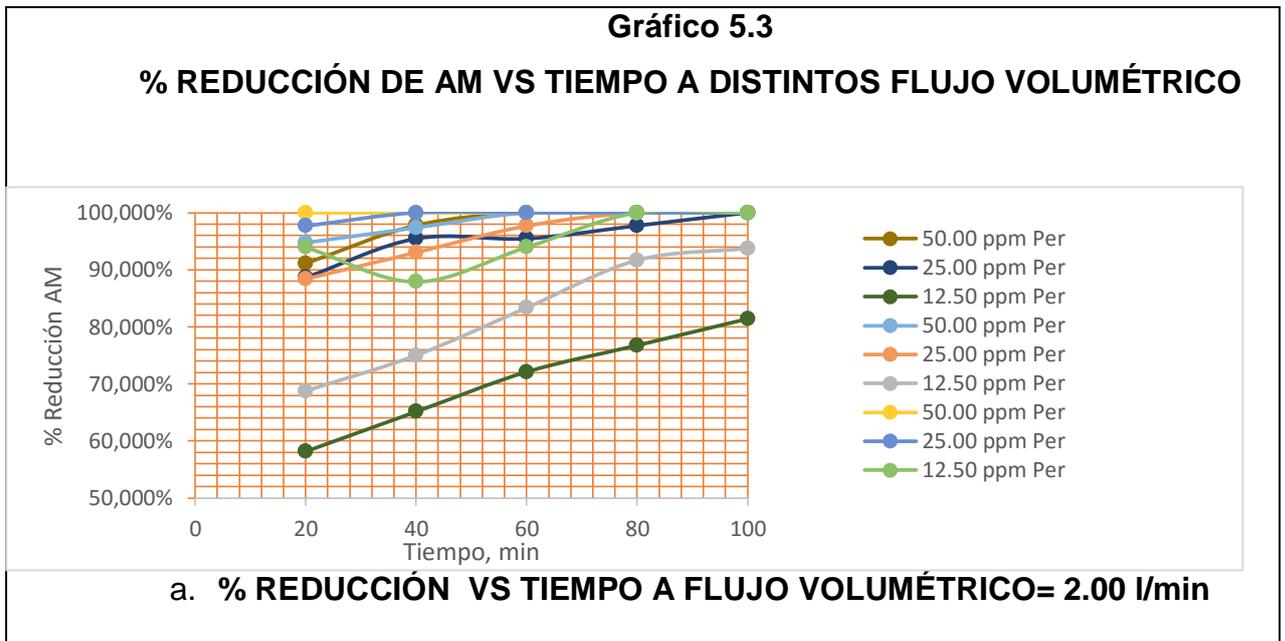
En el cuadro 5.2, en la página 94, se observa que la reducción de la concentración de amarillo de tartrazina a los 20.00 minutos de tratamiento, es de 100.00% a un pH=4 y una concentración de H₂O₂=50.00 ppm(véase gráfico 5.2-a, en la página 91)

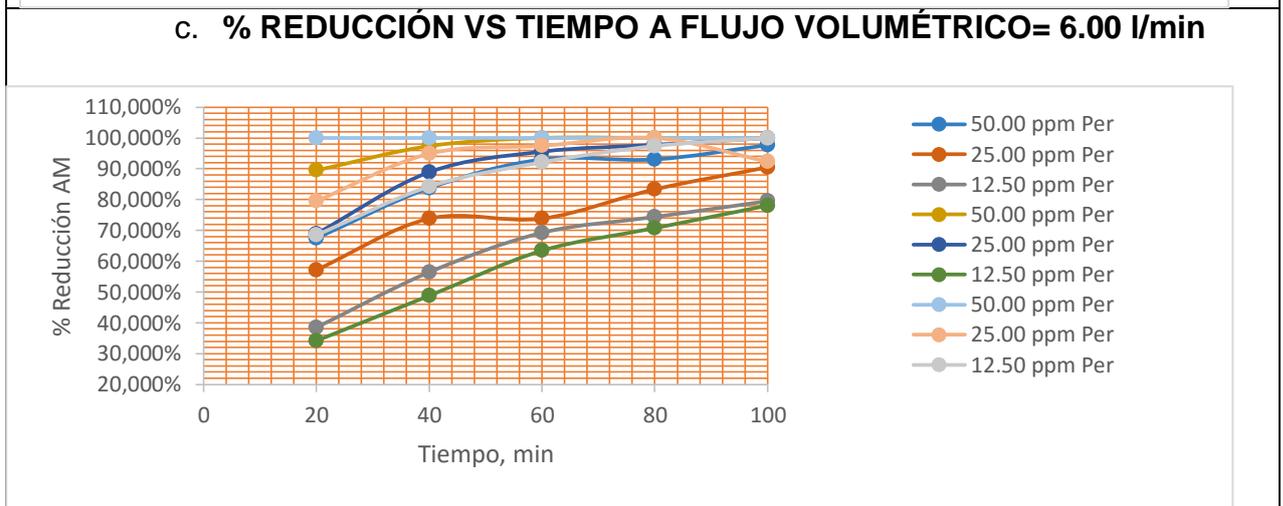
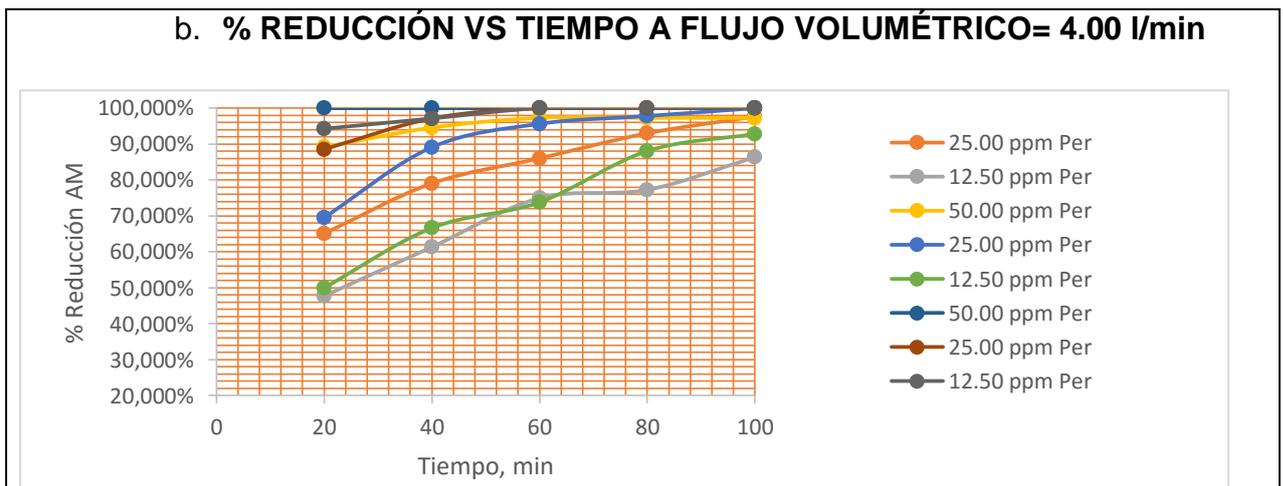
- **A caudal (flujo volumétrico) = 4.00 l/min**

En el cuadro 5.2, en la página 94,, se observa que la reducción de la concentración de amarillo de tartrazina a los 20.00 minutos de tratamiento, es de 100.00% a un pH = 4.00 y una concentración de H₂O₂=50.00 ppm. (véase gráfico 5.3-b, en la página 91)

- **A caudal (flujo volumétrico) = 6.00 l/min**

En el cuadro 5.2, en la página 94, se observa que la reducción de la concentración de amarillo de tartrazina a los 20.00 minutos de tratamiento, es de 100.00% a un pH = 4.00 y una concentración de H₂O₂=50.00 ppm. (véase gráfico 5.3-c, en la página 91)





Fuente: Los autores (2015)

5.2 Resultados Generales.

Con los datos de concentración a diferentes tiempos 20.00, 40.00, 60.00, 80.00, 100.00 min. Se calculó el porcentaje de reducción del colorante (véase Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2
PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE COLORANTE AMARILLO DE TARTRAZINA A DIFERENTES TIEMPOS DE REACCIÓN

N° Prueba	[H2O2], ppm	Q, LPM	pH	% RED 20 min	% RED 40 min	% RED 60 min	% RED 80 min	% RED 100 min
1	50	6.00	8	67.44%	83.72%	93.02%	93.02%	97.67%

2	25	6.00	8	57.14%	73.81%	73.81%	83.33%	90.48%
3	12.5	6.00	8	38.46%	56.41%	69.23%	74.36%	79.49%
4	50	4.00	8	23.81%	69.05%	85.71%	92.86%	97.62%
5	25	4.00	8	65.12%	79.07%	86.05%	93.02%	97.67%
6	12.5	4.00	8	47.73%	61.36%	75.00%	77.27%	86.36%
7	50	2.00	8	91.11%	97.78%	100.00%	100.00%	100.00%
8	25	2.00	8	88.64%	95.45%	95.45%	97.73%	100.00%
9	12.5	2.00	8	58.14%	65.12%	72.09%	76.74%	81.40%
10	50	6.00	6	89.47%	97.37%	100.00%	100.00%	100.00%
11	25	6.00	6	68.89%	88.89%	95.56%	97.78%	100.00%
12	12.5	6.00	6	34.15%	48.78%	63.41%	70.73%	78.05%
13	50	4.00	6	89.19%	94.59%	97.30%	97.30%	97.30%
14	25	4.00	6	69.57%	89.13%	95.65%	97.83%	100.00%
15	12.5	4.00	6	50.00%	66.67%	73.81%	88.10%	92.86%
16	50	2.00	6	94.74%	97.37%	100.00%	100.00%	100.00%
17	25	2.00	6	88.37%	93.02%	97.67%	100.00%	100.00%
18	12.5	2.00	6	68.75%	75.00%	83.33%	91.67%	93.75%
19	50	6.00	4	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
20	25	6.00	4	79.49%	94.87%	97.44%	100.00%	92.31%
21	12.5	6.00	4	68.42%	84.21%	92.11%	97.37%	100.00%
22	50	4.00	4	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
23	25	4.00	4	88.57%	97.14%	100.00%	100.00%	100.00%
24	12.5	4.00	4	94.29%	97.14%	100.00%	100.00%	100.00%
25	50	2.00	4	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
26	25	2.00	4	97.67%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
27	12.5	2.00	4	93.94%	87.880%	93.940%	100.00%	100.00%

Fuente: Los autores (2015)

5.3 Análisis estadístico de los resultados.

El análisis estadístico se realizó mediante el software Minitab V17 y SPSS21, primero se determinó el modelo matemático que se ajusta a los datos obtenidos para la variable respuesta (% Reducción de Colorante AMT) para cada tiempo de reacción, dicho modelo matemático tiene como variables independientes al grado de acidez (pH), flujo volumétrico (caudal), y concentración de peróxido de hidrógeno inicial, el modelo tiene

la forma de $Y=f(\text{pH}, \text{caudal}, [\text{H}_2\text{O}_2])$, con el software Minitab V17 determinamos las constantes del modelo matemático (véase cuadro 5.3, en el página 97), también se obtuvo los valores estimados por el modelo matemático, y se determinó el error relativo que se obtiene comparando los valores determinados experimentalmente y los valores estimados con el modelo matemático (véase cuadro 5.4, en el página 97).

Además elaboramos gráficos de contorno y gráficos de superficie, con los cuales determinamos visualmente las zonas donde existen máximos o mínimos (véase Gráfica 5.6, 5.7, 5.8 ,5.9, 5.10, en las páginas 101, 102, 103, 104,105).

Las interacciones de las variables se determinaron mediante el *análisis de varianza – regresión de superficie respuesta* (véase Cuadro 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, en las páginas 127, 128, 130, 131,133).

5.3.1 Determinación de los coeficientes del modelo de regresión, para el porcentaje de reducción a $t = 20, 40, 60, 80, 100.00$ min).

Con los resultados se generó la ecuación que correlaciona la variable dependiente (porcentaje de reducción de amarillo de tartrazina) y las variables independientes: Grado de acidez (pH), Flujo volumétrico (caudal en litros/minuto), Concentración de peróxido de hidrógeno $[\text{H}_2\text{O}_2]$, y para el ajuste se utilizó la regresión multivariable con el software MINITAB V17, obteniendo así los coeficientes del modelo de regresión para cada

tiempo=20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00 min. (véase cuadro 5.2, página 94).

La ecuación ajustada tiene la siguiente forma (Modelo de regresión):

$$\%Red_{(t=20,40,60,80,100\text{min})} = k1 + k2 \text{ perox} - k3 * \text{caudal} - k4 * \text{pH} - k5 * \text{perox}^2 + k6 * \text{caudal}^2 + k7 * \text{pH}^2 + k8 * \text{perox} * \text{caudal} - k9 * \text{perox} * \text{pH} - k10 * \text{caudal} * \text{pH}$$

Cuadro 5.3
COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN PARA EL
PORCENTAJE DE REDUCCIÓN

Coeficiente	%Red (t=20 min)	%Red (t=40 min)	%Red (t=60 min)	%Red (t=80 min)	%Red (t=100 min)
k1=Constante	1.426000	1.057000	1.070000	1.042000	1.035000
k2=perox	0.022000	0.022510	0.011730	0.007780	0.004730
k3=caudal	-0.187000	-0.029500	0.005200	0.011900	0.020600
k4=pH	-0.131000	-0.108800	-0.078200	-0.043000	-0.037200
k5=perox ²	-0.000293	-0.000366	-0.000241	-0.000206	-0.000148
k6=caudal ²	0.017800	0.004360	0.000000	-0.001390	-0.004230
k7=pH ²	0.007500	0.005750	0.002830	-0.000150	-0.000130
k8=Perox*Caudal	0.001160	0.000548	0.000428	0.000041	0.000362
k9=Perox*pH	-0.000400	0.000675	0.001022	0.001101	0.000913
k10=Caudal*pH	-0.006490	-0.007420	-0.005640	-0.004400	-0.001260
S	0.1380010	0.0771342	0.0585606	0.0437408	0.0427719
R-sq	74.40%	83.15%	83.21%	84.91%	74.26%
R-sq(adj)	60.84%	74.24%	74.32%	76.93%	60.63%
R-sq(pred)	34.48%	59.09%	59.56%	62.80%	33.87%

Fuente: Los autores (2015)

Cuadro 5.4

% DE REDUCCIÓN DE AMT ESTIMADO PARA CADA TIEMPO: 20.0, 40.0, 60.0, 80.0, 100.0 min

Item				%Red 20 ESTIMADO			% Red 40 min ESTIMADO			% Red 60 min ESTIMADO			% Red 80 min			% Red 100 min ESTIMADO		
N° Exp.	[H2O2], ppm	Q, LPM	pH	%Red 20 ESTIMADO	Error Absoluto	%Er	%Red 40 min ESTIMADO	Error Absoluto	%Er	%Red 60 min ESTIMADO	Error Absoluto	%Er	%Red 80 min ESTIMADO	Error Absoluto	%Er	%Red 100 Min ESTIMADO	Error Absoluto	%Er
1	50	6.00	8	62%	0.0536	8%	82%	0.0139	0%	91%	0.0230	2%	83%	0.10506	11%	98%	0.0035	0%
2	25	6.00	8	53%	0.0453	8%	73%	0.0085	0%	80%	0.0591	8%	79%	0.04272	5%	90%	0.0022	0%
3	12.5	6.00	8	34%	0.0431	11%	51%	0.0529	1%	63%	0.0630	9%	68%	0.06681	9%	79%	0.0005	0%
4	50	4.00	8	63%	0.3885	163%	86%	0.1685	2%	94%	0.0871	10%	90%	0.03307	4%	101%	0.0314	3%
5	25	4.00	8	59%	0.0612	9%	79%	0.0020	0%	86%	0.0048	1%	86%	0.06725	7%	95%	0.0287	3%
6	12.5	4.00	8	43%	0.0429	9%	59%	0.0256	0%	70%	0.0516	7%	75%	0.02257	3%	85%	0.0148	2%
7	50	2.00	8	77%	0.1363	15%	93%	0.0482	1%	98%	0.0187	2%	95%	0.04529	5%	100%	0.0011	0%
8	25	2.00	8	80%	0.0901	10%	89%	0.0638	1%	91%	0.0404	4%	92%	0.05305	5%	96%	0.0404	4%
9	12.5	2.00	8	67%	0.0882	15%	70%	0.0485	1%	77%	0.0466	6%	81%	0.04498	6%	87%	0.0556	7%
10	50	6.00	6	79%	0.1041	12%	90%	0.0722	1%	95%	0.0502	5%	86%	0.14193	14%	98%	0.0179	2%
11	25	6.00	6	68%	0.0129	2%	84%	0.0474	1%	89%	0.0646	7%	88%	0.09921	10%	95%	0.0499	5%
12	12.5	6.00	6	48%	0.1399	41%	64%	0.1521	3%	75%	0.1144	18%	79%	0.08493	12%	86%	0.0842	11%
13	50	4.00	6	77%	0.1214	14%	91%	0.0385	1%	96%	0.0087	1%	91%	0.06217	6%	100%	0.0314	3%
14	25	4.00	6	71%	0.0183	3%	87%	0.0164	0%	93%	0.0297	3%	93%	0.04493	5%	99%	0.0095	1%
15	12.5	4.00	6	55%	0.0483	10%	69%	0.0204	0%	80%	0.0570	8%	85%	0.03292	4%	91%	0.0144	2%
16	50	2.00	6	89%	0.0545	6%	95%	0.0253	0%	98%	0.0212	2%	95%	0.04759	5%	99%	0.0071	1%
17	25	2.00	6	89%	0.0105	1%	94%	0.0130	0%	96%	0.0140	1%	98%	0.02303	2%	100%	0.0029	0%
18	12.5	2.00	6	76%	0.0700	10%	77%	0.0191	0%	84%	0.0084	1%	89%	0.02397	3%	93%	0.0077	1%
19	50	6.00	4	102%	0.0205	2%	103%	0.0256	1%	102%	0.0151	2%	89%	0.11023	11%	98%	0.0171	2%
20	25	6.00	4	89%	0.0910	11%	100%	0.0507	1%	101%	0.0330	3%	97%	0.03469	3%	100%	0.0735	8%
21	12.5	6.00	4	68%	0.0030	0%	81%	0.0274	1%	89%	0.0306	3%	91%	0.06716	7%	93%	0.0660	7%
22	50	4.00	4	97%	0.0255	3%	100%	0.0019	0%	101%	0.0070	1%	92%	0.07510	8%	100%	0.0002	0%
23	25	4.00	4	90%	0.0121	1%	100%	0.0317	1%	102%	0.0207	2%	100%	0.00248	0%	103%	0.0319	3%
24	12.5	4.00	4	72%	0.2207	23%	83%	0.1393	3%	91%	0.0855	9%	94%	0.05529	6%	98%	0.0216	2%
25	50	2.00	4	107%	0.0708	7%	101%	0.0132	0%	100%	0.0010	0%	95%	0.05109	5%	98%	0.0164	2%
26	25	2.00	4	105%	0.0754	8%	104%	0.0418	1%	103%	0.0340	3%	103%	0.02853	3%	103%	0.0335	3%
27	12.5	2.00	4	91%	0.0339	4%	88%	0.0057	0%	94%	0.0009	0%	97%	0.02823	3%	99%	0.0110	1%
				En Promedio	15.0%		En Promedio	1.0%		En Promedio	4.0%		En Promedio	6.0%		En Promedio	3.0%	

Fuente_ Los autores (2015)

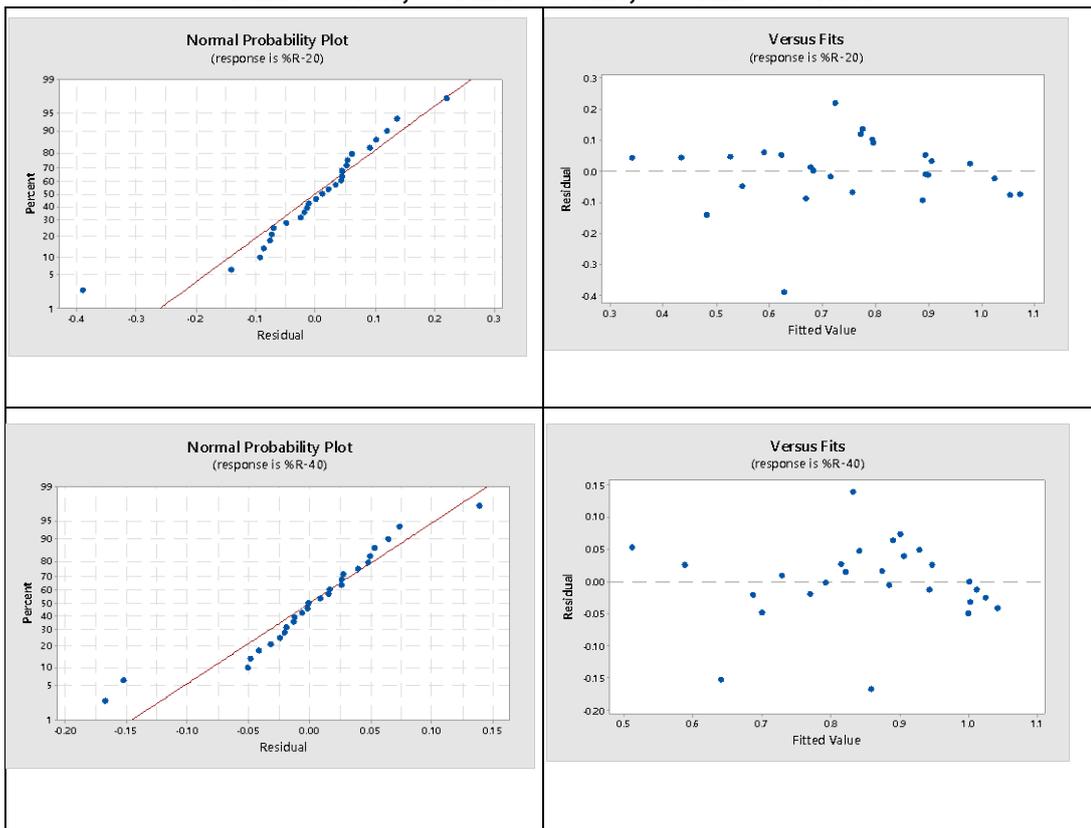
5.3.2 Determinación de los parámetros estadísticos a diferentes tiempos.

