

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**“PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA PARA LA
REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL AMARILLO
OCASO FCF (E110)”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR

**FASANANDO CORAL SODI BELISSA
VÁSQUEZ LEDESMA LEANDRO ENRIQUE**

ASESOR

ING° GUMERCINDO HUMANÍTAIPE

CALLAO – 2018

PERÚ

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Sustentada por los Bachilleres **FASANANDO CORAL SODI BELISSA** y **VÁSQUEZ LEDESMA LEANDRO ENRIQUE** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

ING° JULIO CÉSAR CALDERÓN CRUZ	PRESIDENTE
ING° MARÍA ESTELA TOLEDO PALOMINO	SECRETARIA
Lic. VICTORIA YSABEL ROJAS ROJAS	VOCAL
ING° GUMERCINDO HUAMANÍTAIPE	ASESOR

Tal como está asentado en el Libro de Actas N° 1 de Tesis con Ciclo de Tesis Folio N° 38 y Acta N° 37 de fecha **VEINTISÉIS DE NOVIEMBRE DE 2018**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 309–2017–CU de fecha 24 de octubre de 2017 y su Cuarta Disposición Transitoria.

DEDICATORIA

A MI MADRE CLAUDIA, POR SU FORTALEZA Y SER EJEMPLO DE LUCHA Y SUPERACIÓN, POR SU APOYO Y CONFIANZA A LO LARGO DE TODA MI VIDA

A MIS PADRES, ALBERTO Y TERESA, POR SU CARÍÑO, COMPRENSIÓN Y CONSEJO, INDISPENSABLES PARA SEGUIR ADELANTE

SODI BELISSA FASANANDO CORAL

DEDICATORIA

**DEDICO ESTE TRABAJO A MI MADRE,
POR SER EL PILAR MÁS IMPORTANTE
Y POR DEMOSTRARME SIEMPRE SU
CARIÑO Y APOYO INCONDICIONAL, SIN
IMPORTAR NUESTRAS DIFERENCIAS
DE OPINIONES**

**A MI PADRE, QUIEN ME ENSEÑÓ QUE
EL MEJOR CONOCIMIENTO QUE SE
PUEDE TENER, ES EL QUE SE APRENDE
POR SI MISMO Y SÉ QUE ESTE
MOMENTO ES TAN ESPECIAL PARA ÉL
COMO LO ES PARA MÍ**

**A MELISA, POR SIEMPRE ESTAR
APOYÁNDOME EN TODO MOMENTO Y
SER PARTE DE MI VIDA**

**LEANDRO ENRIQUE VÁSQUEZ
LEDESMA**

AGRADECIMIENTO

A nuestro asesor, Ing° Gumercindo Huamaní Taipe, por su constante apoyo, paciencia y entrega, que nos permitieron encaminar el desarrollo de esta tesis

A los docentes del ciclo de tesis, Ing° Calixto Ipanaque Maza, Ing° Leonardo Carlos Pereyra, y principalmente al Ing° Ricardo Rodríguez Vilchez, quienes con su experiencia y valiosos consejos, nos permitieron alcanzar los objetivos de esta tesis

Al Ing° Ronald Portales Tarrillo e Ing° Joshua Piñas, por su dirección, consejo y disposición para absolver nuestras dudas.

Al personal administrativo, Juan Castañeda y José Gutierrez, por brindarnos su tiempo y las herramientas para llevar a cabo el desarrollo de esta tesis.

A mis hermanos, Alejandra, Sonny y Andy; por creer en mí y ser el motor que me provee de fuerzas para seguir adelante. A Mc, por ser mi soporte, ofrecerme lo mejor de sí y ayudarme a mejorar cada día. A Elvis, por su confianza y apoyo incondicional a lo largo de los años. Gracias a ellos todo se vuelve posible. (Sodi Belissa Fasanando Coral)

A mis hermanos, Kathy, Jessica y Toño quienes han estado en muchos momentos significativos conmigo y por siempre estar dispuestos a escucharme y ayudarme en cualquier momento. A mis padrinos Alberto y Nélica por su apoyo incondicional y guiarme de la mejor manera con su ejemplo. (Leandro Enrique Vásquez Ledesma)

Finalmente, agradecemos a la Universidad Nacional del Callao, nuestra Alma Máter, y a nuestros docentes por brindarnos las herramientas para ser grandes profesionales y mejores personas.