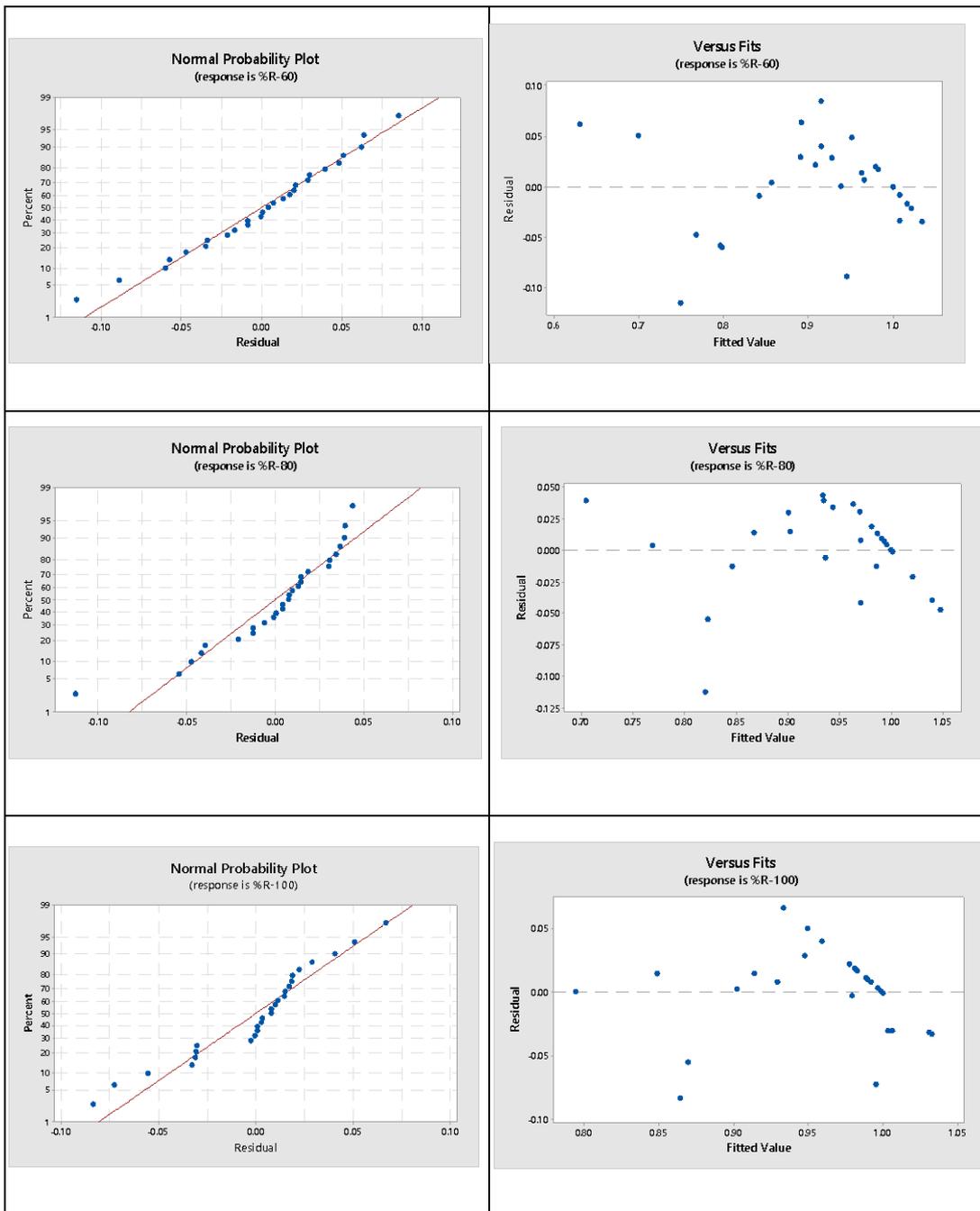
Ahora con las ecuaciones de regresión (véase Cuadro 5.3, en la página 96, estimamos el porcentaje de reducción para cada tiempo y a diferentes condiciones de pH, $[H_2O_2]$ y Caudal), (véase Cuadro 5.2, en la página 94)

5.3.3 Determinación de probabilidad normal de las respuestas.

Con la ecuación de regresión se calculó los residuales para ver la normalidad de las respuestas y los valores atípicos (véase los gráficos 5.4 y 5.5, en las páginas 98 -100).

Gráfico 5.4
PROBABILIDAD NORMAL PARA % RED-20min, % RED-40min, % RED-60min, % RED-80min, % RED-100min





Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.5
PROBABILIDAD NORMAL PARA % RED-20.00min, % RED-40.00min,
% RED-60.00min, % RED-80.00min, % RED-100.00min

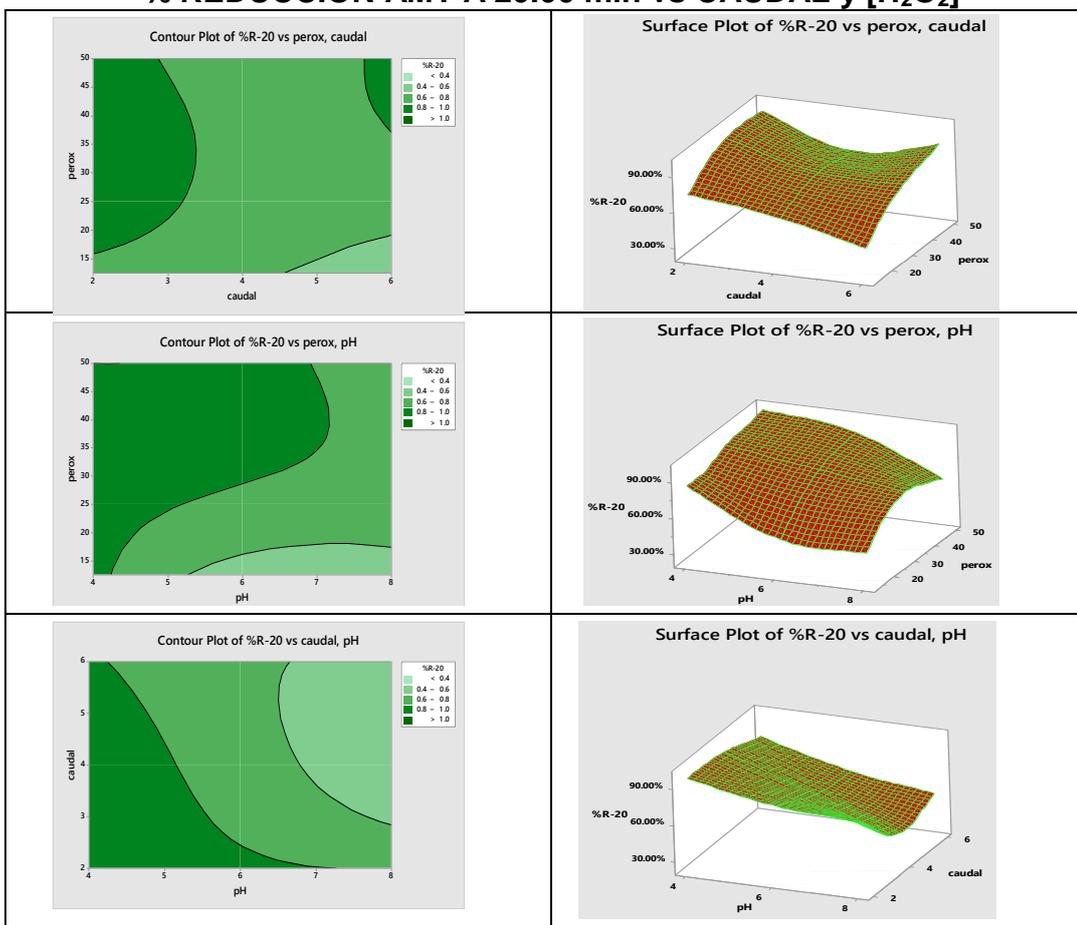


Fuente: Los autores (2015)

5.3.4 Determinación de gráfico de contorno y gráfico de superficie para el pH, Caudal, Concentración de peróxido.

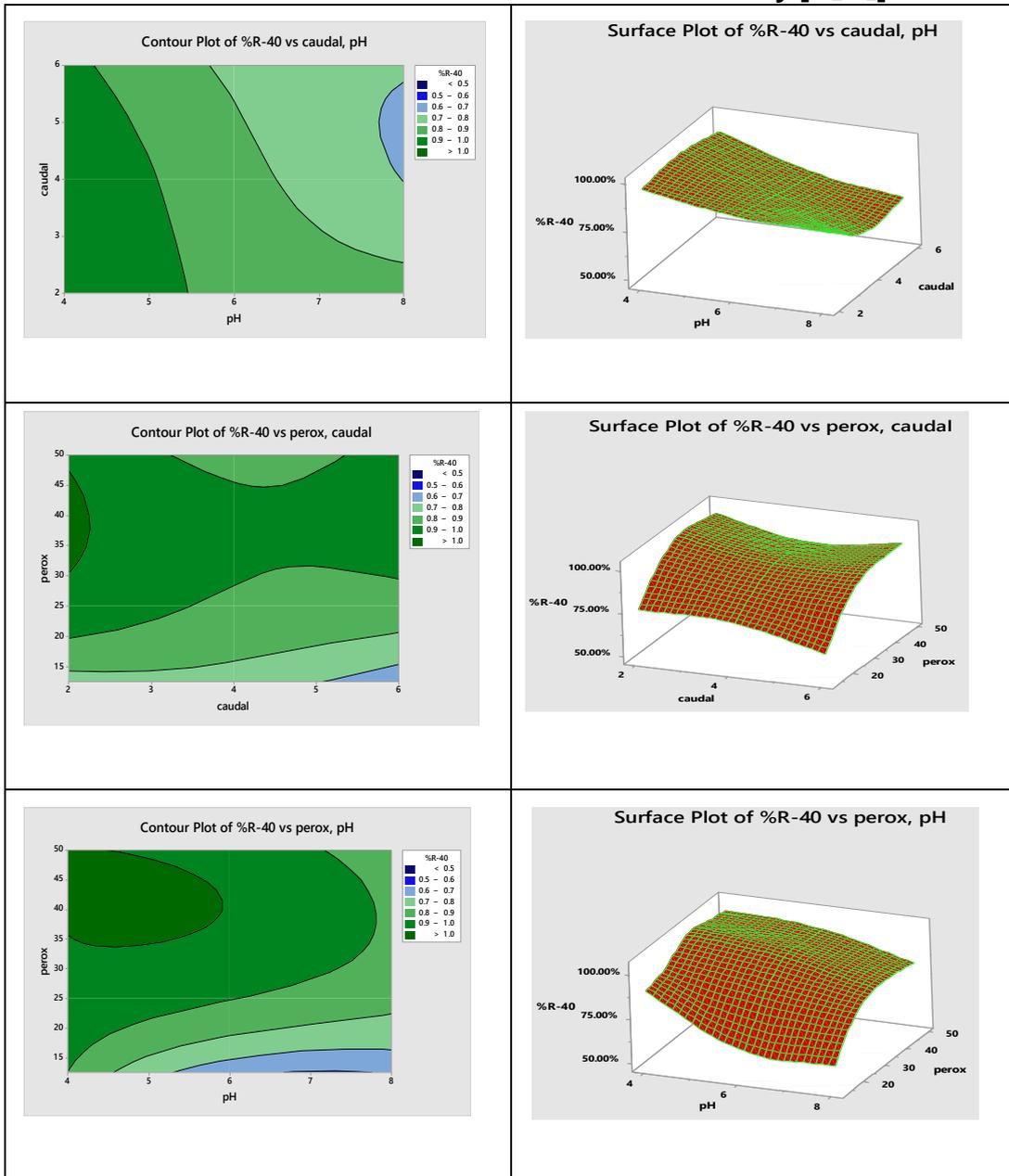
Para analizar las interacciones se usó el software MINITAB V17. Se elaboró gráficos para el porcentaje de reducción AMT Vs Caudal, pH, [H₂O₂] a tiempo 20.00, 40.00 y 60.00, 80.00 y 100.00 min (véase Gráfico 5.6, 5.7, 5.8 ,5.9, 5.10, en las páginas 101 a 105).

Gráfico 5.6
% REDUCCIÓN AMT A 20.00 min vs CAUDAL y [H₂O₂]



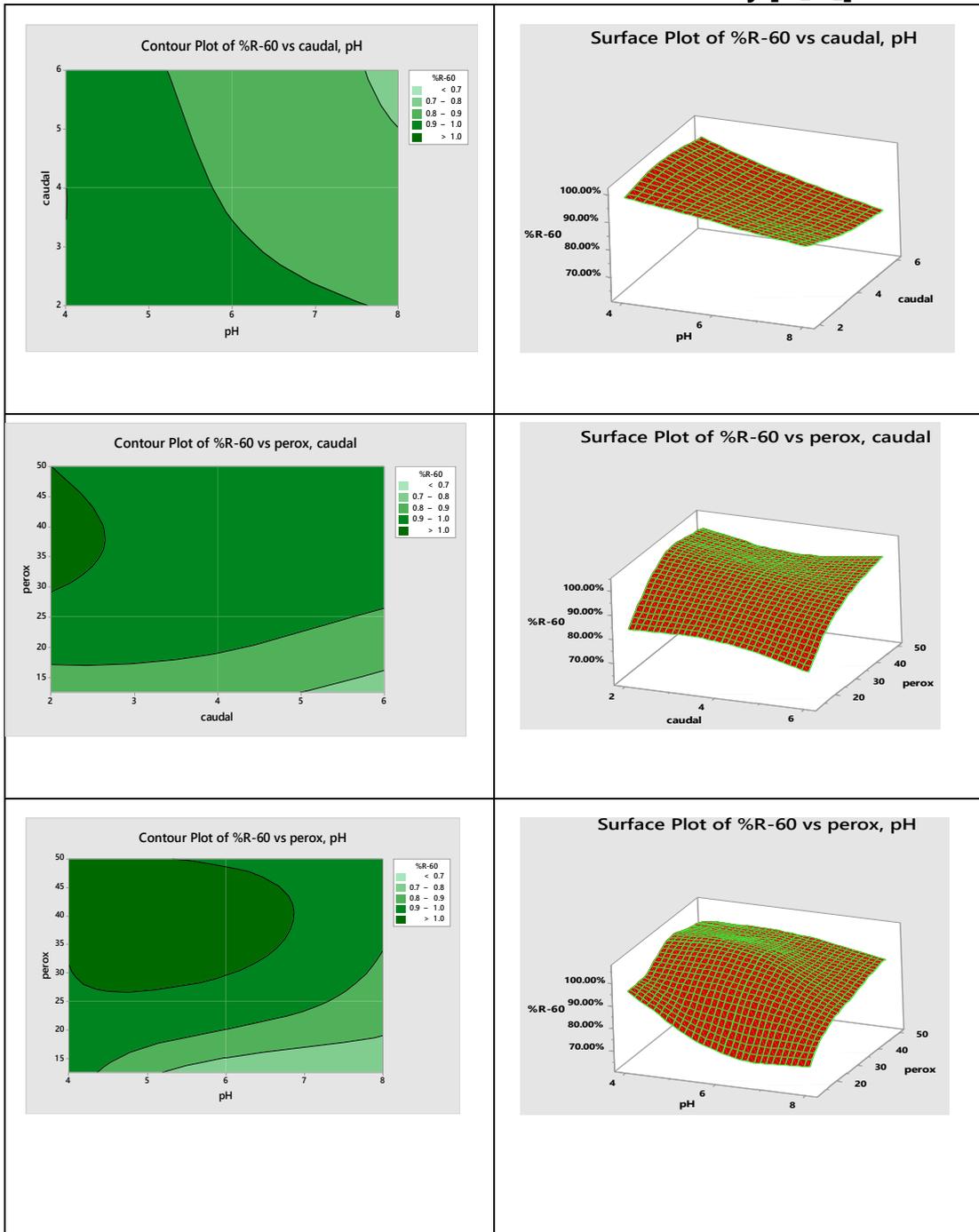
Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.7
% REDUCCIÓN AMT A 40.00min vs CAUDAL y [H₂O₂]



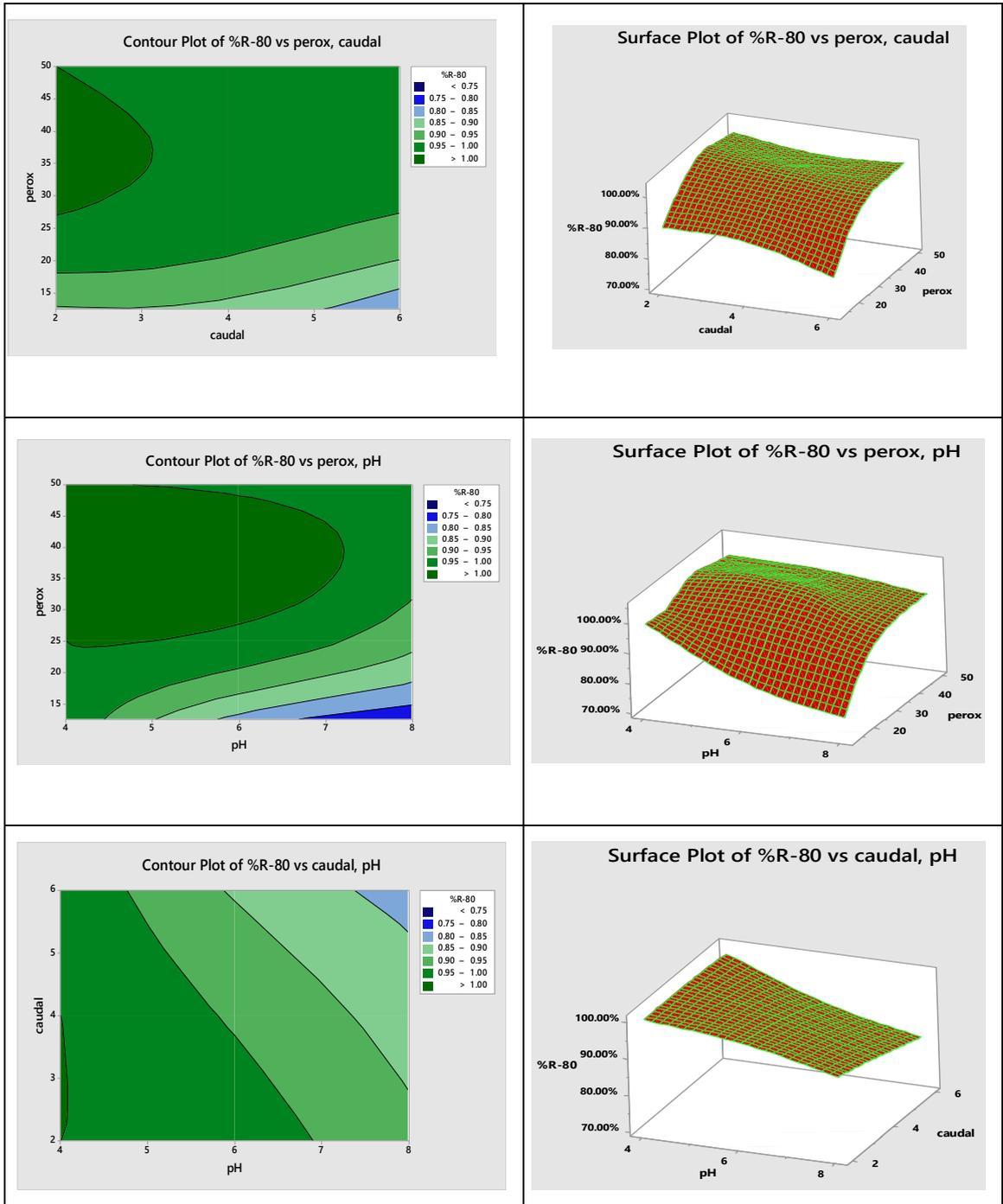
Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.8
% REDUCCIÓN AMT A 60.00 min vs CAUDAL y [H₂O₂]



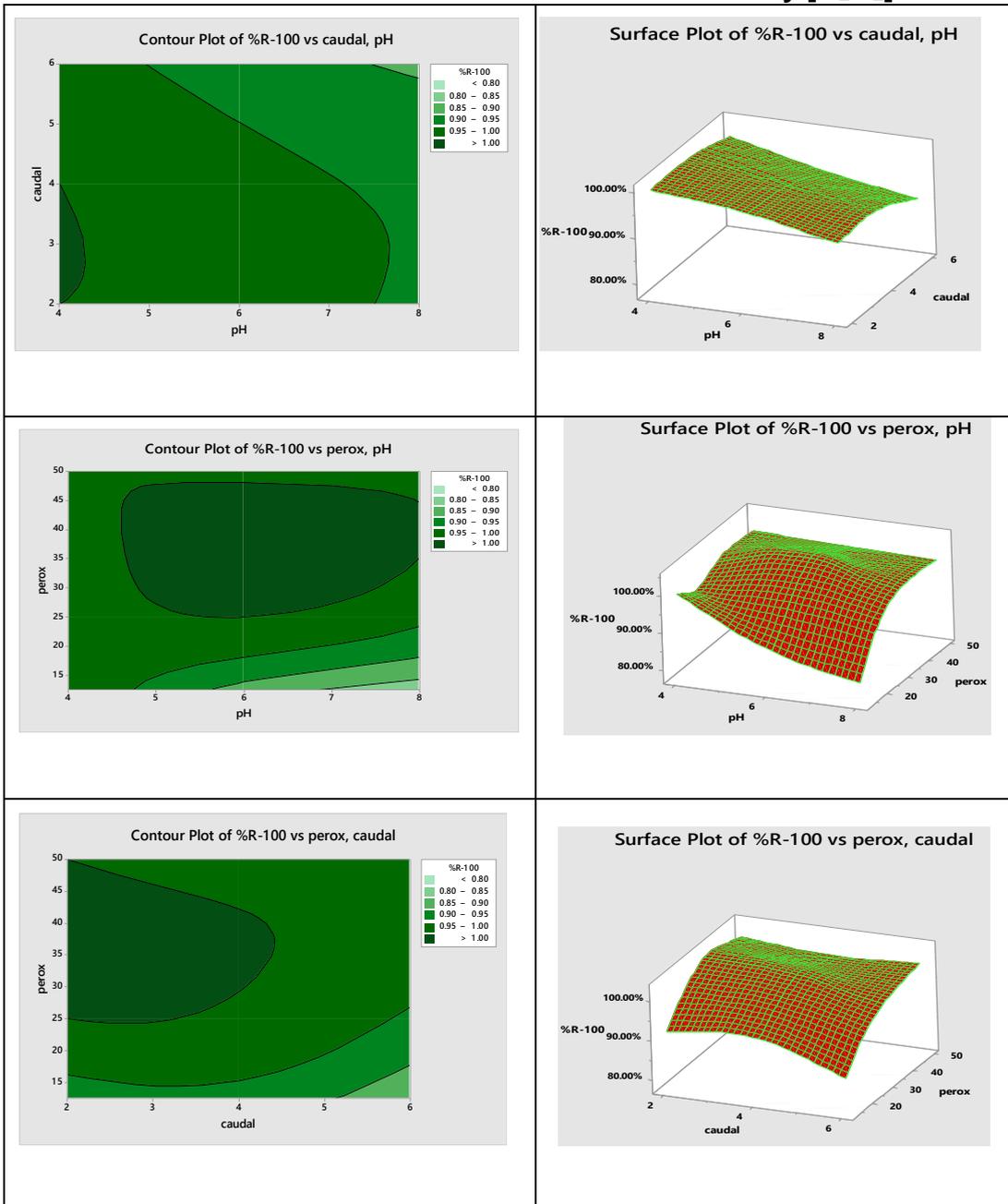
Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.9
% REDUCCIÓN AMT A 80.00 min vs CAUDAL y [H₂O₂]



Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.10
% REDUCCIÓN AMT A 100.00 min vs CAUDAL y [H₂O₂]



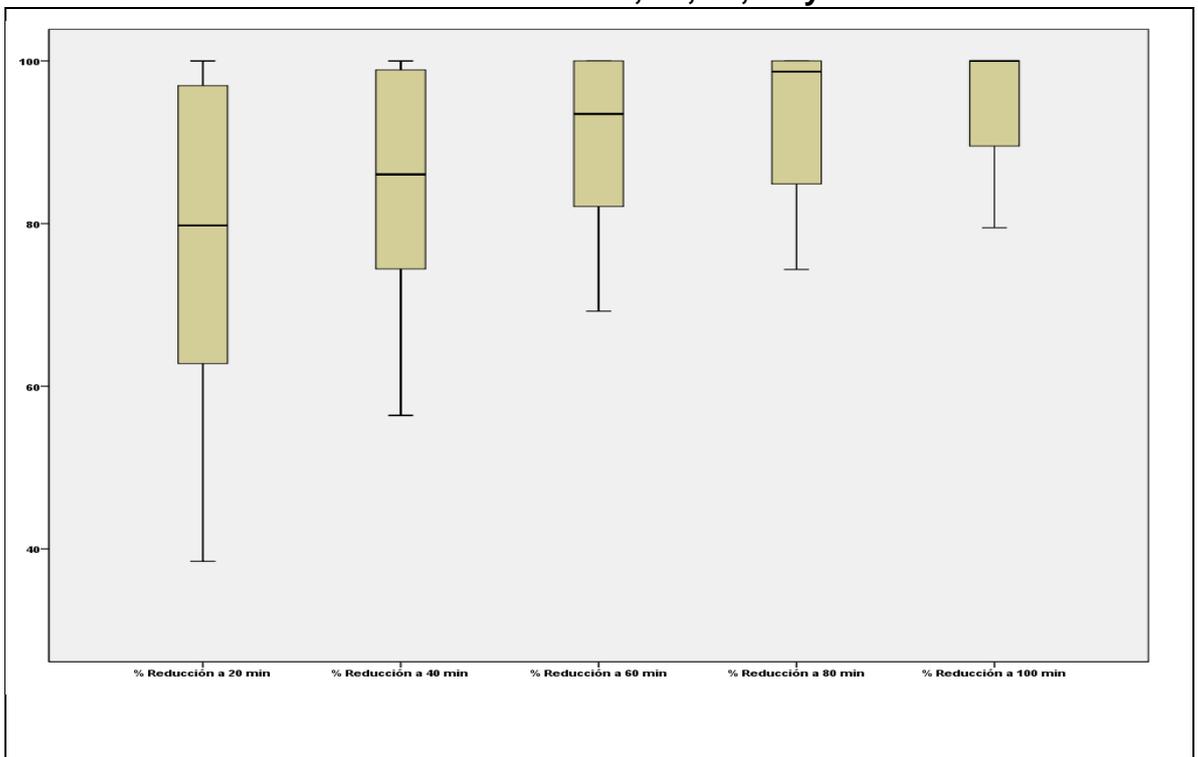
Fuente: Los autores (2015)

5.3.5 Diagrama de caja para variable respuesta (% Reducción amarillo de tartrazina)

Otro gráfico muy ilustrativo y usado para determinar el efecto de las variables de respuesta es el diagrama de Caja (véase Gráfico 5.11; 5.12; 5.13, 5.14 en las páginas 106, 107, 108,109)

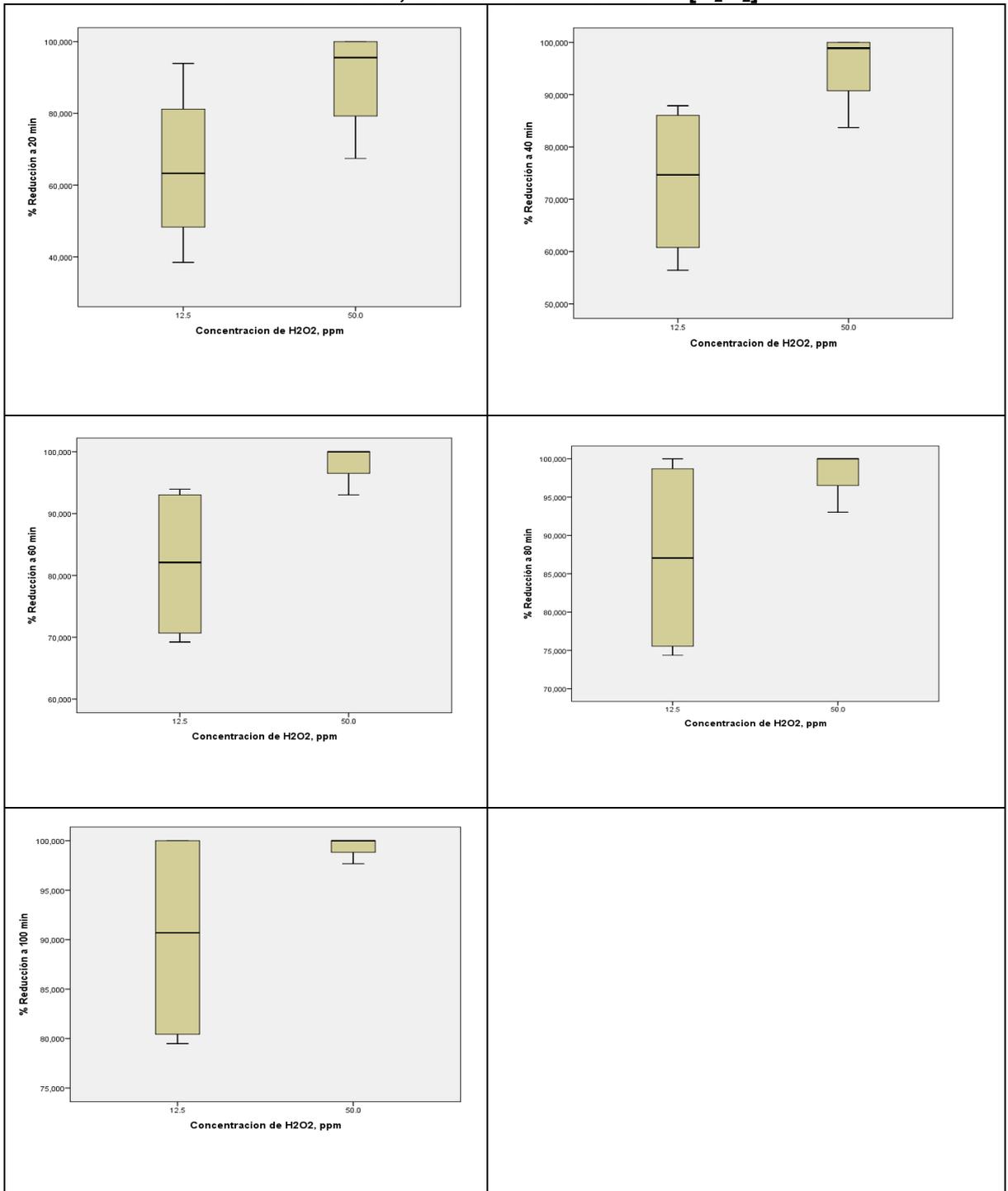
La reducción de la concentración se acerca al 100% a los 100 minutos de reacción.

Gráfico 5.11
CAJA BIGOTE A LOS TIEMPOS 20, 40, 60, 80 y 100.00 min



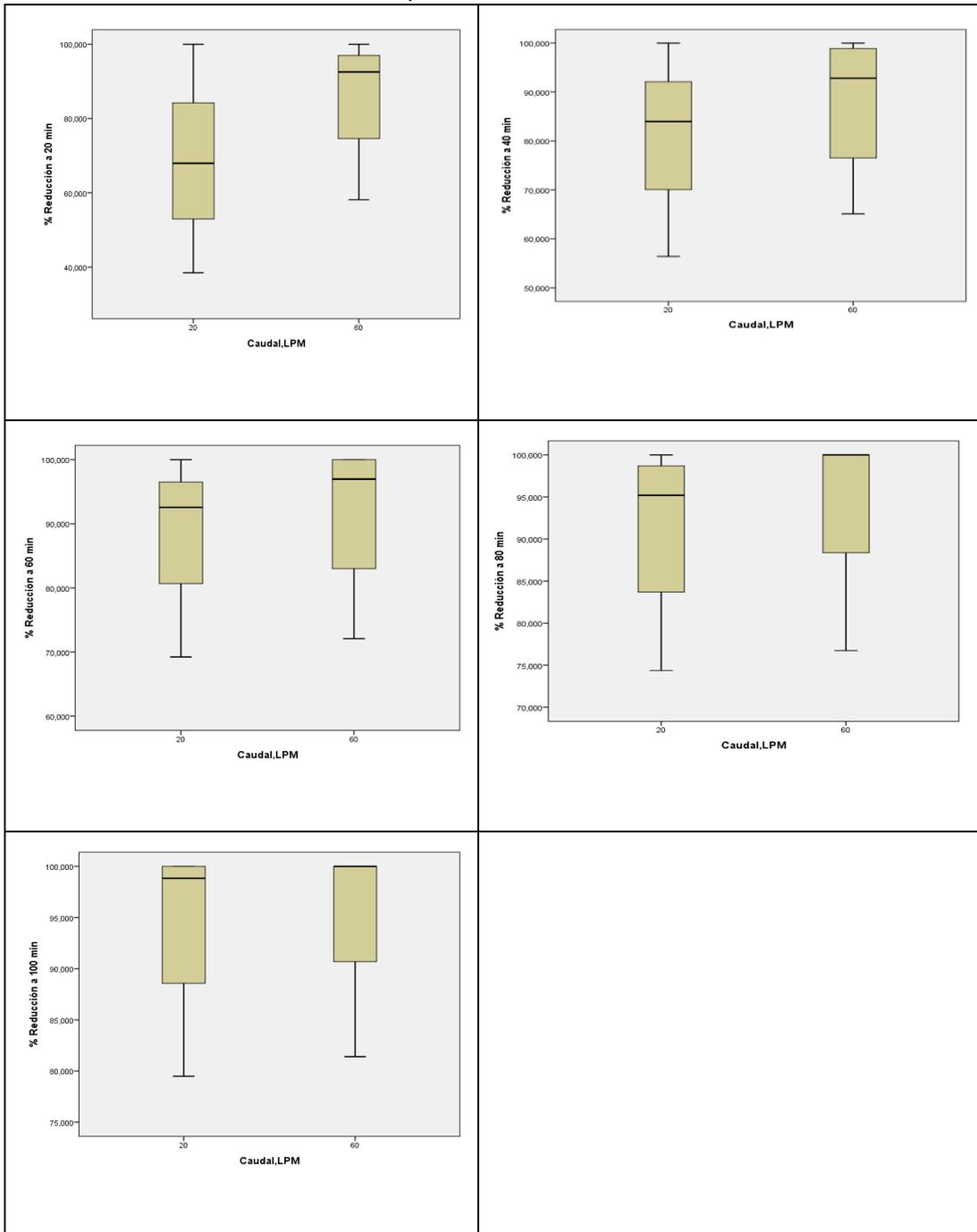
Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.12
DIAGRAMA DE CAJA, % REDUCCIÓN AMT vs [H₂O₂]



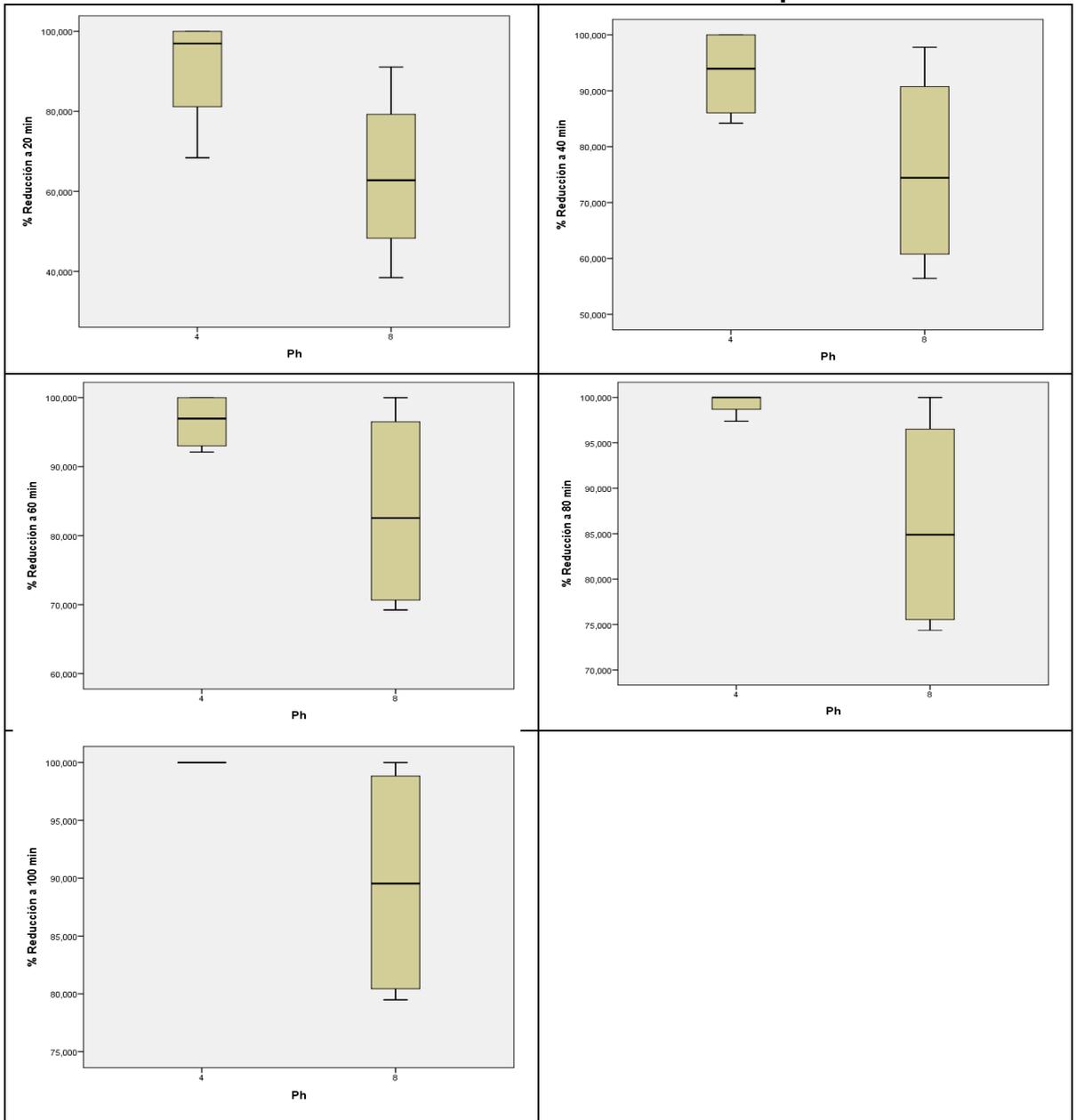
Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.13
DIAGRAMA DE CAJA, % REDUCCIÓN AMT vs CAUDAL



Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.14
DIAGRAMA DE CAJA % REDUCCIÓN AMT vs pH.



Fuente: Los autores (2015)

5.4 Determinación de la constante de velocidad de reacción a diferente pH, concentración de H₂O₂ y caudal.

Se determinó la constante cinética de velocidad para las 27 pruebas experimentales (véase Cuadro 5.5, en la página 113).

La constante de velocidad de reacción aumenta desde condiciones menos severas como son el pH próximo a 8.00 y flujo volumétrico próximos a 6.00 litros/min y concentración de $[H_2O_2]_{inicial}=12.5$ ppm, hasta condiciones más drásticas es decir pH próximo a 4.00 , flujo volumétrico próximos a 2 litros/min y concentración de $[H_2O_2]_{inicial}=50.00$ ppm; y se hace indeterminado a condiciones drásticas a tiempos menores o iguales a 20 minutos de reacción y a los 100 minutos de reacción la concentración de colorante a la salida del foto-reactor tubular anular es igual 0.00 ppm esto fue corroborado con la medida de la absorbancia (véase Figura 10.2, 10.3, 10.4, en las páginas 161, 162, 163).

Considerando una cinética de *pseudo-primer orden* en el gráfico 5.15, en la página 113.

A pH = 8.00 y Q=6.00 l/min. (Véase gráfico 5.15 a, en la página 113).

A las $[H_2O_2]_{inicial}$ de 12.50, 25.00 y 50.00 ppm La constante de velocidad es igual a 0.0156 min^{-1} , 0.0208 min^{-1} y 0.0347 min^{-1} respectivamente.