ÍNDICE

	Pag.
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCCIÓN	10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1. Descripción de la realidad problemática	11
1.2. Formulación del problema	11
1.2.1. Problema general	11
1.2.2. Problemas específicos	12
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. Limitantes de la investigación	12
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Antecedentes	14
2.2. Marco teórico científico	18
2.2.1. Efluentes de la industria de alimentos	18
2.2.2. Colorantes alimentarios	20
2.2.3. Tratamiento de efluentes residuales	25
2.2.4. Procesos de oxidación avanzada	27
2.2.5. Radical hidroxilo	28
2.2.6. Sistema H ₂ O ₂ /UV	28
2.2.7. Efectos de las variables en las POA's	32
2.2.8. Equipo de oxidación avanzada	33
2.3. Definición de términos básicos	34
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	39
3.1. Hipótesis	39
3.1.1. Hipótesis general	39
3.1.2. Hipótesis específicas	39
3.2. Operacionalización de las variables	39
IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	41
4.1. Tipo y diseño de la investigación	41

	Pag.
4.2. Población y muestra	41
4.2.1. Población	41
4.2.2. Muestra	41
4.2.3. Unidad de muestreo	41
4.3. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información documental	42
4.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información de campo	42
4.4.1. Concentración del amarillo ocaso FCF (E110)	42
4.4.2. pH	43
4.4.3. Color	43
4.5. Análisis y procesamiento de datos	43
V. RESULTADOS	45
5.1. Resultados descriptivos	45
5.1.1. Influencia del pH	47
5.1.2. Influencia de la concentración del H ₂ O ₂	47
5.2. Resultados inferenciales	49
5.2.1. Modelo de regresión	51
5.2.2. Pareto de los efectos de las variables de operación	54
5.2.3. Gráficas de residuos para %Reducción del E110	56
5.2.4. Gráficos de efectos principales y de interacción	57
5.2.5. Probabilidad normal de la respuesta	59
5.2.6. %Reducción mediante graficas de contorno	60
5.2.7. Diagrama de caja para la variable de respuesta	63
5.2.8. Condiciones óptimas para la reducción del E100	63
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
6.1. Contrastación de la hipótesis	67
6.1.1. Contrastación de la hipótesis general	67
6.1.2. Contrastación de las hipótesis específicas	68
6.2. Contrastación de los resultados	69

	Pag.
6.2.1. Influencia del pH, [H ₂ O ₂], y el tiempo	69
6.2.2. Análisis y evaluación de los modelos estadísticos	70
6.2.3. Diagrama de Pareto	71
6.2.4. Interpretación de los valores atípicos	71
6.2.5. Gráficos de efectos principales y de interacción	72
6.2.6. Gráficos de contorno de pH, tiempo, [H ₂ O ₂]	72
6.2.7. Evaluación de la distribución normal	73
6.2.8. Caja bigote del %Reducción del E110 vs [H ₂ O ₂]	73
6.2.9. Caja bigote del %Reducción del E110 vs pH	73
6.2.10. Condiciones óptimas para la reducción del E110	74
VII CONCLUSIONES	75
VIII RECOMENDACIONES	76
IX REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

		Pag.
TABLA N° 2.1	Volumen anual de vertimientos de aguas residuales	20
TABLA N° 2.2	Volumen anual de vertimientos de aguas residuales en el sector alimenticio, autorizada según departamento	21
TABLA N° 2.3	Colorantes según su naturaleza	22
TABLA N° 2.4	Relación entre las longitudes de onda y colores absorbidos y reflejados	23
TABLA N° 2.5	Potenciales de oxidación de distintas especies	29
TABLA N° 2.6	Clasificación de los procesos de oxidación avanzada	30
TABLA N° 2.7	Parámetros técnicos del equipo de oxidación avanzada	34
TABLA N° 3.1	Operacionalización de variables	40
TABLA N° 5.1	Porcentaje de reducción de E110	45
TABLA N° 5.2	Color de la solución de amarillo ocaseo fcf E110	46
TABLA N° 5.3	Resumen del diseño de Box – Behnken	51
TABLA N° 5.4	información del factor	51
TABLA N° 5.5	Análisis de varianza para la determinación del modelo matemático	52
TABLA N° 5.6	Resumen del modelo estadístico	52
TABLA N° 5.7	Coeficientes para cada una de las variables, Valor p, para la reducción de la concentración del amarillo ocaseo FCF	53
TABLA N° 5.8	Porcentaje de residuos del E110 experimental y por regresión	54
TABLA N° 6.1	Porcentaje de reducción del E110 a diferentes tiempos de contacto	70
TABLA N° 10.1	Absorbancia y % de transmitancia a diferentes longitudes de onda	88
TABLA N° 10.2	Absorbancia del E110 a diferentes concentraciones	90