A pH = 8.00 y Q=4.00 l/min. (Véase gráfico 5.15 b, en la página 113).

A $[H_2O_2]_{inicial}$ de 12.50, 25.00 y 50.00 ppm La constante de velocidad es igual a 0.0184 min^{-1} , 0.0343 min^{-1} y 0.0377 min^{-1} respectivamente.

A pH = 6.00 y Q=6.00 l/min. (Véase gráfico 5.16 a, en la página 114).

A las concentraciones de peróxido de 12.50, 25.00 y 50.00 ppm La constante de velocidad es igual a 0.0148 min^{-1} , 0.0478 min^{-1} y 0.0909 min^{-1} respectivamente.

A pH = 6.00 y Q=4.00 l/min. (Véase gráfico 5.16 a, en la página 114).

A las concentraciones de peróxido de 12.50, 25.00 y 50.00 ppm La constante de velocidad es igual a 0.0327 min^{-1} , 0.048 min^{-1} y 0.0253 min^{-1} respectivamente.

A pH = 6.00 y Q=2.00 l/min. (Véase gráfico 5.16 c, en la página 114).

A las concentraciones de peróxido de 12.50, 25.00 y 50.00 ppm La constante de velocidad es igual a 0.0326 min^{-1} , 0.059 min^{-1} y 0.0909 min^{-1} respectivamente.

A pH = 4.00 y Q=6.00 l/min. (Véase gráfico 5.17a, en la página 115).

A las concentraciones de peróxido de 12.50 y 25.00 ppm la constante de velocidad es igual a 0.043 min^{-1} y 0.061 min^{-1} respectivamente.

A pH = 4.00 y Q=4.00 l/min. (Véase gráfico 5.17 b, en la página 115).

A las concentraciones de peróxido de 12.50 y 25.00 ppm la constante de velocidad es igual a 0.0619 min^{-1} , 0.0433 min^{-1} respectivamente.

Cuadro 5.5
CONSTANTE DE VELOCIDAD DE REACCIÓN A DIFERENTE PH,
CONCENTRACIÓN DE H₂O₂ Y CAUDAL.

	H ₂ O ₂ , ppm	Caudal, LPM	pH	Cinética
<i>Exp.</i>	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>K_{obs}</i> , 1/min
1	50.00	6.00	8.0	0.035
2	25.00	6.00	8.0	0.021
3	12.50	6.00	8.0	0.016
4	50.00	4.00	8.0	0.038
5	25.00	4.00	8.0	0.034
6	12.50	4.00	8.0	0.018
7	50.00	2.00	8.0	0.095
8	25.00	2.00	8.0	0.042
9	12.50	2.00	8.0	0.015
10	50.00	6.00	6.0	0.091
11	25.00	6.00	6.0	0.048
12	12.50	6.00	6.0	0.015
13	50.00	4.00	6.0	0.033
14	25.00	4.00	6.0	0.048
15	12.50	4.00	6.0	0.025
16	50.00	2.00	6.0	0.091
17	25.00	2.00	6.0	0.059
18	12.50	2.00	6.0	0.026
19	50.00	6.00	4.0	α*
20	25.00	6.00	4.0	0.026
21	12.50	6.00	4.0	0.043
22	50.00	4.00	4.0	α*
23	25.00	4.00	4.0	0.089
24	12.50	4.00	4.0	0.089
25	50.00	2.00	4.0	α*
26	25.00	2.00	4.0	0.188
27	12.50	2.00	4.0	0.039

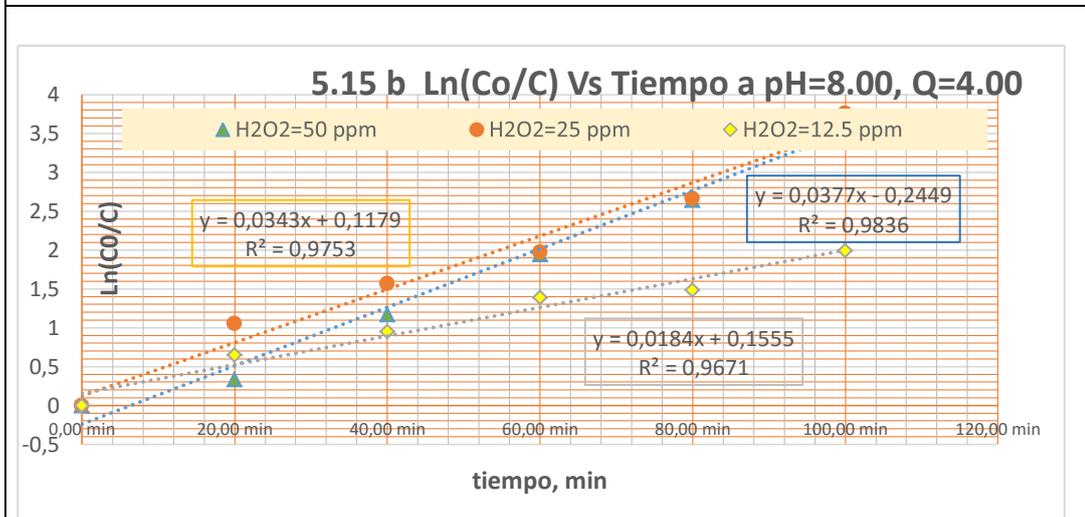
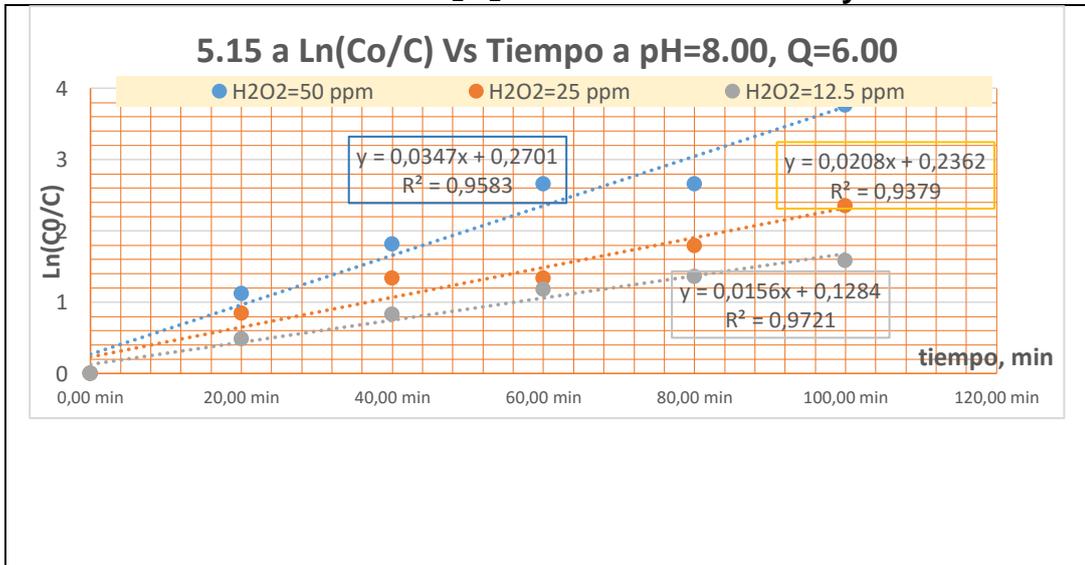
(*) α, indeterminado

	H ₂ O ₂ , ppm	Caudal, LPM	pH	Cinética
<i>Exp.</i>	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>K_{obs}</i> , 1/min
12	12.50	6.00	6.00	0.015
9	12.50	2.00	8.00	0.015
3	12.50	6.00	8.00	0.016
6	12.50	4.00	8.00	0.018
2	25.00	6.00	8.00	0.021
15	12.50	4.00	6.00	0.025
18	12.50	2.00	6.00	0.026
13	50.00	4.00	6.00	0.033
5	25.00	4.00	8.00	0.034
1	50.00	6.00	8.00	0.035
4	50.00	4.00	8.00	0.038
27	12.5	2.00	4.00	0.039
8	25.00	2.00	8.00	0.042
21	12.5	6.00	4.00	0.043
11	25	6.00	6.00	0.048
14	25	4.00	6.00	0.048
17	25	2.00	6.00	0.059
20	25	6.00	4.00	0.062
23	25	4.00	4.00	0.089
24	12.5	4.00	4.00	0.089
10	50	6.00	6.00	0.091
16	50	2.00	6.00	0.091
7	50.00	2.00	8.00	0.095
26	25	2.00	4.00	0.188
19	50	6.00	4.00	α
22	50	4.00	4.00	α
25	50	2.00	4.00	α

x1= [H₂O₂, ppm] ; x2=Caudal, LPM ; x3=pH

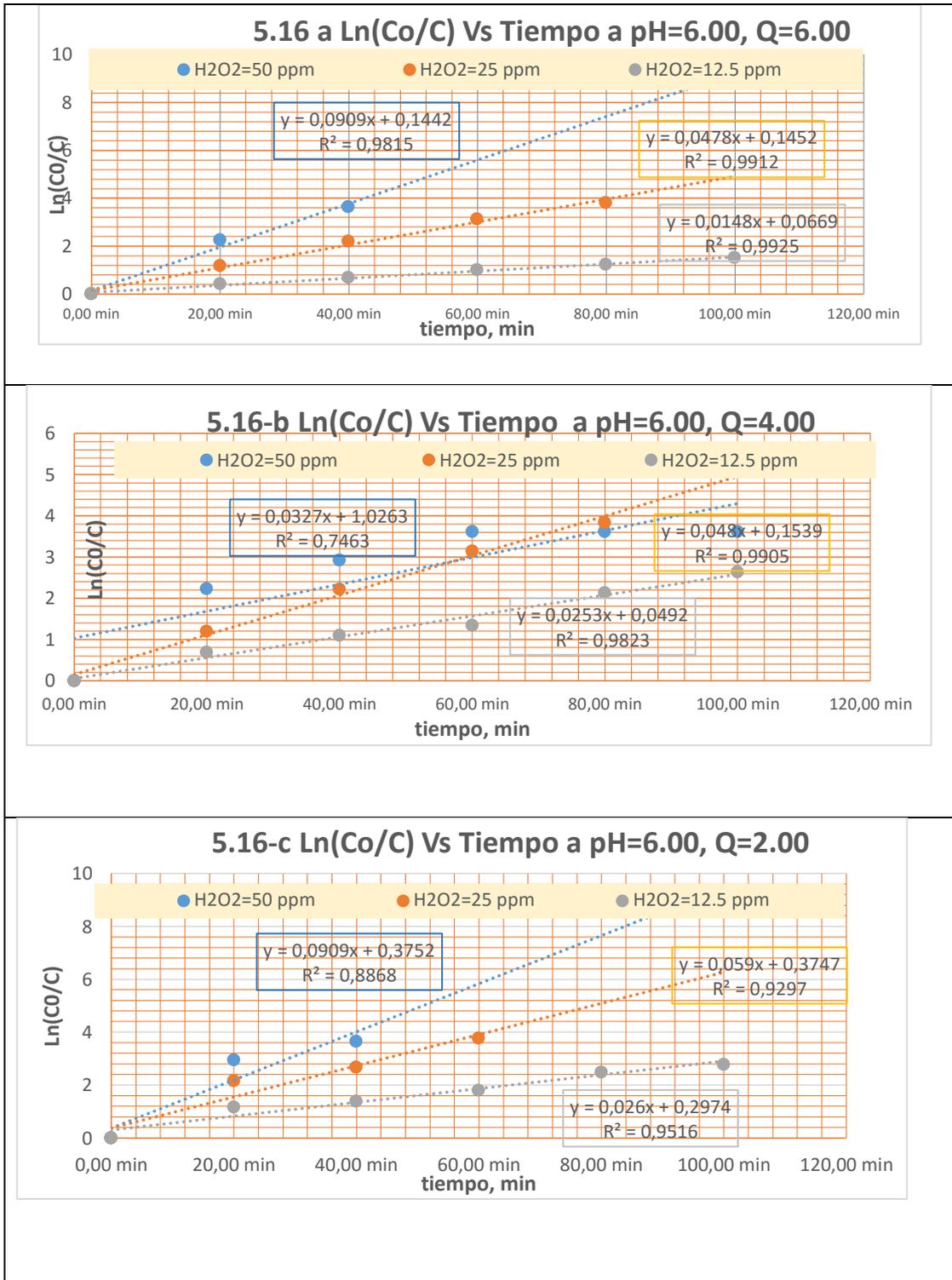
Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.15
GRÁFICO DE VELOCIDAD DE REACCIÓN A pH=8.00,
CONCENTRACIÓN DE H₂O₂ Y CAUDAL 4.00 l/min y 6.00 l/min.



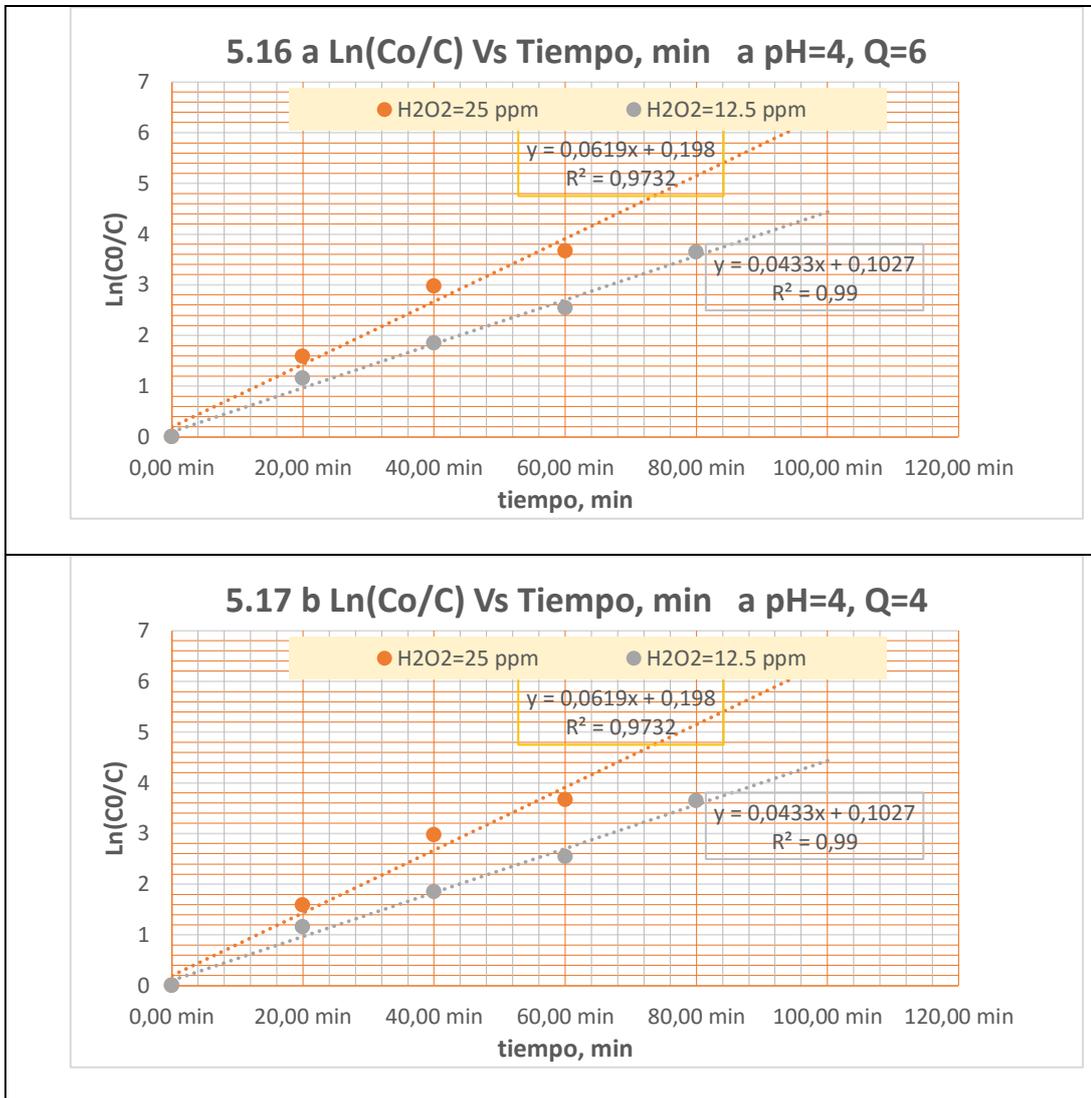
Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.16
GRÁFICO DE VELOCIDAD DE REACCIÓN A pH=6, CONCENTRACIÓN DE H₂O₂ Y CAUDAL 6.00 l/min, 4.00 y 2.00 l/min.



Fuente: Los autores (2015)

Gráfico 5.17
GRÁFICO DE VELOCIDAD DE REACCIÓN A pH=4.00,
CONCENTRACIÓN DE H₂O₂ Y CAUDAL 6.00 l/min y 4.00 l/min.



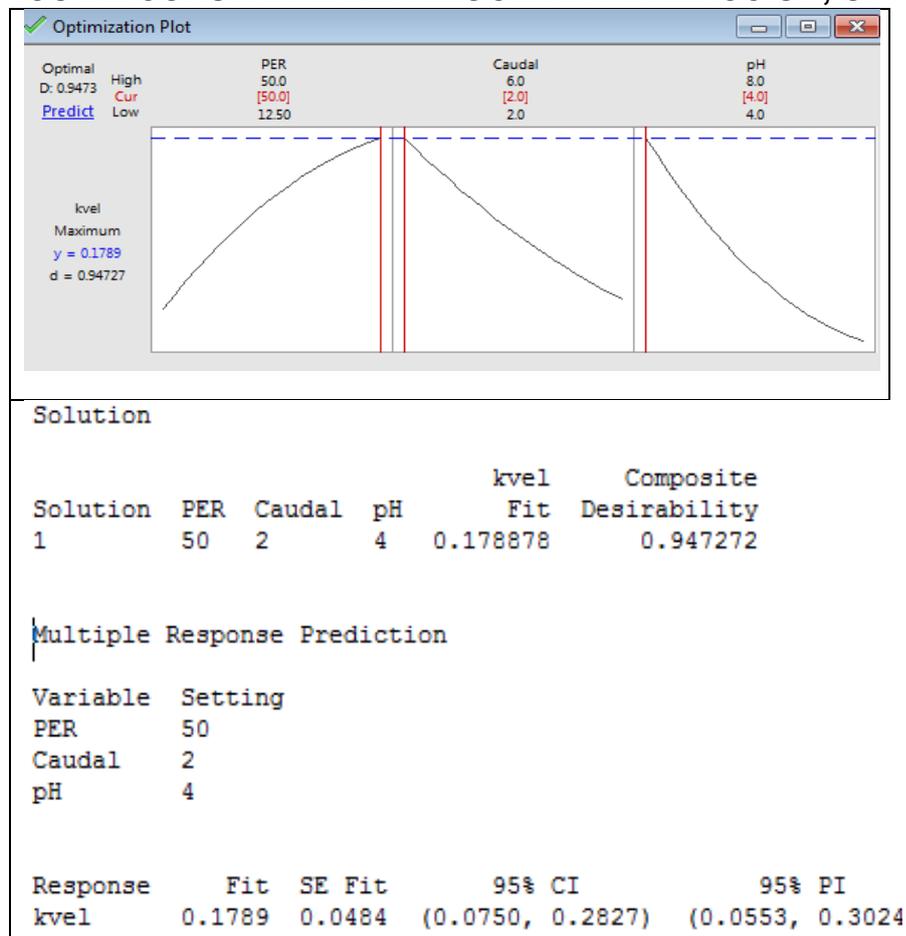
Fuente: Los autores (2015)

5.5.1 Determinación de la constante de velocidad óptima.

Se determinó la constante cinética óptima para las 27 pruebas experimentales (véase el gráfico 5.18).

La constante de velocidad óptima para nuestro caso será la máxima velocidad posible que podemos obtener, mediante el software Minitab V17 este valor fue de 0.1789 min^{-1} a las condiciones de 50.00 ppm de $[\text{H}_2\text{O}_2]$ inicial, $\text{pH}=4.0$ y caudal= 2.0 l/min .

Gráfico 5.18
GRÁFICO DE CONSTANTE DE VELOCIDAD DE REACCIÓN, ÓPTIMA.



Fuente: Los autores (2015)

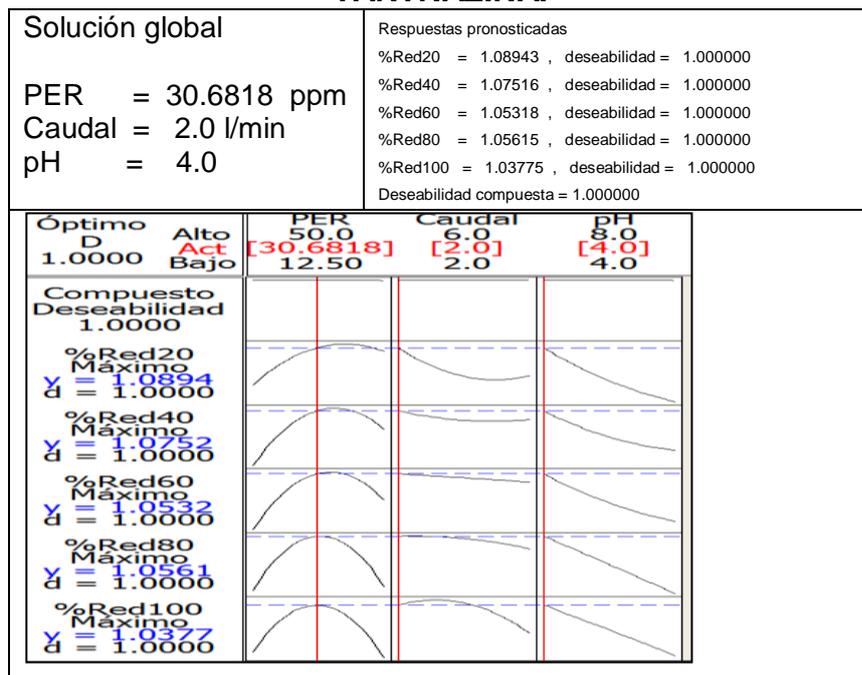
5.6 Condiciones óptimas para la reducción de amarillo de tartrazina.

Se determinó las condiciones óptima para las 27 pruebas experimentales (véase el gráfico 5.19).

Mediante los gráficos de contorno y gráficos de superficie verificamos la existencia de picos para la reducción de colorante AMT a diferente condiciones de pH, caudal, y concentración de $[H_2O_2]_{inicial}$, este punto máximo lo determinamos con Minitab V17 (véase Gráfico 5.6, 5.7, 5.8 ,5.9, 5.10, en las páginas 101 a 105).

Las condiciones óptimas para lograr la máxima reducción de colorante AM son 30.6818 ppm de $[H_2O_2]$ inicial, pH=4.0 y caudal=2.0 l/min

**Gráfico 5.19
CONDICIONES ÓPTIMAS PARA LA REDUCCIÓN DE AMARILLO DE
TARTRAZINA.**



Fuente: Los autores (2015).

VI. DISCUSION DE RESULTADOS.

En la evaluación estadística se usó la prueba **p-value**, donde la hipótesis nula se rechaza si el **valor-p** (asociado al resultado observado) **es igual o menor que el nivel de significación establecido**.

En la presente investigación se trabajó con un nivel de significancia de 0.05.

6.1 Contrastación de la hipótesis con los resultados.

- **Contrastación de la Hipótesis General**

H_{a_G} : Se reduce la concentración del colorante amarillo de tartrazina de la muestra experimental, mediante tratamiento en un foto-reactor UV- H_2O_2 .

$H_{a_G} \neq 0$

H_{0_G} : No reduce la concentración del colorante amarillo de tartrazina de la muestra experimental, mediante tratamiento en un foto-reactor UV- H_2O_2 .

$H_{0_G} = 0$.

Se aceptan las hipótesis alternas (H_{a_e}) a 20, 40, 60, 80,100 min (**H_{a_G}**) debido a que los valores de p-value están por debajo de la significancia establecida 0.05.:

- **A tiempo 20.00 min:**

El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es: El pH (P-Value = 0), seguido de la concentración de peróxido (P-Value = 0.003), y finalmente el caudal (P-Value = 0.011).

- **A tiempo 40.00 min:**

El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es el pH (P-Value = 0), y la concentración de peróxido (P-Value = 0), y finalmente el caudal (P-Value = 0.028).

- **A tiempo 60.00 min:**

El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es el pH (P-Value = 0), y la concentración de peróxido (P-Value = 0), y finalmente el caudal (P-Value = 0.043).

- **A tiempo 80.00 min:**

El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es el pH (P-Value = 0), y la concentración de peróxido (P-Value = 0), y finalmente el caudal (P-Value = 0.024).

- **A tiempo 100.00 min:**

El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es la concentración de peróxido (P-Value = 0) seguido del pH (P-Value = 0.008), y finalmente el caudal (P-Value = 0.077).

- **Contrastación de la Hipótesis específica**

a) Influencia del grado de acidez (pH)

$H_{a_e}^1$: El pH influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂. $H_{a_e}^1 \neq 0$

$H_{0_e}^1$: El pH NO influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?. $H_{0_e}^1 = 0$.

Se aceptan las hipótesis alternas ($H_{a_e}^1$) a 20, 40, 60, 80, 100 min (**Ha_G**) debido a que los valores de p-value están por debajo de la significancia establecida 0.05.:

- **A tiempo 20.00 min:**

El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es el pH con un P-Value = 0.00

- **A tiempo 40.00 min:**

El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es el pH con un P-Value = 0.00.

- **A tiempo 60.00 min:**

El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es el pH, con un P-Value = 0.00

A tiempo 80.00 min:

- El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es el pH, con un P-Value = 0.00.

A tiempo 100.00 min:

- El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es el pH, con un P-Value = 0.00.

b) Influencia de la concentración de peróxido de hidrógeno.

$H_{a_e}^2$: La concentración de peróxido influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂?. $H_{a_e}^2 \neq 0$

$H_{0_e}^2$: La concentración de peróxido NO influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂? $H_{0_e}^2 = 0$.

Se aceptan las hipótesis alternas ($H_{a_e}^1$) a 20, 40, 60, 80, 100 min (**H_{a_G}**) debido a que los valores de p-value están por debajo de la significancia establecida 0.05.:

- **A tiempo 20.00 min:**

El mayor grado de influencia en el % de reducción de AMT es la concentración de peróxido, con un P-Value = 0.003

- **A tiempo 40.00 min:**

La concentración de peróxido, influye con un P-Value = 0.00 en el % de reducción de AMT.

- **A tiempo 60.00 min:**

La concentración de peróxido, influye con un P-Value = 0.00 en el % de reducción de AMT.

- **A tiempo 80.00 min:**

La concentración de peróxido, influye con un P-Value = 0.00 en el % de reducción de AMT.

- **A tiempo 100.00 min:**

La concentración de peróxido influye, con un P-Value = 0.008 en el % de reducción de AMT.

c) Influencia del flujo volumétrico (Caudal).

$H\alpha_e^3$: El flujo volumétrico influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂. $H\alpha_e^3 \neq 0$.

H_0^3 : El flujo volumétrico influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H₂O₂. $H_0^3=0$.

Se aceptan las hipótesis alternas ($H_{a_e}^1$) a 20, 40, 60, 80,100 min (**H_{a_G}**) debido a que los valores de p-value están por debajo de la significancia establecida 0.05.:

- **A tiempo 20.00 min:**

El caudal influye con un P-Value = 0.011 en el grado en el % de reducción de AMT.

- **A tiempo 40.00 min:**

El caudal influye con un P-Value = 0.028 en el grado en el % de reducción de AMT.

- **A tiempo 60.00 min:**

El caudal influye con un P-Value = 0.043 en el grado en el % de reducción de AMT.

- **A tiempo 80.00 min:**

El caudal influye con un P-Value = 0.043 en el grado en el % de reducción de AMT.

- **A tiempo 100.00 min:**

El caudal influye con un P-Value = 0.077 en el grado en el % de reducción de AMT.

6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares.

El orden de influencia predominante si tomamos en cuenta el valor **p-Value** en la reducción de concentración de amarillo de tartrazina a un tiempo de 20 minutos, es el pH (P-Value = 0), seguido de la concentración (P-Value 0.011) de peróxido de hidrógeno y finalmente el caudal (P-Value =.003) (véase Cuadro 6.2, en la página 127).

6.2.1 Análisis de la influencia del grado de acidez, caudal, $[H_2O_2]_{inicial}$ en el % de reducción de Amarillo de Tartrazina

De los resultados obtenidos (véase Cuadro 5.2, en la página 94), (véase Cuadro 6.1, en la página 125) se afirma:

- En promedio a pH= 8.00, y a 20.00 minutos se redujo la concentración hasta 60.26 %; a 40.00 minutos a 75.75%; 60.00 minutos a 83.37 %; 80.00 minutos a 87.59% y a 100.00 minutos a 92.30%.
- En promedio a pH= 6.00, y a 20.00 minutos se redujo la concentración hasta 73.00 %; 40.00 minutos a 83.00 %; 60.00 minutos a 90.00 %; 80.00 minutos a 94.00% y a 100.00 minutos a 96.00%.

- En promedio a pH= 4.00, y a 20.00 minutos se redujo la concentración hasta 91.00 %; 40.00 minutos a 96.00 %; 60 minutos a 98.00 %; 80.00 minutos a 100.00% y a 100.00 minutos a 99.00%.

Cuadro 6.1

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE COLORANTE AMARILLO DE TARTRAZINA A DIFERENTES TIEMPOS DE REACCIÓN

N° Prueba	[H ₂ O ₂], ppm	Q, l/min	pH	% RED 20 min	% RED 40 min	% RED 60 min	% RED 80 min	% RED 100 min
1	50	6.00	8.0	67.44%	83.72%	93.02%	93.02%	97.67%
2	25	6.00	8.0	57.14%	73.81%	73.81%	83.33%	90.48%
3	12.5	6.00	8.0	38.46%	56.41%	69.23%	74.36%	79.49%
4	50	4.00	8.0	23.81%	69.05%	85.71%	92.86%	97.62%
5	25	4.00	8.0	65.12%	79.07%	86.05%	93.02%	97.67%
6	12.5	4.00	8.0	47.73%	61.36%	75.00%	77.27%	86.36%
7	50	2.00	8.0	91.11%	97.78%	100.00%	100.00%	100.00%
8	25	2.00	8.0	88.64%	95.45%	95.45%	97.73%	100.00%
9	12.5	2.00	8.0	58.14%	65.12%	72.09%	76.74%	81.40%
Promedio.				60.26%	75.75%	83.37%	87.59%	92.30%
10	50	6.00	6.0	89.47%	97.37%	100.00%	100.00%	100.00%
11	25	6.00	6.0	68.89%	88.89%	95.56%	97.78%	100.00%
12	12.5	6.00	6.0	34.15%	48.78%	63.41%	70.73%	78.05%
13	50	4.00	6.0	89.19%	94.59%	97.30%	97.30%	97.30%
14	25	4.00	6.0	69.57%	89.13%	95.65%	97.83%	100.00%
15	12.5	4.00	6.0	50.00%	66.67%	73.81%	88.10%	92.86%
16	50	2.00	6.0	94.74%	97.37%	100.00%	100.00%	100.00%
17	25	2.00	6.0	88.37%	93.02%	97.67%	100.00%	100.00%
18	12.5	2.00	6.0	68.75%	75.00%	83.33%	91.67%	93.75%
Promedio.				73.00%	83.00%	90.00%	94.00%	96.00%
9	50	6.00	4.0	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
20	25	6.00	4.0	79.49%	94.87%	97.44%	100.00%	92.31%
21	12.5	6.00	4.0	68.42%	84.21%	92.11%	97.37%	100.00%
22	50	4.00	4.0	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
23	25	4.00	4.0	88.57%	97.14%	100.00%	100.00%	100.00%
24	12.5	4.00	4.0	94.29%	97.14%	100.00%	100.00%	100.00%
25	50	2.00	4.0	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
26	25	2.00	4.0	97.67%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

27	12.5	2.00	4.0	93.94%	87.880%	93.940%	100.00%	100.00%
Promedio.				91.00%	96.00%	98.00%	100.00%	99.00%

Fuente: Los autores - 2015

6.2.2 Análisis y evaluación de los modelos estadísticos lineal, cuadrático y las interacciones.

A tiempo 20.00 min.

Para tiempo 20.00 min (véase Cuadro 6.2, en la página 127), **la relación lineal** presenta un modelo con valor P-Value=0.00 y con F-Value= 14.61, lo que indica que el modelo lineal tiene una buena correlación debido a su alta significancia; **para el modelo cuadrático** se observa P-Value=0.252 y F-Value= 1.47 lo que indica que las interacciones no son significativas debido a que las interacciones individuales *perox*perox* posee un P-Value = 0.129 y un F-Value = 2.54, para el caso del (*caudal*caudal*) posee un P-Value = 0.223 y un F-Value = 1.6, para el caso del (*pH*pH*) posee un P-Value = 0.603 y un F-Value = 0.28, y en el **caso de las interacciones** el P-Value=0.622 y F-Value= 0.60 lo que indica que las interacciones no son significativas para el caso de las interacciones individuales el (*perox*caudal*) posee un P-Value = 0.281 y un F-Value = 1.24, para el caso del (*perox*pH*) posee un P-Value = 0.15 y un F-Value = 0.706, y para el caso del *caudal*pH* posee un P-Value = 0.524 y un F-Value = 0.42.

Estos resultados permiten afirmar que en el análisis estadístico la correlación cuadrática y las interacciones no son significativas en la reducción del amarillo de tartrazina.

Cuadro 6.2
ANALISIS DE VARIANZA – REGRESIÓN DE SUPERFICIE
RESPUESTA (%R-20.00 min vs PEROX, CAUDAL, PH)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.94067	0.104518	5.49	0.001 (*)
Linear	3	0.83478	0.278259	14.61	0 (*)
perox	1	0.22645	0.226452	11.89	0.003 (*)
caudal	1	0.15625	0.156251	8.2	0.011 (*)
pH	1	0.45207	0.452074	23.74	0 (*)
Square	3	0.08419	0.028063	1.47	0.257
perox*perox	1	0.04836	0.048364	2.54	0.129
caudal*caudal	1	0.03048	0.030482	1.6	0.223
pH*pH	1	0.00534	0.005343	0.28	0.603
2-Way Interaction	3	0.03445	0.011483	0.6	0.622
perox*caudal	1	0.02356	0.023565	1.24	0.281
perox*pH	1	0.00281	0.002805	0.15	0.706
caudal*pH	1	0.00808	0.008078	0.42	0.524
Error	17	0.32375	0.019044		
Total	26	1.26442			

(*) Significativa

Fuente: Los autores (2015)

A tiempo 40.00 min.

Para tiempo 40.00 min (véase Cuadro 6.3, en la página 128), la **relación lineal** presenta un modelo con valor P-Value=0.00 y con F-Value= 23.35 lo que indica que el modelo lineal tiene una buena correlación debido a su alta significancia; para el **modelo cuadrático** con valor P-Value=0.026 y con F-Value= 4.53 se observa que las interacciones no son significativos debido a que las interacciones perox*perox posee un P-Value = 0.002 y un F-Value = 12.75, para el caso del caudal*caudal posee un P-Value = 0.223 y

un F-Value = 0.31, para el caso del pH*pH posee un P-Value = 0.603 y un F-Value = 0.28, y en el caso de **las interacciones** con valor P-Value=0.297 y con F-Value= 1.33, no son significativas y para el caso del perox*caudal posee un P-Value = 0.361 y un F-Value = 0.88, para el caso del perox*pH posee un P-Value = 0.263 y un F-Value = 1.34, y para el caso del caudal*pH posee un P-Value = 0.2 y un F-Value = 1.78.

Estos resultados permiten afirmar que en el análisis estadístico la correlación cuadrática y las interacciones no son significativos en la reducción del amarillo de tartrazina.

Cuadro 6.3
ANÁLISIS DE VARIANZA – REGRESIÓN DE SUPERFICIE
RESPUESTA (%R- 40.00 min vs PEROX, CAUDAL, PH)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.499279	0.055475	9.32	0 (*)
Linear	3	0.416769	0.138923	23.35	0 (*)
perox	1	0.216281	0.216281	36.35	0 (*)
caudal	1	0.034454	0.034454	5.79	0.028 (*)
pH	1	0.166034	0.166034	27.91	0 (*)
Square	3	0.080847	0.026949	4.53	0.016 (*)
perox*perox	1	0.075855	0.075855	12.75	0.002 (*)
caudal*caudal	1	0.001822	0.001822	0.31	0.223
pH*pH	1	0.00317	0.00317	0.28	0.603
2-Way Interaction	3	0.023793	0.007931	1.33	0.297
perox*caudal	1	0.005248	0.005248	0.88	0.361
perox*pH	1	0.007977	0.007977	1.34	0.263
caudal*pH	1	0.010568	0.010568	1.78	0.2
Error	17	0.101145	0.00595		
Total	26	0.600424			

(*) Significativa

Fuente: Los autores (2015)

A tiempo 60.00 min.

Para tiempo 60.00 min (véase Cuadro 6.4, en la página 130), **la relación lineal** presenta un modelo con valor P-Value=0.00 y con F-Value= 22.59 lo que indica que el modelo lineal tiene una buena correlación debido a su alta significancia; **para el modelo cuadrático** con valor P-Value=0.048 y con F-Value= 3.25 se observa que las interacciones no son significativas, debido a que las interacciones perox*perox posee un P-Value = 0.007 y un F-Value = 9.54, para el caso del caudal*caudal posee un P-Value = 0.223 y un F-Value = 0.31, para el caso del pH*pH posee un P-Value = 0.642 y un F-Value = 0.22, y en el caso de las **interacciones** con valor P-Value=0.074 y con F-Value= 2.68 se observa que las interacciones no son significativas para el caso del perox*caudal posee un P-Value = 0.347 y un F-Value = 0.94, para el caso del perox*pH posee un P-Value = 0.0347 y un F-Value = 5.33, y para el caso del caudal*pH posee un P-Value = 0.199 y un F-Value = 1.78.

Estos resultados permiten afirmar que en el análisis estadístico la correlación cuadrática y las interacciones no son significativas en la reducción del amarillo de tartrazina.

Cuadro 6.4
ANÁLISIS DE VARIANZA – REGRESIÓN DE SUPERFICIE
RESPUESTA (%R- 60min vs PEROX, CAUDAL, PH)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.288846	0.032094	9.36	0 (*)
Linear	3	0.232457	0.077486	22.59	0 (*)
perox	1	0.130235	0.130235	37.98	0 (*)
caudal	1	0.016336	0.016336	4.76	0.043 (*)
pH	1	0.085885	0.085885	25.04	0 (*)
Square	3	0.033474	0.011158	3.25	0.048 (*)
perox*perox	1	0.032705	0.032705	9.54	0.007 (*)
caudal*caudal	1	0	0	0	0.999
pH*pH	1	0.000769	0.000769	0.22	0.642
2-Way Interaction	3	0.027613	0.009204	2.68	0.079
perox*caudal	1	0.003207	0.003207	0.94	0.347
perox*pH	1	0.018291	0.018291	5.33	0.034 (*)
caudal*pH	1	0.006114	0.006114	1.78	0.199
Error	17	0.058299	0.003429		
Total	26	0.347145			

(*) Significativa

Fuente: Los autores (2015)

A tiempo 80.00 min.

Para tiempo 80 min (véase Cuadro 6.5, en la página 131), la **relación lineal** presenta un modelo con valor P-Value=0.00 y con F-Value=22.78 lo que indica que el modelo lineal tiene una buena correlación debido a su alta significancia; para el modelo **cuadrático** modelo con valor P-Value=0.022 y con F-Value= 4.19 se observa que las interacciones no son

significativos, debido a que las interacciones perox*perox posee un P-Value = 0.003 y un F-Value = 12.47, para el caso del caudal*caudal posee un P-Value = 0.759 y un F-Value = 0.1, para el caso del pH*pH posee un P-Value = 0.974 y un F-Value = 0, y en el caso de las **interacciones** con P-Value=0.013 y con F-Value= 4.85 no son significativos, para el caso del perox*caudal posee un P-Value = 0.235 y un F-Value = 1.52, para el caso del perox*pH posee un P-Value = 0.004 y un F-Value = 11.1, y para el caso del caudal*pH posee un P-Value = 0.181 y un F-Value = 1.94.

Estos resultados permiten afirmar que en el análisis estadístico la correlación cuadrática y las interacciones no son significativos en la reducción del amarillo de tartrazina.

Cuadro 6.5

ANÁLISIS DE VARIANZA – REGRESIÓN DE SUPERFICIE RESPUESTA (%R- 80min vs PEROX, CAUDAL, PH)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.183089	0.020343	10.63	0 (*)
Linear	3	0.130753	0.043584	22.78	0 (*)
perox	1	0.063534	0.063534	33.21	0 (*)
caudal	1	0.011797	0.011797	6.17	0.024 (*)
pH	1	0.055422	0.055422	28.97	0 (*)
Square	3	0.024054	0.008018	4.19	0.022 (*)
perox*perox	1	0.023866	0.023866	12.47	0.003 (*)
caudal*caudal	1	0.000186	0.000186	0.1	0.759
pH*pH	1	0.000002	0.000002	0	0.974
2-Way Interaction	3	0.02785	0.009283	4.85	0.013
perox*caudal	1	0.002904	0.002904	1.52	0.235
perox*pH	1	0.021228	0.021228	11.1	0.004
caudal*pH	1	0.003719	0.003719	1.94	0.181
Error	17	0.032525	0.001913		
Total	26	0.215614			

(*) Significativa.

Fuente: Los autores (2015)

A tiempo 100.00 min.