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pag.	
GRÁFICO N° 2.1	Volumen porcentual anual de aguas residuales industriales autorizadas por actividad económica	21
GRÁFICO N° 2.2	Volumen porcentual anual de vertimientos de aguas residuales en el sector alimenticio, autorizadas según departamento	22
GRÁFICO N° 5.1	Porcentaje de reducción del E110 vs tiempo a diferentes [H ₂ O ₂]	48
GRÁFICO N° 5.2	Porcentaje de reducción de la concentración del E110 vs tiempo a diferentes pH	50
GRÁFICO N° 5.3	Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	55
GRÁFICO N° 5.4	Gráficos de residuos para % reducción del E110	56
GRÁFICO N° 5.5	Efectos principales y de interacción para el % reducción del E110	57
GRÁFICO N° 5.6	Interaccion para % de reducción del E110	58
GRÁFICO N° 5.7	Probabilidad de % de reducción del E110	59
GRÁFICO N° 5.8	Residuos del % de reducción del E110	59
GRÁFICO N° 5.9	Gráfico de contorno de % de reducción vs H ₂ O ₂ ; pH a un tiempo de 20 minutos	60
GRÁFICO N° 5.10	Gráfico de superficie de % de reducción vs H ₂ O ₂ ; pH a un tiempo de 20 minutos	61
GRÁFICO N° 5.11	Gráfico de contorno de % de reducción vs H ₂ O ₂ ; pH a un tiempo de 40 minutos	61
GRÁFICO N° 5.12	Gráfico de contorno de % de reducción vs H ₂ O ₂ ; pH a un tiempo de 40 minutos	62
GRÁFICO N° 5.13	Gráfico de contorno de % de reducción vs H ₂ O ₂ ; pH a un tiempo de 60 minutos	62
GRÁFICO N° 5.14	Gráfico de superficie de % de reducción vs H ₂ O ₂ ; pH a un tiempo de 60 minutos	63
GRÁFICO N° 5.15	Caja de bigote a los tiempos 20, 40 y 60 minutos	64
GRÁFICO N° 5.16	Diagrama de caja : % de reducción del E110 vs H ₂ O ₂ a tiempo de 20, 40 y 60 minutos	64

GRÁFICO N° 5.17	Diagrama de caja : % de reducción del E110 vs pH a un tiempo de 20, 40 y 60 minutos	65
GRÁFICO N° 5.18	Condiciones óptimas para la obtención del mayor % de reducción del E110	66
GRÁFICO N° 10.1	Absorbancia : % transmitancia vs longitud de onda	89
GRÁFICO N° 10.2	Concentración del E110 vs absorbancia	90
GRÁFICO N° 10.3	Absorbancia del E110 a pH = 3	92
GRÁFICO N° 10.4	Absorbancia del E110 a pH = 4	93
GRÁFICO N° 10.5	Absorbancia del E110 a pH = 5	94
GRÁFICO N° 10.6	Concentración del E110 vs tiempo a diferentes pH	95
GRÁFICO N° 10.7	Color del E110 vs tiempo a diferentes pH	96

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.	
FIGURAS N° 2.1	Estructura química del amarillo FCF	24
FIGURAS N° 2.2	mecanismo de reacción de la combinación UV/H₂O₂ sobre la materia orgánica	31
FIGURAS N° 2.3	Equipo de oxidación avanzada	35
FIGURAS N° 2.4	Diagrama de flujo planta piloto de oxidación avanzada	36
FIGURAS N° 2.5	Gráfico de flujo – dosis UV	37
FIGURAS N° 10.1	Soluciones de concentración conocida de E110	91
FIGURAS N° 10.2	Espectrofotómetro UV – VIS	91
FIGURAS N° 10.3	Reducción del color a distintas [H₂O₂] y pH	97

RESUMEN

En este trabajo de investigación se presenta el estudio de los procesos de oxidación avanzada con la finalidad de reducir la concentración de un colorante recalcitrante presente en una solución acuosa. Este colorante es conocido como amarillo ocaso FCF (E110) o amarillo N° 6, el cual es ampliamente utilizado en la industria alimentaria.

Para el desarrollo de esta investigación se consideraron tres variables, las cuales presentaron tres niveles, cada una. Con estos se pretendió trabajar en un rango más amplio, que nos permitió determinar los parámetros fisicoquímicos óptimos para obtener el porcentaje de reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF.