Para tiempo 100 min (véase Cuadro 6.6, en la página 133), la relación **lineal** presenta un modelo con valor $P\text{-Value}=0.00$ y con $F\text{-Value}= 10.75$ lo que indica que el modelo lineal tiene una buena correlación debido a su alta significancia; para el **modelo cuadrático** con valor $P\text{-Value}=0.008$ y con $F\text{-Value}= 8.95$ se observa que las interacciones no son significativas debido a que las interacciones $\text{perox}*\text{perox}$ posee un $P\text{-Value} = 0.019$ y un $F\text{-Value} = 6.78$, para el caso del $\text{caudal}*\text{caudal}$ posee un $P\text{-Value} = 0.346$ y un $F\text{-Value} = 0.94$, para el caso del $\text{pH}*\text{pH}$ posee un $P\text{-Value} = 0.977$ y un $F\text{-Value} = 0$, y en el caso de las **interacciones** con valor $P\text{-Value}=0.053$ y con $F\text{-Value}= 0.17$ no son significativas, para el caso del $\text{perox}*\text{caudal}$ posee un $P\text{-Value} = 0.278$ y un $F\text{-Value} = 1.25$, para el caso del $\text{perox}*\text{pH}$ posee un $P\text{-Value} = 0.012$ y un $F\text{-Value} = 7.97$, y para el caso del $\text{caudal}*\text{pH}$ posee un $P\text{-Value} = 0.687$ y un $F\text{-Value} = 0.17$.

Estos resultados permiten afirmar que en el análisis estadístico la correlación cuadrática y las interacciones no son significativas en la reducción del amarillo de tartrazina.

Cuadro 6.6
ANÁLISIS DE VARIANZA – REGRESIÓN DE SUPERFICIE
RESPUESTA (%R- 100 min vs PEROX, CAUDAL, PH)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.089723	0.009969	5.45	0.001 (*)
Linear	3	0.059018	0.019673	10.75	0 (*)
perox	1	0.03617	0.03617	19.77	0 (*)
caudal	1	0.006472	0.006472	3.54	0.077
pH	1	0.016375	0.016375	8.95	0.008 (*)
Square	3	0.014119	0.004706	2.57	0.088
perox*perox	1	0.012397	0.012397	6.78	0.019 (*)
caudal*caudal	1	0.001721	0.001721	0.94	0.346
pH*pH	1	0.000002	0.000002	0	0.977
2-Way Interaction	3	0.017174	0.005725	3.13	0.053
perox*caudal	1	0.002294	0.002294	1.25	0.278
perox*pH	1	0.014574	0.014574	7.97	0.012
caudal*pH	1	0.000307	0.000307	0.17	0.687
Error	17	0.0311	0.001829		
Total	26	0.120823			

(*) Significativa

Fuente: Los autores (2015)

6.2.3 Evaluación de la probabilidad normal.

Del gráfico proporcionado por el software MINI_TAB se puede afirmar (véase el gráfico N°5.4, en la página 98).

A tiempo 20.00 min

La variable respuesta no presenta alejamiento de la normalidad y para la banda de confianza en este caso es de -0.1 a 0.1 (residuales), se tiene 4 puntos alejados.

A tiempo 40.00 min.

La variable respuesta no presenta alejamiento de la normalidad y para la banda de confianza en este caso es de -0.05 a 0.05 (residuales), se tiene 3 puntos alejados

A tiempo 60.00 min.

La variable respuesta no presenta alejamiento de la normalidad y para la banda de confianza en este caso es de -0.05 a 0.05 (residuales), se tiene 6 puntos alejados

A tiempo 80.00 min.

La variable respuesta no presenta alejamiento de la normalidad y para la banda de confianza en este caso es de -0.05 a 0.05 (residuales), se tiene 1 puntos alejado.

A tiempo 100.00 min.

La variable respuesta no presenta alejamiento de la normalidad y para la banda de confianza en este caso es de -0.05 a 0.05 (residuales), se tiene 4 puntos alejados.

Lo que permite afirmar que existe una buena relación en los modelos ajustados y observados, debido a que su banda de confianza en los diferentes tiempos: 20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00min van desde -

0.05 a 0.05, a excepción del tiempo 20 min que su banda de confianza es de -0.10 a 0.10.

6.2.4 Interpretación de los valores atípicos (outlier).

Del gráfico proporcionado por el software MINI_TAB se puede afirmar (véase el gráfico N°5.5, en la página 100).

A tiempo 20.00 min.

La variable presenta puntos fuera de la banda de residuales -0.1 a 0.1, en las muestras 5, 6, 12, 20, 26 y 27, valores que afectan la normalidad.

A tiempo 40.00 min.

La variable presenta puntos fuera de la banda de residuales -0.1 a 0.1, en las muestras 5, 12, 20, valores que afectan la normalidad.

A tiempo 60.00 min.

La variable presenta puntos fuera de la banda de residuales -0.1 a 0.1, en las muestras 5, valor que afecta la normalidad.

A tiempo 80.00 min.

La variable presenta puntos fuera de la banda de residuales -0.1 a 0.1, en las muestras 5, valor que afecta la normalidad.

A tiempo 100.00 min.

La variable presenta puntos dentro de la banda de residuales -0.1 a 0.1.

6.2.5 Análisis e Interpretación de los gráficos de contorno de pH, Caudal, Concentración de peróxido H₂O₂ % Red-20.00 min, % Red-40.00min, % Red-60.00min.

Del gráfico proporcionado por el software MINI_TAB (véase el gráfico 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, en las páginas 99, 100, 101, 102, 103, 104,105) se puede afirmar:

A tiempo 20.00 min.

Podemos apreciar que las áreas que se encuentran con un rendimiento de 80.00 % a 100% está entre los rangos: de caudal de 2.00 a 3.20 l/min y concentración de peróxido de 20.00 a 50.00 ppm; pH de 4.00 a 6.80 y concentración de peróxido 30.00 a 50.00 ppm; pH de 4.00 a 5.50 y un caudal 2.00 a 5.00 l/min.

A tiempo 40.00 min.

Podemos apreciar que las áreas que se encuentran con un rendimiento de 80.00 % a 100% está entre los rangos: de caudal de 2.00 a 5.20 l/min y un pH de 4.00 a 5.00; concentración de peróxido de 30.00 a 45.00 ppm; pH de 2.00 a 6.00 y concentración de peróxido 30.00 a 50.00 ppm; pH de 4.00 a 7.00.

A tiempo 60.00 min.

Podemos apreciar que las áreas que se encuentran con un rendimiento de 80.00 % a 100% se encuentra entre los rangos: de caudal de 2.00 a 6.00 l/min un pH de 4.00 a 5.50; una concentración de peróxido de 20.00 a 50.00 ppm a un caudal de 2.00 a 6.00 l/min y concentración de peróxido 20.00 a 50.00 ppm; pH de 4.00 a 6.50.

A tiempo 80.00 min.

Podemos apreciar que las áreas que se encuentran con un rendimiento de 80.00 % a 100% se encuentra entre los rangos: de caudal de 2.00 a 6.00 l/min un pH de 4.00 a 6.50; una concentración de peróxido de 20.00 a 50.00 ppm a un pH de 2.00 a 6.00 y concentración de peróxido 10.00 a 50.00 ppm; pH de 4.00 a 6.50.

A tiempo 100.00 min.

Podemos apreciar que las áreas que se encuentran con un rendimiento de 80.00 % a 100% se encuentra entre los rangos: de caudal de 2.00 a 6.00 l/min un pH de 4.00 a 7.00; una concentración de peróxido de 20.00 a 50.00 ppm a un pH de 4.00 a 8.00 y concentración de peróxido 20.00 a 50.00 ppm; pH de 2.00 a 6.00.

6.2.6 Análisis y evaluación de los gráficos caja bigote a los tiempos, 20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00 min.

Se puede afirmar (véase el gráfico 5.12 y 5.13, en la página 107 y108), que la mediana del porcentaje de reducción en las pruebas a los tiempos, 20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00 min superan el 80.00%, y en el

tiempo 100.00 min el % de reducción es de 100.0%. No se observan valores atípicos debido a que los valores se encuentran dentro de los extremos del segundo y tercer cuartil.

6.2.6.1 Análisis y evaluación del % Reducción AMT vs [H₂O₂], en los gráficos caja bigote a los tiempos, 20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00 min.

Se puede afirmar (véase el gráfico 5.12, en la página 107):

A 20.00 min y 12.50 ppm el valor de la mediana del % de Reducción supera el 60.00 % y a 50.00 ppm supera el 90.00 %. No se observan valores atípicos.

A 40.00 min y 12.50 ppm el valor de la mediana del % de Reducción supera el 75.00 % y a 50.00 ppm supera el 97.00 %. No se observan valores atípicos.

A 60.00 min y 12.50 ppm el valor de la mediana del % de Reducción supera el 80.00 % y a 50.00 ppm supera el 97.00 %. No se observan valores atípicos.

A 80.00 min y 12.50 ppm el valor de la mediana del % de Reducción supera el 85.00 % y a 50.00 ppm supera el 97.00 %. No se observan valores atípicos.

A 100.00 min y 12.50 ppm el valor de la mediana del % de Reducción supera el 90.00 % y a 50.00 ppm supera el 97.00 %. No se observan valores atípicos.

6.2.6.2 Análisis y evaluación del % Reducción AMT vs Caudal, en los gráficos caja bigote a los tiempos, 20.00, 40.00, 60.00, 80.00 y 100.00 min.

Se puede afirmar (véase el gráfico 5.13, en la página 108):

A 20.00 min y 2.00 l/min el valor de la mediana del % de Reducción supera el 65.00 % y a 6.00 l/min supera el 97.00%. No se observan valores atípicos.

A 40.00 min y 2.00 l/min el valor de la mediana del % de Reducción supera el 85.00 % y a 6.00 l/min supera el 90.00 %. No se observan valores atípicos.

A 60.00 min y 2.00 l/min el valor de la mediana del % de Reducción supera el 93.00 % y a 6.00 l/min supera el 95.00 %. No se observan valores atípicos.

A 80.00 min y 2.00 l/min el valor de la mediana del % de Reducción supera el 95.00 % y a 6.00 l/min supera el 97.00%. No se observan valores atípicos.

A 100.00 min y 2.00 l/min el valor de la mediana del % de Reducción supera el 97.00 % y a 6.00 l/min supera el 97.00%. No se observan valores atípicos.

6.2.6.3 Análisis y evaluación del % Reducción AMT vs pH, en los gráficos caja bigote a los tiempos, 20, 40, 60, 80 y 100min.

Se puede afirmar (véase el gráfico 5.14, en la página 109):

A 20.00 min y pH=4.00, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 95.00 % y a pH=8.00 supera el 60.00%. No se observan valores atípicos.

A 40.00 min y pH=4.00, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 95.00 % y a pH=8.00, supera el 73.00 %. No se observan valores atípicos.

A 60.00 min y pH=4.00, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 97.00 % y a pH=8.00, supera el 80.00%. No se observan valores atípicos.

A 80.00 min y pH=4.00, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 97.00% y a pH=8.00, supera el 85.00%. No se observan valores atípicos.

A 100.00 min y pH=4.00, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 99.00 % y a pH=8.00, supera el 90.00%. No se observan valores atípicos.

6.2.7 Análisis y evaluación de la constante de velocidad de reacción.

Se puede afirmar (véase Cuadro 5.5, en la página 113):

Que a concentraciones bajas de peróxido de hidrógeno, las constantes de velocidad de reacción son bajas, la diferencia ocurre a concentraciones altas de peróxido de hidrógeno en este caso la constante de velocidad es alta ($K_{\text{velocidad}}=0.188 \text{ min}^{-1}$ a 25.00 ppm de H_2O_2 . 2.00 l/min y pH=4.00).

6.2.8 Análisis y evaluación de la constante de velocidad de reacción óptima.

Se puede afirmar (véase el gráfico 5.18, en la página 116):

Que la óptima constante de velocidad de reacción es $=0.1788 \text{ min}^{-1}$ a 50.00 ppm de H_2O_2 . 2.00 l/min y pH=4.00).

La constante óptima de velocidad de reacción es 0.178 min^{-1} a 50.00 ppm de H_2O_2 . 2.00 l/min y pH=4.00.

6.2.9 Análisis y de las condiciones Óptimas para la reducción de amarillo de tartrazina.

Se puede afirmar (véase el gráfico 5.19, en la página 117): las condiciones óptimas para la reducción del amarillo de tartrazina,

pronosticadas por el software Minitab V17 fueron: pH=4.00; Concentración de peróxido 30.68 ppm, y el caudal a 2.00 l/min.

6.3 Contrastación de resultados con otros estudios similares: Para validar la Influencia del pH, concentración de peróxido de hidrógeno, caudal (flujo volumétrico) en la reducción de colorante amarillo de tartrazina.

Diversos investigadores han obtenido remociones de colorantes en general que superan el 60%, trabajando con reactores homogéneos y heterogéneos.

Silva, Maraíssa (2010) determinó que las condiciones óptimas de tratamiento para aguas de teñido en la industria textil, son: pH=12.30, temperatura=52.00 °C y $H_2O_2=3.10 \times 10^{-4}$ mol/L (10.50 ppm). Para el efluente tratado con H_2O_2 /UV, se obtuvo una remoción de color de aproximadamente 75.00-80.00%, se observa una cinética de primer orden con constante de velocidad igual a $(1.5 \pm 0.36) \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Fonseca et. al (2012), estudian la cinética de la degradación de dos colorantes: ponceau 4R y amarillo de tartrazina. El estudio es realizado con solución acuosa de ponceau 4R y tartrazina con concentraciones de 30 ppm cada uno, trabajando con diversas concentraciones de peróxido de hidrógeno, logrando obtener un 90% de decoloración.

Petruta, Viorica (2014) realizó un estudio cinético de la fotodegradación del colorante amarillo de tartrazina y concluyó que la fotodegradación es posible mediante UV/H₂O₂, obteniendo un 54.00 % de mineralización en tiempos prolongados de irradiación, además encuentra que la temperatura influye en la velocidad de degradación de tartrazina y por encima de los 22.50 ppm de H₂O₂ la velocidad de degradación disminuye debido al exceso de H₂O₂ y radicales OH⁻ (véase Cuadro 2.6, en la página 49).

Petruta, Viorica (2014) trabajó en un reactor batch de laboratorio siendo uno de sus objetivos determinar la constante de velocidad de reacción es por esto que trabajó a distintas temperaturas.

En la presente investigación se logró obtener la concentración óptima de pH, concentración inicial óptima de H₂O₂ en un foto-reactor tubular anular, siendo el óptimo de pH igual a 4.0, la concentración inicial óptima de H₂O₂ de 30.6818 ppm y un flujo volumétrico de 2 Litros/minuto (véase Gráfico 5.19, en la página 117) a estas condiciones óptimas se logra reducir al máximo (95%-100%) la concentración de H₂O₂, en un tiempo de 20 minutos (véase Cuadro 5.2, en la página 94). La constante de reacción también fue determinada teniendo en cuenta el estudio hecho por Petruta, Viorica (2014) quien encuentra que la fotodegradación del amarillo de tartrazina sigue una cinética de pseudo primer orden.

Rodríguez, Tatiana et. Al (2008), realiza un estudio de todos los trabajos relacionados al tratamiento de efluentes industriales de naturaleza

recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta.

La tecnología POA mediante H_2O_2/UV se aplicó en:

- Efluentes del proceso de blanqueamiento de celulosa, condiciones experimentales: H_2O_2 (2584,8126 y 11526 ppm) pH=2,19 a 11,15 UV= 0 a 180 min), lámpara de Hg media presión.
- Efluentes industriales de destilería (DQO= 750.00-3000.00 ppm) y procesamiento de tomates (DQO entre 250.00-960.00 ppm), condiciones experimentales: H_2O_2 0 (0 a 34000 ppm), pH=3,00-5,00 (destilería); pH=6,00-7,50 (tomates), UV = 0 -120.00 min, lámpara de Hg de baja presión (254 nm).
- Colorante remazol, negro-B (36 ppm), condiciones experimentales: H_2O_2 =0 a 1326 ppm, UV= 0 a 20 min), lámpara de Hg 8 200 a 300 mmHg).
- Dos mezclas de surfactantes Barquat y Bardac (1000 ppm DQO), condiciones experimentales: H_2O_2 =1000, pH=8.00, UV= 0, 30 y 120 min), lámpara de Hg baja presión (254 mm Hg).
- Efluente secundario de industria textil (DQO=168 ppm, Color 420 ADMI units), condiciones experimentales: H_2O_2 = 0 a 748.00 ppm, pH=7.20, UV= 0 a 40.80 min), lámpara de baja presión 254 nm.

Según Rodríguez, Tatiana et. Al (2008), la mayoría de trabajos de investigación sobre fotodegradación de compuestos orgánicos están orientados a solucionar los problemas de la industria textil; siendo estos colorantes, compuestos muy estables y difíciles de degradar, y es

necesario aumentar la concentración de peróxido de hidrogeno inicial, con el objetivo de aumentar el número de radicales oxidrilos necesarios para oxidar dichos compuestos y así lograr degradar los colorantes hasta niveles aceptables de vertido.

Gil Pavas, Edison et. Al (2007), estudiaron la degradación de colorantes de aguas residuales mediante fotocatalisis heterogénea ($\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) y fotocatalisis homogénea ($\text{FeSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$), para las aguas residuales del proceso de bebidas isotónicas, los estudios los realizaron en un foto-reactor cilindro parabólico compuesto (CPC) en operación semibatch, en dicho estudio lograron obtener los parámetros óptimos para la fotocatalisis heterogénea, $\text{pH}=3$, concentración de (TiO_2) 286 ppm y concentración de peróxido de 1204 ppm con un porcentaje de decoloración del 97.88%. En la fotocatalisis homogénea trabajaron a $\text{pH}=3$ constante, concentración de $\text{Fe}^{+2} = 30$ ppm, la concentración de peróxido inicial de 3000 ppm, y lograron una decoloración de 99.65% .

En el presente trabajo de investigación se planteó reducir la concentración del colorante amarillo de tartrazina mediante el uso de un foto-reactor tubular anular mediante $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$, con el objetivo de verificar la influencia de las 3 variables de proceso (pH , Caudal, $[\text{H}_2\text{O}_2]$) , se logró reducir el color en un 100% a las condiciones óptimas de $\text{pH}=4.0$, Caudal=2.0 litros/minuto y $[\text{H}_2\text{O}_2]_{\text{inicial}}$ de 30.6818 ppm, en la presente investigación no se trabajó con fotocatalisis heterogénea($\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) y tampoco con el proceso fotofentón el cual es un proceso de fotocatalisis homogénea

($\text{FeSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$), pero se logró resultados muy semejantes a los obtenidos por Gil Pavas(2007), esto resulta muy económico ya que para degradar colorantes de cualquier industria de alimentos donde se usan colorantes azoicos semejantes al amarillo de tartrazina se puede hacer uso de esta tecnología, sin aumentar el costo de tratamiento debido al uso de reactivos adicionales como pueden ser el óxido de titanio usado en la fotocátalisis heterogénea o el sulfato ferroso usado en la fotocátalisis homogénea Pavas(2007), teniendo en cuenta que al estar el catalizador de TiO_2 en contacto con los efluentes este tiene que ser retirado mediante algún tratamiento posterior, para así evitar su vertido en la red sanitaria; semejante problema presenta el uso de catalizador de sulfato ferroso en el proceso fotofentón(fotocátalisis homogénea), al estar en forma de catión resulta más complicado aún su separación y entonces corremos el riesgo de sobrepasar los límites de vertido de metales pesados, ambas tecnologías presentan ciertos inconvenientes que pueden ser evitados en la medida de lo posible

En el presente trabajo se comprobó que es posible reducir la concentración del amarillo de tartrazina, uno de los colorantes más usados en las industrias de alimentos y especialmente en la de bebidas gasificadas, si se logra determinar las condiciones óptimas para el pH, caudal y concentración inicial de H_2O_2 teniendo en cuenta los contaminantes adicionales propios de este tipo de industrias.

VII. CONCLUSIONES.

- a) El porcentaje de reducción promedio de la concentración de amarillo de tartrazina es de 60.26% a 91.00 %, en un tiempo de tratamiento de 20 min.
- b) Se determinó que el grado de acidez óptimo es $\text{pH}=4.00$, en un tiempo de tratamiento de 20 min, por lo tanto el grado de acidez influye en la reducción de la concentración de colorante amarillo de tartrazina.
- c) Se determinó que la concentración óptima de peróxido de hidrógeno inicial, es de 30.68 ppm, en un tiempo de tratamiento de 20 min, por lo tanto la concentración inicial de peróxido de hidrógeno influye en la reducción de la concentración de colorante amarillo de tartrazina.
- d) Se determinó que el flujo volumétrico óptimo es de 2.00 l/min, en un tiempo de tratamiento de 20 min, por lo tanto el flujo volumétrico influye en la reducción de la concentración de colorante amarillo de tartrazina.