La determinación de la concentración del amarillo ocaso FCF se realizó mediante técnicas espectrofotométricas, usando un espectrofotómetro UV, ubicado en el Laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao. Adicionalmente a esto, se realizaron mediciones del color de la solución usando un colorímetro en la escala Platino / Cobalto.

Una vez obtenidos los porcentajes de reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF, se realizó un análisis estadístico utilizando el software Minitab 18, basado en el diseño experimental Box Behnken, obteniendo así los parámetros fisicoquímicos óptimos corresponden a un pH igual a 3,3434, una concentración de H₂O₂ de 45 ppm y un tiempo de contacto de 60 minutos.

Finalmente, del análisis estadístico se obtiene un porcentaje de reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF de 85,1731%

Palabras clave : *Procesos de oxidación avanzada, Colorante recalcitrante, Técnicas espectrofotométricas, Diseño Box Behnken.*

ABSTRACT

The current work of investigation presents the study of the advanced oxidation processes with the finality of reducing the concentration of the recalcitrant coloring present in an aqueous solution. This coloring is well known like sunset yellow FCF (E110) or yellow N° 6, which is widely utilized in the alimentary industry.

For the development of this research three variables were taken in consideration, each one presenting three levels. With these is intended to work in a wider range, which allowed us to determinate the optimal physicochemical parameters to obtain the percentage of reduction of the concentration of the sunset yellow FCF.

The determination of the concentration of the sunset yellow FCF was made according spectrophotometric techniques, using a UV spectrophotometer, located in the Instrumentation Laboratory of the Chemical Engineering Faculty of the National University of Callao. In addition to this, color measurements of the solution were made using a colorimeter on the Platinum/Cobalt scale.

Once the percentages of reduction of the concentration of sunset yellow FCF were obtained, a statistical analysis was carried out using the Minitab 18 software, based on the Box Behnken experimental design, thus obtaining the optimal physicochemical parameters corresponding to a pH equal to 3,3434, a concentration of H₂O₂ of 45 ppm and a contact time of 60 minutes.

Finally, from the statistical analysis a percentage of reduction of the concentration of the sunset yellow FCF of 85,1731% is obtained.

Key words : Advanced oxidation processes, Recalcitrant coloring, Spectrophotometric techniques, Box Behnken design.

INTRODUCCIÓN

En la presente tesis se desarrolló la aplicación de Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) con el objetivo de reducir la concentración de un colorante alimentario presente en efluentes, tomando como modelo al amarillo ocaso FCF (E110) empleado principalmente en el sector de molinería, fideos y pastelería.

El estudio se centró fundamentalmente en medir los niveles de reducción de concentración del amarillo ocaso FCF (E110) alcanzados, mediante métodos espectrofotométricos y análisis estadístico con el software Minitab 18, los cuales ayudaron a determinar la influencia de las variables operativas (pH, concentración de peróxido de hidrógeno y tiempo), estableciendo los parámetros fisicoquímicos adecuados de operación.

Para establecer los límites de trabajo de las variables operativas se consultaron referencias nacionales e internacionales, en las cuales se evaluaron la aplicación de procesos de oxidación avanzada para tratar efluentes contaminados con colorantes de diversas industrias.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

El acelerado desarrollo industrial, viene acompañado del aumento de la generación de efluentes, gran parte de los cuales se encuentran contaminados con colorantes. La industria alimentaria no es ajena a este problema, debido al aumento del uso de los colorantes para realzar las propiedades sensoriales de los productos. Ejemplo de esto es el uso del amarillo ocaso FCF (E110), obtenido por síntesis química, empleado como aditivo de color en la industria de bebidas, galletas, repostería, etc.

Los efluentes contaminados con colorantes son una de las principales problemáticas dentro del campo de tratamiento de aguas, debido a su elevada carga orgánica y toxicidad. En especial, aquellos que son obtenidos por síntesis química, porque su compleja y estable estructura química hacen que presenten resistencia a la luz, temperatura, incluso al ataque microbiano o cualquier otro mecanismo de degradación. Por consiguiente, son considerados compuestos altamente recalcitrantes.

Para tratar efluentes industriales que presentan compuestos recalcitrantes, como es el caso del amarillo ocaso FCF (E110), se vienen estudiando los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's). Entre estos procesos los de mayor perspectiva son los de la fotooxidación en sus dos variantes: fotólisis y fotocátalisis. Debido a la serie de ventajas que presentan, como gran reactividad con compuestos orgánicos, oxidación completa de compuestos orgánicos e inorgánicos, entre otros.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos adecuados para determinar el porcentaje de reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110) mediante procesos de oxidación avanzada?

1.2.2. Problemas específicos

- 1) ¿Cuál es la caracterización fisicoquímica de la solución del amarillo ocaso FCF (E110) pre y post aplicación de los procesos de oxidación avanzada?
- 2) ¿Cuál es la influencia de las variables operativas en los procesos de oxidación avanzada para lograr la reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110)?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Establecer los parámetros fisicoquímicos adecuados para determinar el porcentaje de reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110) mediante procesos de oxidación avanzada.

1.3.2. Objetivos específicos

- 1) Determinar las características fisicoquímicas de la solución del amarillo ocaso FCF (E110) pre y post aplicación de los procesos de oxidación avanzada.
- 2) Determinar la influencia de las variables operativas en cada uno de los procesos de oxidación avanzada para lograr la reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110)

1.4. Limitantes de la investigación

Se consideran los siguientes limitantes de la investigación :

- a) No evaluar parámetros de DQO, DBO y COT de la muestra de amarillo ocaso FCF (E110), los cuales reflejan la mineralización y degradación. Según Donoso (2016), el término mineralización refleja la transformación completa de compuestos orgánicos y organometálicos en CO₂, agua e iones inorgánicos. La no evaluación de estos parámetros se debe a que no se cuenta con disponibilidad de equipos fotométricos necesarios para la obtención de los resultados, y al costo elevado de estos análisis en laboratorios comerciales.

- b)** No contar con una muestra de efluente residual industrial que contenga al amarillo ocaso FCF (E110), con la cual se pueda evaluar la eficiencia de tratamiento basado en procesos de oxidación avanzada aplicando los parámetros fisicoquímicos adecuados determinados con la simulación de la reducción de la concentración del E110, desarrollada en la presente tesis.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En el Perú, se vienen realizando estudios acerca de la eliminación de compuestos orgánicos y colorantes de las aguas residuales mediante procesos de oxidación avanzada, entre ellos podemos destacar los siguientes :

- a)** Alegre Zorrilla y Rosales Asención (2017) en su tesis “Influencia del tipo de fotocátalisis y tiempo en el tratamiento de aguas residuales textiles”, evalúan el porcentaje de degradación de un agua residual textil que presenta una coloración roja que es tratada por fotocátalisis homogénea (sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y H_2O_2) y por fotocátalisis heterogénea (dióxido de titanio (TiO_2) y H_2O_2), obteniendo un porcentaje de degradación de materia orgánica y color de 15,90% y 47,80% para fotocátalisis homogénea; y de 66,50% y 50,20% para fotocátalisis heterogénea.
- b)** Churata Salcedo (2017) en su tesis “Degradación del colorante azoico textil naranja II por el método de fotocátalisis heterogénea”, evalúa la degradación del colorante naranja II, usando como fotocatalizador nano partículas (partículas < 100 nm) de TiO_2 , trabajando en un foto-reactor (tubo espiral de 30 cm) colocado sobre un espejo curvo para concentrar la radiación solar durante 3 horas. Obteniendo un 93,06% de degradación, el cual se dio a las condiciones de 300 ppm de fotocatalizador y 2 mL/L de oxidante.
- c)** Delgado Nina y Santander Pacoricona (2017) en su tesis “Remoción de coloración de tintes de teñido en aguas residuales de la industria textil, utilizando procesos de oxidación avanzada (POA)” evalúan el % de remoción del tinte industrial textil Azul Blue (R – 19) utilizando procesos de oxidación avanzada de $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}/\text{O}_3$, $\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}$, $\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ y $\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}/\text{O}_3$; obteniendo una mayor degradación de materia orgánica recalcitrante y remoción de tintes de teñido para el proceso

de oxidación con $\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}/\text{O}_3$ con un 95,44% de remoción, trabajando a un $\text{pH} = 7,8$ y con control de temperatura a 12°C