VIII. RECOMENDACIONES.

- a) Realizar estudios para ver el efecto que ejerce la intensidad de luz ultravioleta en el reactor tubular anular.
- b) Realizar estudios para determinar el diámetro óptimo del foto-reactor tubular.
- c) Realizar estudios para ver el efecto de concentraciones altas de colorante y la reducción con tratamiento fotooxidación
- d) Realizar estudios para ver el efecto degradativo de la radiación natural UV en productos que contengan colorantes alimentarios o azocompuestos.
- e) Realizar estudios para ver la toxicidad de los componentes residuales de la degradación del colorante amarillo de tartrazina mediante UV/H₂O₂ en productos que contengan colorantes alimentarios o azocompuestos.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. AL-DAWARY, Salam K. **“Photo-Catalyst Degradation of Tartrazine Compound in Wastewater Using TIO₂ and UV Light.”** Journal of Engineering Science and Technology. Vol. 8, No 6 .2013.
[http://jestec.taylors.edu.my/Vol%208%20Issue%206%20December%2013/Volume%20\(8\)%20Issue%20\(6\)%20683-%20691.pdf](http://jestec.taylors.edu.my/Vol%208%20Issue%206%20December%2013/Volume%20(8)%20Issue%20(6)%20683-%20691.pdf)
2. ANASTAS, Paul y otros. **“Green Chemistry: Theory and Practice”**. Disponible en:
<http://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry.htmlchemistry/principles/12-principles-of-green-chemi>
3. ANGEL VEGA, José Luis. **“Responsabilidad Social y los Principios del Desarrollo Sostenible como Fundamentos Teóricos de la Información Social de la Empresa”**. España. EDITORIAL ESIC. Primera Edición. 2002.
4. ARROYAVE ROJAS, Joan y otros. **“Foto degradación de las aguas residuales con pesticida Mertect en la industria bananera empleando Fotocatálisis con Dióxido de Titanio y Lámpara de Luz Ultravioleta”**. Revista Lasallista de Investigación. Vol. 4, 7 – 13. Enero– Junio 2007

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S17944492007000100002&sc
ript=sci_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S17944492007000100002&sc
ript=sci_arttext)

5. ARROYAVE ROJAS, Joan. **“Mineralización del Colorante, Tartrazina Mediante un Proceso de Oxidación Avanzada”**. Revista Lasallista de Investigación. Vol. 6 No. 2. Abril del 2009.
<http://www.scielo.org.co/pdf/rlsi/v6n2/v6n2a07.pdf>
6. ARSLAN-ALATON, I. **“A review of the effects of dye-assisting chemicals on advanced oxidation of reactive dyes in wastewater”**. Color. Technol. Vol.119, 345 a 353, 2003.
7. BACARDIT PEÑARROYA, Jordi. **“Coupled photochemical-biological system to treat biorecalcitrant wastewaters”**. Tesis Doctoral. Barcelona. Universidad de Barcelona. 2007.
<http://tdx.cat/handle/10803/1533>
8. BEYER, Walter. **“Manual de Química Orgánica”**. Editorial Reverte S.A.España.Primer edición.1987.
9. BLANCO GÁLVEZ, Julian. **“Diseño de Reactores para Fotocatálisis: Evaluación Comparativa de las Distintas Opciones”**. Madrid: Ciemat. Primera edición. pp. 263-264. 2001.
<https://www.psa.es/webeng/solwater/files/CYTED01/17cap11.pdf>
10. BLANCO JURADO, José. **“Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto-Fentón”**. Tesis Magistral. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 2009.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492007000100002&lng=es&nrm=is&tlng=es

11. BREF. **“Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industries”**. Integrated Pollution Prevention and Control, VOL.1: 200. Agosto 2006.
http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/fdm_bref_0806.pdf
12. DOMÈNECH, Xavier. y otros. **“Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes”**. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), 2012.
<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2948>
13. FIGUEROA PRECIADO, Gudelia. **“Optimización de una Superficie de Respuesta Utilizando JMP.”** JMP IN 4, Marca Registrada de SAS Institute Inc., Cary, NC 27513. 2003.
14. FONSECA MAIA DE URZEDO, Ana. **“Cinética de Degradação dos Corantes Ponceau 4R e Amarelo Tartrazina”**. Sociedade Brasileira de Química (SBQ)- Universidade Federal de Minas Gerais. 2012.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S190904552012000100005&script=sci_arttext
15. FREEDMAN, Young. **“Física Universitaria”**. Editorial. Prentice Hall. México. Decimosegunda edición. 2009.
16. GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando y otros. **“Fotocatálisis y Electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales:**

- Investigaciones y aplicaciones**". Caldas, Colombia: s.n., 2007. 174 p. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492009000200007
17. GARCÉS GIRALDO, Luis. **"La Fotocatálisis como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales"**. Revista Lasallista de Investigación. Vol. 1 N°1. Junio 2004.
18. GIL PAVAS, Edison. **"Degradación de colorantes de aguas residuales empleando UV/TiO₂/H₂O₂/Fe⁺²."** Revista Universidad EAFIT. Vol. 80 N°146. 2007.
http://journaldatabase.info/articles/degradacion_colorantes_aguas.html
19. GÓMEZ, Luis y otros. **"Foto-oxidación de Vertidos Químicos: Revisión y Experiencias de Procesos de Oxidación Avanzada"**. Revista Ingeniería Química. Setiembre 2000.
<http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/371/19articulo.pdf>
20. KLAGES, F. **"Tratado de Química Orgánica"**. Editorial Reverte. Segunda Edición. 2005.
21. LARA PORRAS, A.M. **"Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS."** Proyecto Sur de Ediciones. Disponible en:
<http://www.ugr.es/~bioestad/guiaspss/practica7/ArchivosAdjuntos/Factorial%20dos%20factores.pdf>

22. LARA PORRAS, Ana. **“Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS.”** Proyecto Sur de Ediciones. 2000.
<http://www.ugr.es/~curspss/archivos/temario.html>.
23. LITTER, Marta y otros. **“Photochemical Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment”**. Recent Patents on Engineering. Vol 4 N° 3, 217-241. Junio 2010.
https://www.academia.edu/8033709/Photochemical_Advanced_Oxidation_Processes_for_Water_and_Wastewater_Treatment
24. MODIRSHAHLA, N. y otros. **“Investigation of the effect of different electrode connections on the removal efficiency of Tartrazine from aqueous solutions by electrocoagulation”** (2007) Dyes and Pigments, 74, 249-257.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535213004024>
25. MORALES CASTILLO, Fabiola. **“EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN EL PERÚ Y LA COMISIÓN DE AMBIENTE Y ECOLOGÍA”**. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Vol. 5. 80 a 82. Mayo 2002.
26. NAGEL HASSEMER, María. **“Oxidação Fotoquímica - UV/H₂O₂ - para Degradação de Poluentes em Efluentes da Indústria Têxtil”**. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Santa Catarina. 2006.
<http://www.abqct.com.br/artigost/artigoesp27.pdf>

27. OLLGAARD HENRIETTE, Frost Lydia y otros. (1998). **“Survey of azo-colorants in Denmark: Consumption, use, health and environmental aspects”**. Ministry of Environmental and Energy, Denmark. Danish Environmental Protection Agency. pp 205.
<http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/42/061/42061160.pdf>
28. PETRUTA OANCEA, Viorica Meltzer. **“Kinetics of tartrazine photodegradation by UV/H₂O₂ in aqueous solution”** Chemical Papers. Vol.68:105-111. Enero 2014.
<http://link.springer.com/article/10.2478/s11696-013-0426-5>
29. PIGNATELLO, Joseph, y otros. **“Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry”**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, Vol.36 (1), 1 a 84. 2006.
30. PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. ASAMBLEA GENERAL DE LAS NACIONES UNIDAS. Desarrollo sostenible. Disponible en:
<http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>
31. RODRÍGUEZ, Tatiana y otros. **“Tratamiento de Efluentes Industriales de Naturaleza Recalcitrante Usando Ozono, Peróxido de Hidrógeno y Radiación Ultravioleta”**. Departamento de Hidráulica e Saneamiento, Escola de Engenharia de Sao Carlos (EESC), Universidades de Sao Paulo (2008).

<http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/view/17926>

32. ROMERO, Roberto Leopoldo. **“Reactor fotocatalítico anular con TIO₂ en suspensión acuosa: resultados teóricos y experimentales de la degradación de tricloroetileno”**. Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC). 2005.
33. SALA GASTÓN, Mireia. **“Aplicació de Tècniques Electroquímiques i Fotoelectroquímiques per la Degradació De Compostos Poc Biodegradables en Efluents Industrials Tèxtils”**. Tesis Doctoral. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 2012.
34. SÁNCHEZ PRADO, Lucía. **“Estudio de la fotodegradación de compuestos orgánicos mediante microextracción en fase sólida, cromatografía de gases y espectrometría de masas”**. Tesis doctoral. Galicia. Universidad de Santiago de Compostela. 2007.
35. SCOTT FOGLER, H. **“Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”**. Editorial Prentice Hall, Tercera Edición. 2001.
36. SILVA FRANCO, Maraíssa. **“Estudio de Optimización de Proceso H₂O₂/Uv para el Decoloramiento de un Efluente de Industria Textil”**. Tesis magistral. Sao Paulo. Universidad de Sao Paulo. 2010.
37. SIQUEIROS TARAZÓN, Alejandra. **“Aplicación de la metodología de Superficie de Respuesta para el Mejoramiento de la Calidad del Aceite de Soya”**. Tesis pregrado. Sonora. Universidad de Sonora. 2004.

38.XERCAVINS, Josep y otros. "**Desarrollo Sostenible**". Barcelona.

Primera Edición. 2005.

X. ANEXOS

10.1 Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEP.	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cómo será la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	Conocer la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	Se reduce la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	Y	Absorbancia del colorante en la muestra	Porcentaje	Aplicación estadística y procesando estadísticamente los resultados obtenidos de las etapas anteriores.
PROB. ESPECÍFICOS	OBJ. ESPECÍFICOS	HIP. ESPECÍFICAS	INFLUENCIA DE VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
a) ¿Cómo Influyen los cambios del grado de acidez, en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	a) Determinar la influencia del grado de acidez, en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina de la muestra experimental, en un foto-reactor UV/ H ₂ O ₂	a) El grado de acidez influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	X1→Y	Acidez y la Absorbancia	pH Vs Absorbancia	Ensayos y análisis de la absorbancia
b) ¿Cómo Influyen los cambios de concentración de peróxido de hidrógeno (ppm de H ₂ O ₂) en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas,	b) Determinar la influencia de la concentración de peróxido en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	b) La concentración de peróxido influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	X2→Y	Concentración del Peróxido y la absorbancia	ppm H ₂ O ₂ Vs Absorbancia	Ensayos y análisis de la absorbancia
c) ¿Cómo Influyen los cambios de flujo volumétrico en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	c) Determinar la influencia de los cambios de flujo volumétrico en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	c) El flujo volumétrico influye en la reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante UV/H ₂ O ₂ ?	X3→Y	Flujo Volumétrico y la Absorbancia	Litros/min Vs Absorbancia	Ensayos y análisis de la absorbancia

RELACIÓN DE VARIABLES: $Y = F(X1, X2, X3)$

Y= Reducción de la concentración del colorante amarillo de tartrazina de la muestra experimental, en un foto-reactor UV/ H₂O₂

X1= Grado de acidez de la muestra experimental

X2 = Concentración de peróxido de hidrógeno en la muestra experimental

X3 = Flujo volumétrico de la muestra experimental en el foto-reactor

reducción de concentración de amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas, mediante uv/h₂o₂.

10.2 Nomenclatura de términos científicos

UV: Radiación ultravioleta

UV-VIS: Rango ultravioleta visible

AMT: Colorante amarillo de tartrazina

t: tiempo de reacción

Q: Flujo volumétrico o Caudal en litros/minuto (LPM)

H₂O₂: peróxido de hidrógeno

DQO: Demanda química de oxígeno

r_A: velocidad de reacción del componente A

C: Concentración en parte por millón (ppm)

C_{A0}: Concentración inicial del componente A

M: Molaridad en mol/litro

k: Constante de velocidad de reacción

k_{obs/S}⁻¹: Constante de velocidad de reacción observada

C_{tar/M}: Concentración de amarillo de tartrazina en mol/litro

C_{HP/M}: Concentración de peróxido de hidrógeno en mol/litro

t_{1/2/s}: Tiempo de vida media en segundos

h: constante de Plank

COT: Carbono orgánico total en ppm

TAO: tratamiento de oxidación avanzada

*HO: Radical hidroxilo

HO₂*: Radical hidroperoxilo

ROO*^{*}: Radical peroxil orgánico

pH: Potencial de hidrogeniones

TiO₂: Oxido de titanio

Tk: Tanque de almacenamiento

TCE: Tricloroetileno

V_R: Volumen del reactor

out: Salida

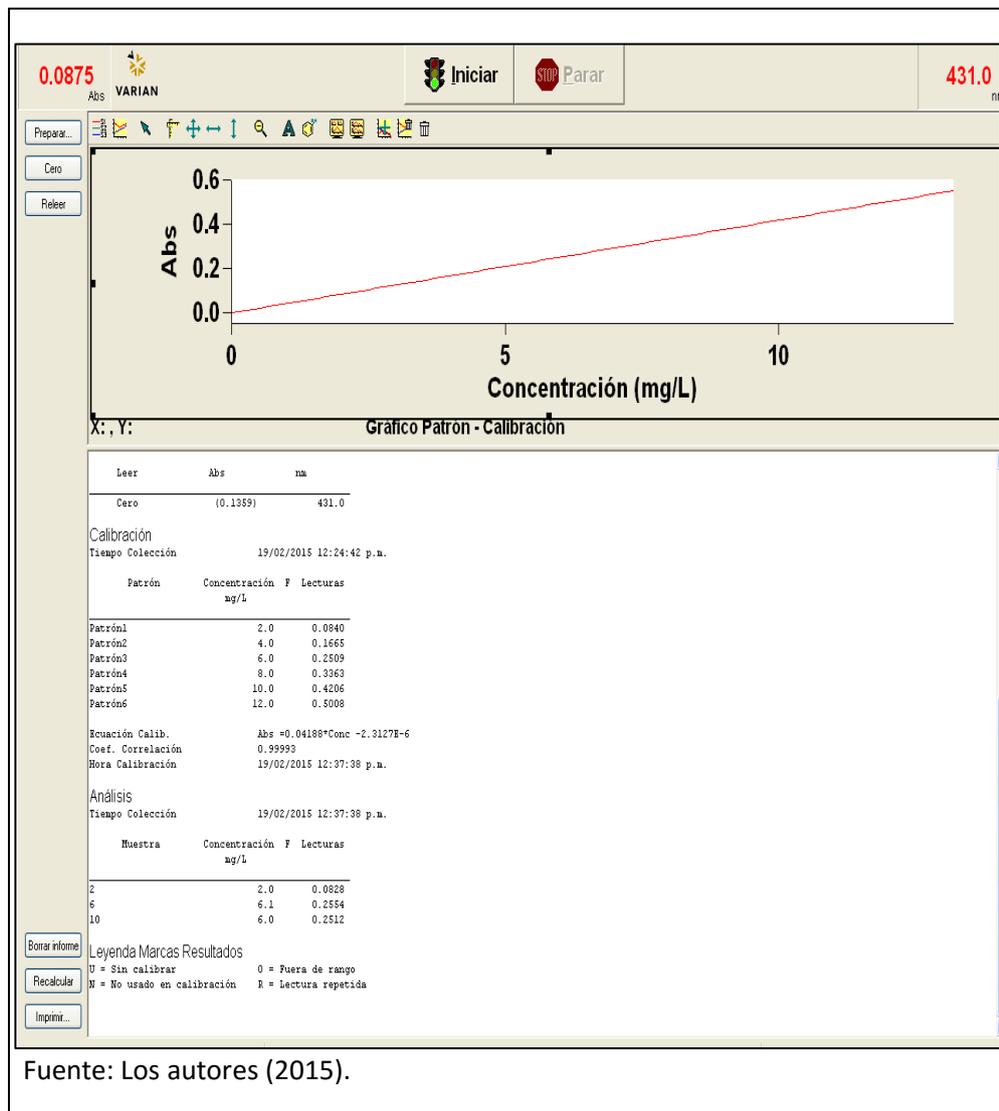
%Red: Porcentaje de degradación de AM

Ea: Energía de activación

10.3 Curva patrón, para medida de la concentración de colorante amarillo de tartrazina mediante.

Gráfico 10.1

CURVA PATRÓN, PARA MEDIDA DE LA CONCENTRACIÓN DE COLORANTE AMARILLO DE TARTRAZINA ESPECTROFOTOMETRÍA



Fuente: Los autores (2015).

10.4 Certificado de análisis del colorante amarillo de tartrazina mediante.

**Figura 10.1
CERTIFICADO DE ANÁLISIS DEL COLORANTE AMARILLO DE
TARTRAZINA**

Certificado de Análisis **SENSIENT**

Sensient Colors S.A. de C.V.
Rodolfo Patrón No. 12, Parque Ind. Lerma
C.P. 52000 Lerma, Edo. de México
Tels. 728 285 0569, Fax. 728 285 0330

NOMBRE DEL PRODUCTO:		AMARILLO No. 5		
No. DE LOTE:	27862	CI	19140	CANTIDAD: PEDIDO:
CODIGO:	M86000020	FECHA DE FABRICACION: 21/AGOSTO/2014		
PARAMETROS	METODO	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS	
APARIENCIA		POLVO FINO NARANJA AMARILLENTO	POLVO FINO NARANJA AMARILLENTO	
CONC. DE COLOR <input type="checkbox"/> TIC3 <input checked="" type="checkbox"/> ESPECTRO	MPMCC048	85 % MIN.	87.62 %	
HUMEDAD A 135°C, CLORUROS Y SULFATOS DE SODIO	MPMCC042, 043 Y 045	15 % Máx.	12.47 %	
INSOLUBLES EN AGUA	MPMCC046	0.2 % Máx.	0.008 %	
PLOMO	MPMCC018	2 ppm Máx.	0.32 ppm	
ARSENICO	MPMCC161	1 ppm Máx.	0.04 ppm	
MERCURIO	MPMCC163	1 ppm Máx.	0.0 ppm	
CADMIO	MPMCC162	1 ppm Máx.	0.0 ppm	
METALES PESADOS	MPMCC120	20 ppm Máx.	5.00 ppm	
AMINAS AROMATICAS PRIMARIAS	MPMCC152	0.01 % Máx.	0.001 %	
EXTRACTOS ETEREOS	MPMCC047	0.2 % Máx.	0.04 %	
INTERMEDIARIOS	MPMCC019	0.5 % Máx.	0.04 %	
SUBSIDIARIOS	MPMCC019	3.5 % Máx.	0.25 %	
RETENCION SOBRE MALLA N. 200	MPMCC002	20 % Máx.	8.50 %	
CUENTA BACTERIANA TOTAL	MPMCC136	500 UFC/g MAX	50	
HONGOS Y LEVADURAS	MPMCC137	100 UFC/g MAX	< 10	
COLIFORMES TOTALES	MPMCC141	10 UFC/g MAX	< 10	
OBSERVACIONES:	VIDA DE ANAQUEL 6 AÑOS Máx. MONTANA FECHA DE CADUCIDAD: 19/AGOSTO/2020			



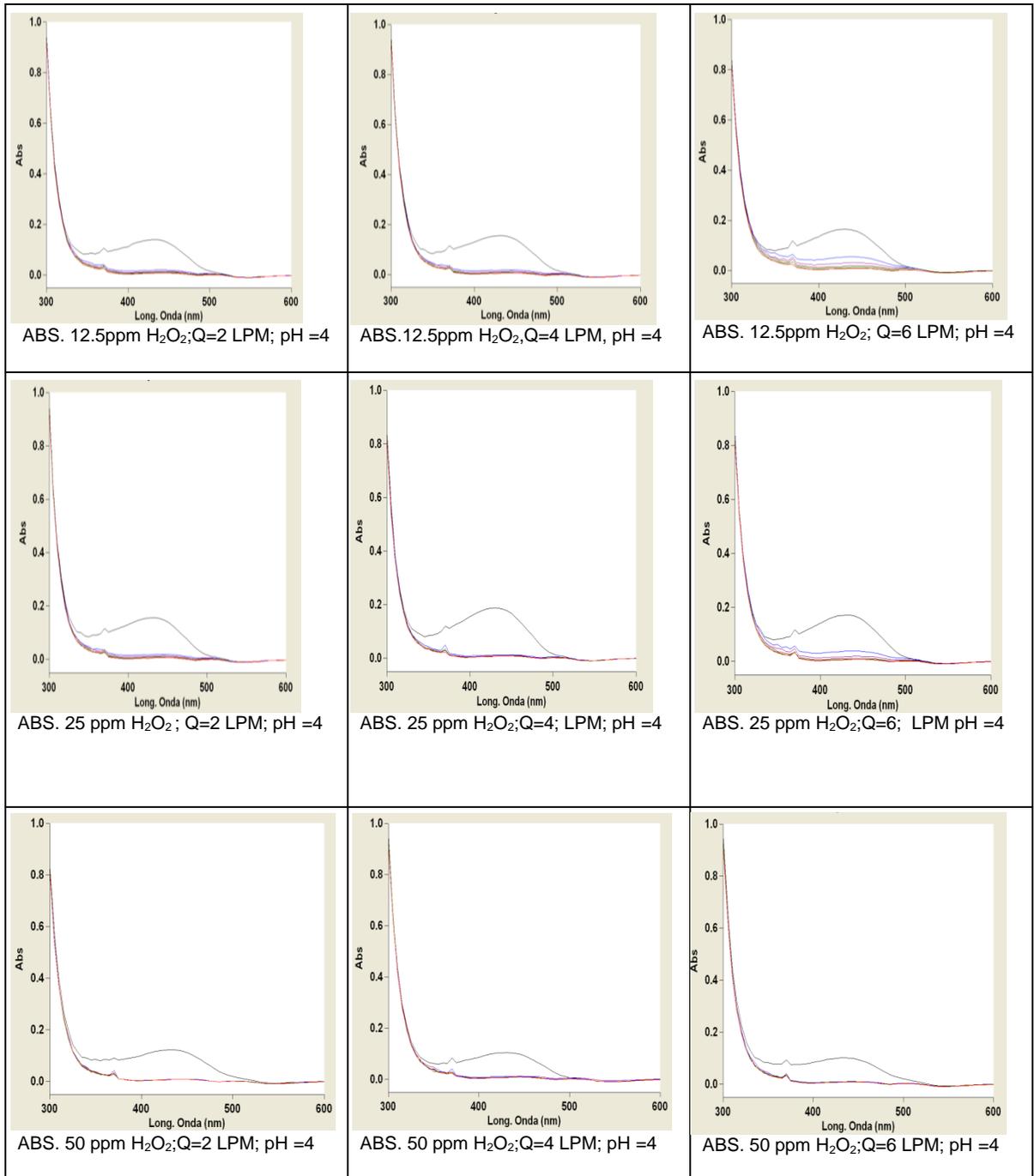


I.Q. JAZMIN CASTILLO SANABRIA COORDINADOR DE CONTROL DE CALIDAD Q. ANSELMO VIDAL G.