- d)** Pantoja Cadillo y Portales Tarrillo (2015) en su tesis “Reducción de concentración de amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas mediante UV/ H_2O_2 ” evalúan parámetros tales como pH , concentración de H_2O_2 , y flujo volumétrico, con los cuales lograr el mayor porcentaje de reducción de concentración de amarillo de tartrazina, utilizando un foto – reactor. Mediante tratamiento estadístico determinaron que el grado de acidez óptimo es de $\text{pH} = 4$, la concentración óptima de H_2O_2 de 30,68 ppm y el flujo volumétrico óptimo es de 2,0 L/min, para un tiempo de tratamiento de 20 minutos
- e)** Gamarra Güere (2012), en su tesis “Decoloración y degradación de compuestos tipo Azo mediante el proceso Fenton y Electro – Fenton” evalúa el comportamiento de los reactivos Fenton (peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con sulfato de hierro) y Electro – Fenton (relación óptima de densidad de corriente para la generación de H_2O_2 con sulfato de hierro), para decolorar compuestos AZO, en este caso, naranja de metilo, obteniendo que para una concentración de $6,1 \times 10^{-6}$ M de naranja de metilo, valores óptimos de $1,9 \times 10^{-3}$ M de H_2O_2 y $7,1 \times 10^{-5}$ M de Fe(II) en un tiempo menor a 4 segundos, para el proceso Fenton, y de $3,6 \cdot 10^{-4}$ M de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $I = 0,01$ A ($j = 2,48$ A.m⁻²), burbujeo constante con una bomba de aire 1 600 mL/minuto, agitación constante, para el proceso Electro – Fenton

De igual manera, a nivel internacional, se vienen desarrollando diversos estudios acerca de los procesos de oxidación avanzada, con el propósito de poder establecer las condiciones a las cuales se logren optimizar las variables. Entre ellos podemos destacar los siguientes :

- a)** Donoso (2016), España, en su investigación “Eliminación de colorantes alimentarios en disolución acuosa mediante procesos químicos y electroquímicos de oxidación avanzada” determina que

procesos que actúan con mucha más rapidez, con mayor porcentaje de eliminación de colorantes y mayor porcentaje de mineralización (% de DQO y COT), son aquellos en los que hay una intervención del reactivo Fenton y de radiación ultra violeta. Realizó un diseño estadístico para la oxidación con reactivo Fenton de tartrazina con el objetivo de llegar a optimizar los porcentajes de eliminación del colorante. Las variables operativas que se decidió estudiar fueron el pH de la disolución y las concentraciones iniciales de H₂O₂ e Ion férrico, realizó estas pruebas en fase luminosa y oscura. Obteniendo para un pH muy cercano a 3, y haciendo uso de la fase luminosa una degradación del colorante tartrazina de hasta un 98,13%

- b)** Barrios - Ziolo, Gaviria - Restrepo, Agudelo, y Cardona - Gallo (2015), Colombia, en su investigación “Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales” indican que las técnicas de adsorción pueden adaptarse a diversos tipos de residuos agroindustriales alcanzando una mineralización de colorantes superior al 90%. Entre las tecnologías que más destacan para el tratamiento químico son los procesos fotocatalíticos y fenton/UV, alcanzando la máxima remoción de color al 100% y con una remoción del COT y DQO de 80% y 100% respectivamente, entre los factores principales para optimizar los rendimientos se usan concentraciones de peróxido de hidrógeno que son muy importantes para tener una remoción significativa del color.
- c)** Arroyave Rojas, Garcés Giraldo, y Arango Ruíz (2009), Colombia, en su investigación “Mineralización del colorante tartrazina mediante un proceso de oxidación avanzada”, evalúan el porcentaje de mineralización mediante un proceso de fotocatalisis heterogénea, empleando una lámpara de luz ultravioleta (UV), H₂O₂ y TiO₂; alcanzando porcentajes de mineralización mayor al 93.80 % del colorante Tartrazina. Determinan que la combinación experimental más apropiada corresponde a 50,00 mg/L de TiO₂ y 0,20% v/v H₂O₂,

con un 100% de degradación y 95,1% de mineralización de tartrazina. Determinan la mineralización mediante el empleo de la técnica analítica de sulfatos métodos normalizados.

- d) Gil Pavas, Quintero Olaya, Rincón Uribe, y Rivera Agudelo (2006), Colombia, en su investigación “Degradación de colorantes de aguas residuales empleando UV/TiO₂/H₂O₂/Fe⁺²”, hicieron uso de procesos de oxidación avanzados para tratar aguas residuales provenientes de la producción de bebidas isotónicas, utilizando un foto – reactor cilindro parabólico compuesto (CPC), en operación semibatch; a través de las pruebas experimentales obtuvieron parámetros adecuados para mineralizar por fotocatalisis heterogénea, a pH 3,0; [TiO₂] = 0,28 g/L y [H₂O₂] = 1,20 g/L, con un porcentaje de decoloración de 97,88%; para fotocatalisis homogénea se trabajó a pH = 3,0 manteniéndolo constante, concentración de H₂O₂ = 3,0 g/L con un porcentaje de decoloración del 99,65%, las pruebas se realizaron en un tiempo de 2 horas a la temperatura ambiente.
- e) Urkiaga Guinea, Gómez Resa, Gutiérrez Ruiz, y de las Fuentes Intxausti (2002), España, en su investigación “Aplicación de procesos de oxidación avanzada al tratamiento de efluentes de diversos sectores industriales” evalúan corrientes de aguas residuales industriales provenientes de diferentes procesos productivos (con elevada concentración de alcohol isopropílico, presencia de un desmoldeante de caucho de elevado peso molecular y elevado contenido de fenol y formaldehído), los cuales se trataron en presencia de lámparas policromáticas utilizando fotocatalisis homogénea, combinando H₂O₂, UV y Fe; y fotocatalisis heterogénea empleando TiO₂. Para cada caso evaluaron la influencia del pH para la reducción de la carga contaminante. Fue la fotocatalisis homogénea la que generó los rendimientos más prometedores, en un medio ácido (pH = 3 – 5), consiguiéndose reducciones de DQO mayores al 90% en todos los casos.

2.2. Marco teórico científico

Dentro del marco teórico se abarcará información acerca de la generación de efluentes industriales en la industria alimentaria y sus contaminantes; clasificación y características de colorantes alimentarios, en especial del colorante en estudio, el amarillo ocazo FCF (E110); y métodos usados para el tratamiento de estos efluentes. Nos centraremos en el estudio de los procesos de oxidación avanzada, principalmente en aquel que usa la combinación de H₂O₂ y UV. Finalmente, se presentarán las características del equipo de oxidación avanzada que se empleó para el desarrollo de los experimentos.

2.2.1. Efluentes de la industria de alimentos

Hasta abril del presente año, la industria de alimentos y bebidas representaba el 16,8% de las unidades manufactureras del Perú, siendo superada solo por la industria textil y cuero que presentó un 30,8%. Aportando el 27% del PBI industrial, siendo las actividades de molinería, fideos, pastelería y otros, las que presentan mayor participación dentro del sector alimentario con 5,6% (Sociedad Nacional de Industrias, 2018)

El gran requerimiento de agua en la industria alimentaria genera grandes cantidades de agua residual. Como resultado, es de vital importancia la recuperación y reutilización de este recurso natural para disminuir las necesidades de abastecimiento y reducir los costos de producción. En el pasado, los procesadores de alimentos reunían toda el agua residual de los distintos procesos y la sometían a un solo tratamiento. Sin embargo, separar el agua residual de cada uno de los procesos permite un tratamiento óptimo para cada tipo de agua residual, como resultado, se ahorra energía, se incrementa la eficiencia de los sistemas y se disminuyen los costos respecto al tratamiento. (Escalante - Pozos & Bandala, 2014)

En los últimos años, los avances en los métodos analíticos han permitido la detección de concentraciones muy bajas (de orden de ng L⁻¹) de diversos compuestos en aguas que hasta ahora no se analizaban. De

entre todos los tipos de contaminantes, un grupo de compuestos recalcitrantes está formado por colorantes sintéticos, los cuales se descarga en el medio acuático en gran cantidad a partir de actividades industriales de manufactura y teñido, primordialmente. Estos compuestos son muy difíciles de degradar, principalmente porque suelen presentar una estructura muy compleja que los hace bastante estables y, en consecuencia, poco biodegradables.(Donoso, 2016)

En las siguientes tablas podemos observar la compilación de información presentada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), acerca del volumen generado de vertimientos de aguas residuales industriales por actividad económica **(Ver Tabla N° 2.1, pág. N° 20)** y por departamento para el sector industrial **(Ver Tabla N° 2.2 pag. N° 21)** en los “Anuario de Estadísticas Ambientales” de los años 2016 y 2017. Y en las gráficas se presenta la información expresada en porcentaje de la información presentada en la **Tabla N° 2.1 (Ver pág. N° 21)** y **Gráfico N° 2.1 (Ver pág. N° 21)** y **Tabla N° 2.2 (Ver pág. N° 21)** y **Gráfico N° 2.2 (Ver pág. N° 21)**, los colorantes pueden ser naturales, si son extraídos de una sustancia vegetal, animal o mineral o sintéticos, si son productos modificados química o físicamente. Entre los colorantes naturales se distinguen los hidrosolubles, solubles en agua, los liposolubles o solubles en la grasa y los minerales. Entre los colorantes artificiales o sintéticos se distinguen los colorantes azoicos y no azoicos, los colorantes pueden ser naturales, si son extraídos de una sustancia vegetal, animal o mineral, o sintéticos si son productos modificados químicamente o físicamente. Entre los colorantes naturales se distinguen los hidrosolubles, solubles en agua, los liposolubles o solubles en la grasa y los minerales. Entre los colorantes artificiales o sintéticos se distinguen los colorantes azoicos y no azoicos (Sanchez Juan, 2013)