Fuente: Proveedor Montana S.A (2015)

10.5 Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=4.0

Figura 10.2
Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=4.0 a t=20,40,60,80 y 100 minutos

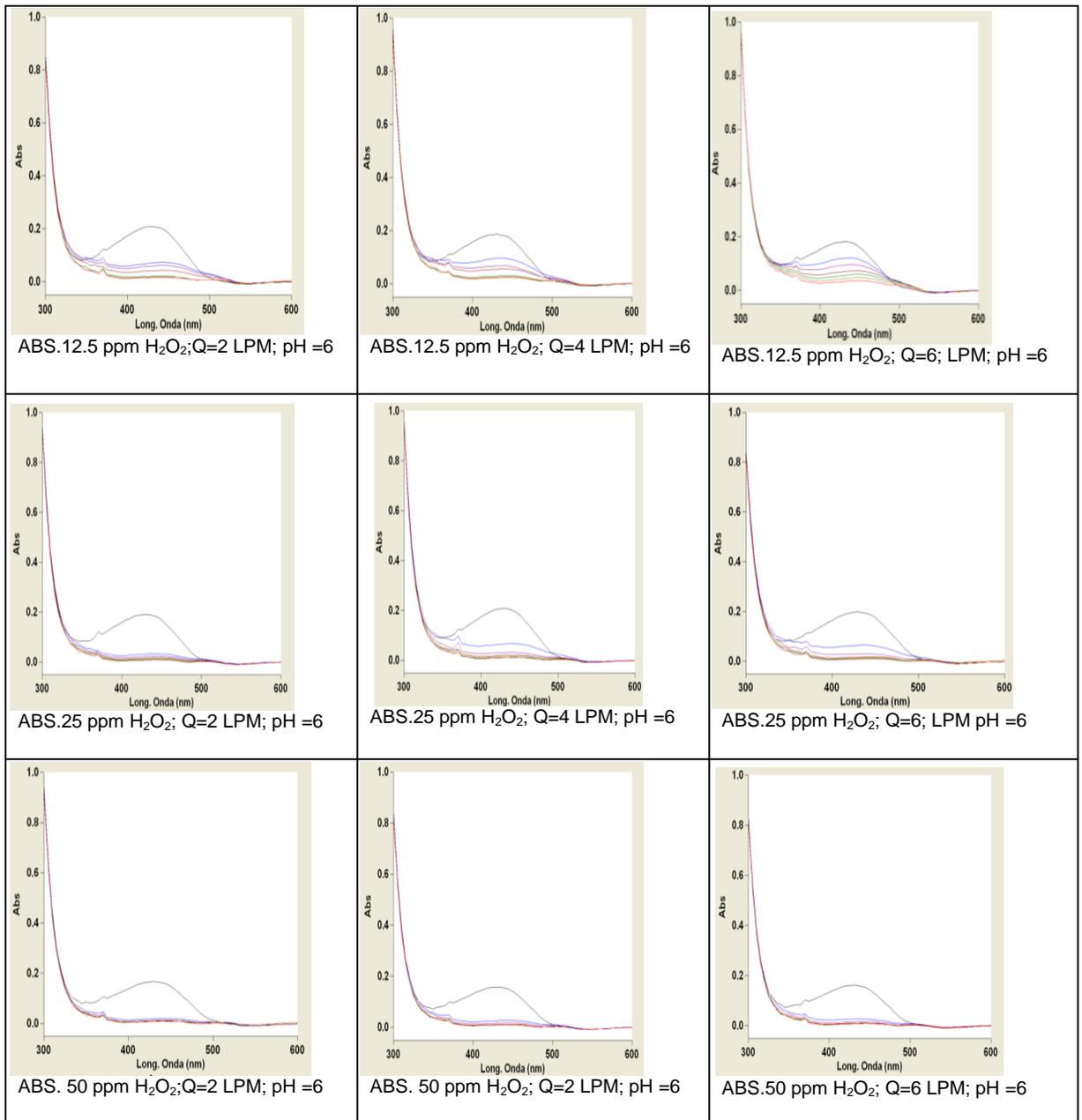


Fuente: Los autores (2015)

10.6 Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=6.

Figura 10.3

Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=6.0 a t=20,40,60,80 y 100 minutos

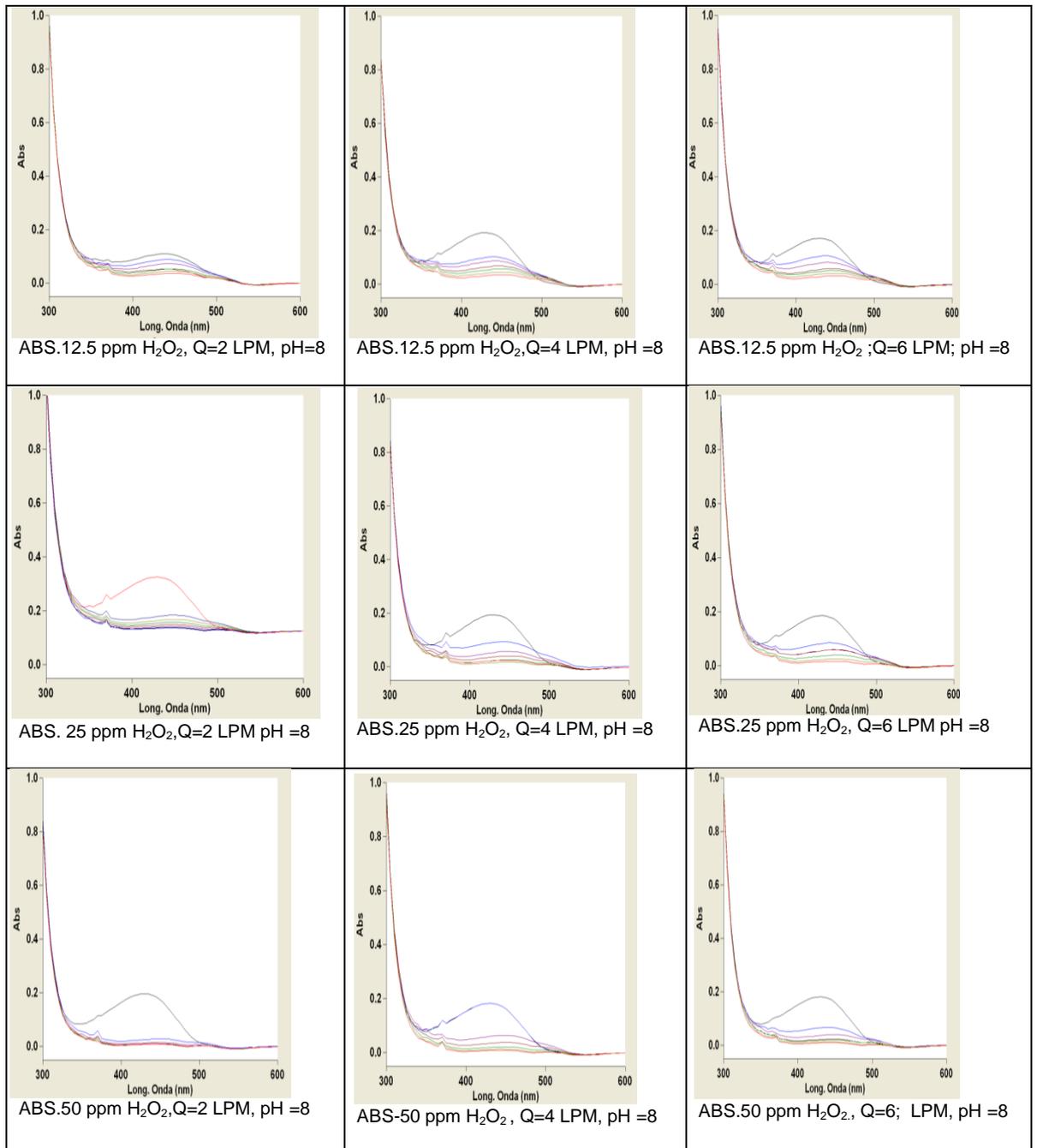


Fuente: Los autores (2015)

10.7 Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=8.0

Figura 10.4

Absorbancia de amarillo de tartrazina a pH=8.0 a t=20,40,60,80 y 100 minutos



Fuente: Los autores (2015)

10.8 Constantes cinéticas ordenadas en forma creciente.

Cuadro 10.1

CONSTANTES CINÉTICAS ORDENADAS EN FORMA CRECIENTE

<i>Exp.</i>	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>K_{obs}, 1/min</i>
12	12.5	6	6	0.015
9	12.50	2	8	0.015
3	12.50	6	8	0.016
6	12.50	4	8	0.018
2	25.00	6	8	0.021
15	12.5	4	6	0.025
18	12.5	2	6	0.026
13	50	4	6	0.033
5	25.00	4	8	0.034
1	50.00	6	8	0.035
4	50.00	4	8	0.038
27	12.5	2	4	0.039
8	25.00	2	8	0.042
21	12.5	6	4	0.043
11	25	6	6	0.048
14	25	4	6	0.048
17	25	2	6	0.059
20	25	6	4	0.062
23	25	4	4	0.089
24	12.5	4	4	0.089
10	50	6	6	0.091
16	50	2	6	0.091
7	50.00	2	8	0.095
26	25	2	4	0.188
19	50	6	4	α
22	50	4	4	α
25	50	2	4	α

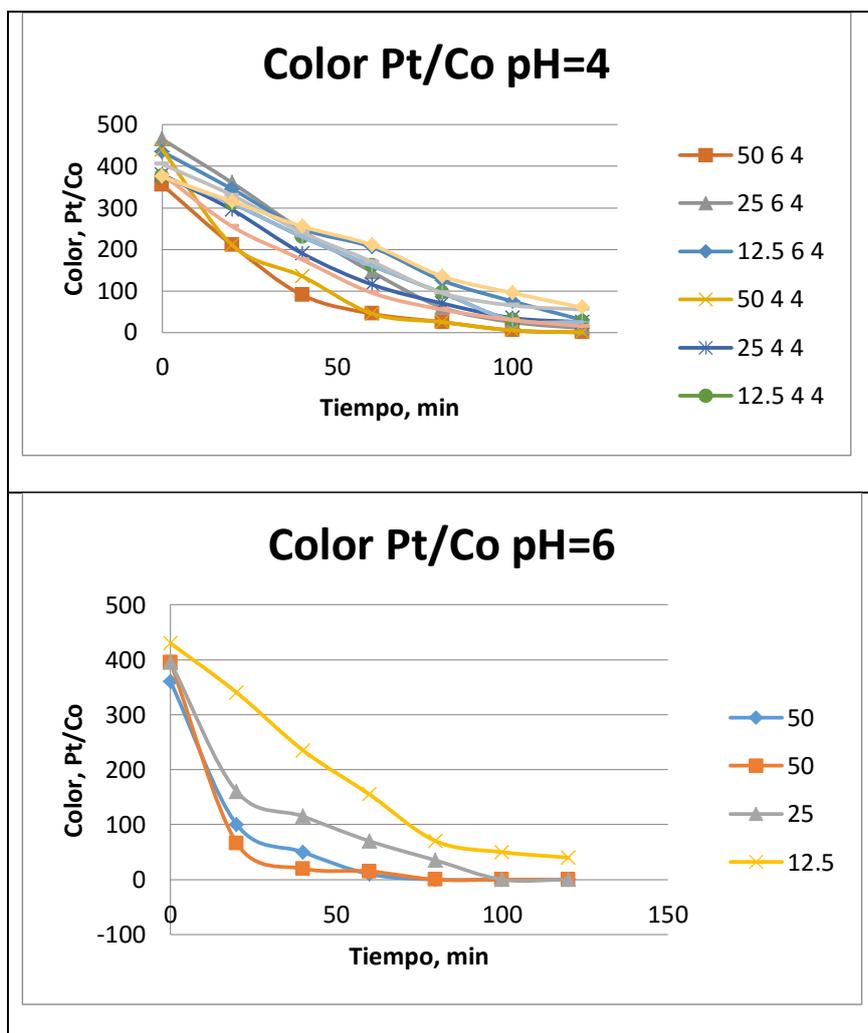
x1= [H₂O₂, ppm] ; x2=Caudal, LPM ; x3=pH
 α: indeterminado

Fuente: Los autores (2015)

10.9 Reducción de color en escala platino-cobalto.

Gráfico N° 10.2

REDUCCIÓN DE COLOR EN ESCALA PLATINO-COBALTO.



Fuente: Los autores (2015)

10.10 Concentración de amarillo de tartrazina a diferentes tiempos de reacción, flujo volumétrico y pH.

Cuadro 10.2

Concentración de AM para 27 pruebas experimentales

Ítem.	Variables			Concentración de amarillo de tartrazina					
				C0	C1	C2	C3	C4	C5
	x1	x2	x3	0.00 min	20.00 min	40.00 min	60.00 min	80.00 min	100.00 min
1	50.00	6	8	4.3	1.4	0.7	0.3	0.3	0.1
2	25.00	6	8	4.2	1.8	1.1	1.1	0.7	0.4
3	12.50	6	8	3.9	2.4	1.7	1.2	1	0.8
4	50.00	4	8	4.2	3	1.3	0.6	0.3	0.1
5	25.00	4	8	4.3	1.5	0.9	0.6	0.3	0.1
6	12.50	4	8	4.4	2.3	1.7	1.1	1	0.6
7	50.00	2	8	4.5	0.4	0.1	0	0	0
8	25.00	2	8	4.4	0.5	0.2	0.2	0.1	0
9	12.50	2	8	4.3	1.8	1.5	1.2	1	0.8
10	50	6	6	3.8	0.4	0.1	0	0	0
11	25	6	6	4.5	1.4	0.5	0.2	0.1	0
12	12.5	6	6	4.1	2.7	2.1	1.5	1.2	0.9
13	50	4	6	3.7	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
14	25	4	6	4.6	1.4	0.5	0.2	0.1	0
15	12.5	4	6	4.2	2.1	1.4	1.1	0.5	0.3
16	50	2	6	3.8	0.2	0.1	0	0	0
17	25	2	6	4.3	0.5	0.3	0.1	0	0
18	12.5	2	6	4.8	1.5	1.2	0.8	0.4	0.3
19	50	6	4	2.3	0	0	0	0	0
20	25	6	4	3.9	0.8	0.2	0.1	0	0.3
21	12.5	6	4	3.8	1.2	0.6	0.3	0.1	0
22	50	4	4	2.3	0	0	0	0	0
23	25	4	4	3.5	0.4	0.1	0	0	0
24	12.5	4	4	3.5	0.2	0.1	0	0	0
25	50	2	4	2.7	0	0	0	0	0
26	25	2	4	4.3	0.1	0	0	0	0
27	12.5	2	4	3.3	0.2	0.4	0.2	0	0

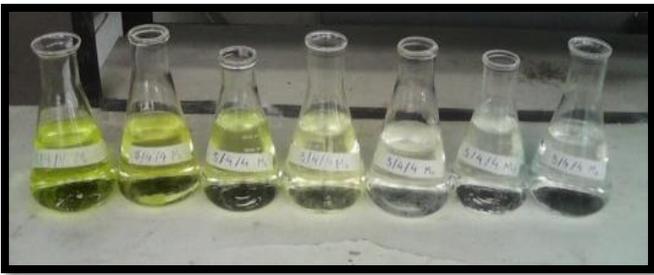
(*) x1: H₂O₂, ppm x2: Caudal, LPM x3: pH

Fuente: Los autores (2015)

10.11 Reducción de color en escala platino-cobalto.

Figura 10.5

REDUCCIÓN DE COLOR

Condiciones iniciales: [H ₂ O ₂]= 25 ppm pH=4 Caudal= 4 LPM	
Condiciones iniciales: [H ₂ O ₂]= 12.5 ppm pH=4 Caudal= 4 LPM	
Condiciones iniciales: [H ₂ O ₂]= 50 ppm pH=4 Caudal= 2 LPM	
Condiciones iniciales: [H ₂ O ₂]= 25 ppm pH=4 Caudal= 2 LPM	
Condiciones iniciales: [H ₂ O ₂]= 12.5 ppm pH=4 Caudal= 2 LPM	

Fuente: Los autores (2015)

10.12 Imágenes de pruebas experimentales

Figura 10.6
PRUEBAS EXPERIMENTALES

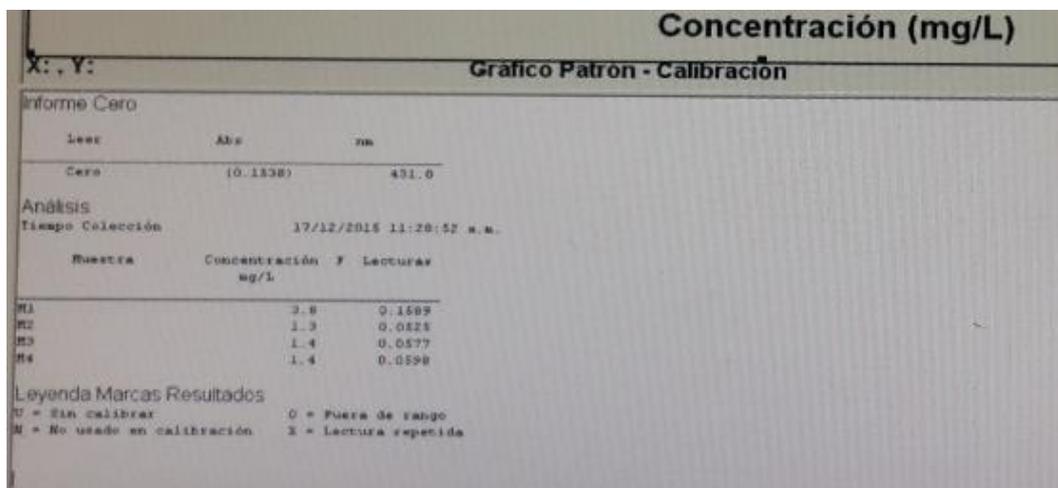


10.13 Resultados de las pruebas experimentales con agua de lavado tomado de la industria de bebidas.

Para esta prueba se tomó un efluente industrial que contiene:

3.80 ppm de colorante amarillo de tartrazina, que al ser sometido al foto reactor a las condiciones óptimas (Q=2.0 l/min; pH=4.00 y 30.68 ppm de H₂O₂, durante 20 min.), se obtuvo una reducción hasta 1.40 ppm de colorante amarillo de tartrazina lo que indica que hubo un porcentaje de reducción de un 63.15 %.

Figura 10.7
PRUEBAS EXPERIMENTALES CON AGUA DE LAVADO



Este resultado indica, que los componentes que contiene los efluentes de una planta de bebidas (Azucares, Acidulante E-330, Saborizante, Conservante E-211, Edulcorante E-960, Cafeína), influyen en el tiempo de degradación del colorante amarillo de tartrazina), por lo que los autores recomiendan, utilizar tratamientos previos como la filtración para hacer uso del foto-reactor.