2.2.2. Colorantes alimentarios

En la industria alimentaria los aditivos son ampliamente utilizados debido a sus propiedades para prolongar la calidad de los productos, manteniendo así un aspecto atractivo, aroma y sabor a lo largo de su vida útil. Dentro del amplio grupo de aditivos alimentarios, son los colorantes los que resaltan por su importancia debido a que prolongan la apariencia física e influyen en el sabor percibido por el consumidor. Un colorante es más apreciado cuando logra unirse al material base y no se decolora con el tiempo.

Los colorantes pueden ser naturales, si son extraídos de una sustancia vegetal, animal o mineral, o sintéticos, si son productos modificados química o físicamente. Entre los colorantes naturales se distinguen los hidrosolubles, solubles en agua, los liposolubles o solubles en la grasa, y los minerales. Entre los colorantes artificiales o sintéticos se distinguen los colorantes azoicos y no azoicos (Sanchez Juan, 2013)

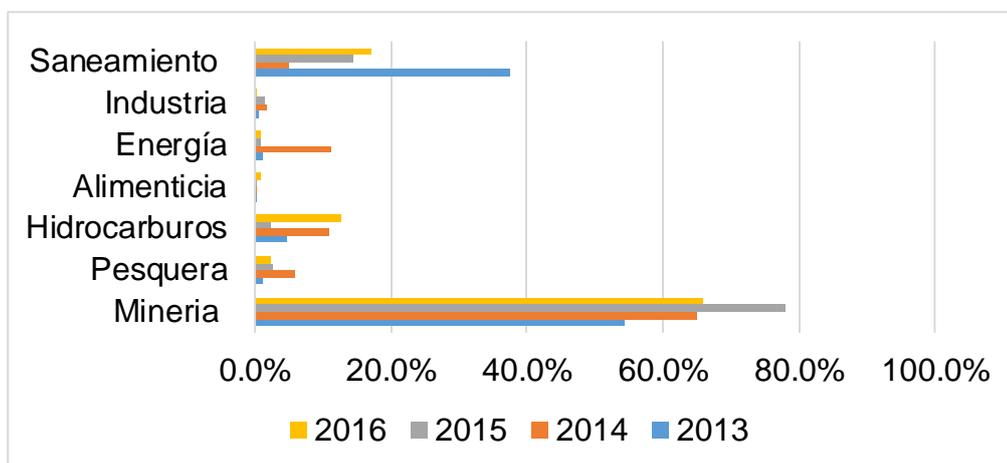
TABLA N° 2.1

VOLUMEN ANUAL DE VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES AUTORIZADAS POR ACTIVIDAD ECONÓMICA

SECTOR INDUSTRIAL	VOLUMEN GENERADO EN MILES DE METROS CÚBICOS			
	2013	2014	2015	2016
Minería	529 415,94	96 788,39	304 773,12	249 096,15
Pesquera	11 196,53	8 658,64	9 753,74	8 342,90
Hidrocarburos	46 221,55	16 247,72	9 461,96	47 467,06
Alimenticia	4 018,53	274,05	422,63	3 579,73
Energía	12 705,35	16 917,56	3 481,96	3 010,23
Industria	4 340,77	2 449,93	5 946,25	1 324,05
Saneamiento	366 192,59	7 645,91	56 256,18	64 324,98
Agricultura	299,59	108,56	92,87	279,11
TOTAL	974 390,85	149 090,75	390 188,72	377 424,19

Fuente : (INEI, 2016), (INEI, 2017)

GRÁFICO N° 2.1
VOLUMEN PORCENTUAL ANUAL DE VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES AUTORIZADAS POR ACTIVIDAD ECONÓMICA



Fuente : (INEI, 2016), (INEI, 2017)

TABLA N° 2.2
VOLUMEN ANUAL DE VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN EL SECTOR ALIMENTICIO, AUTORIZADAS SEGÚN DEPARTAMENTO

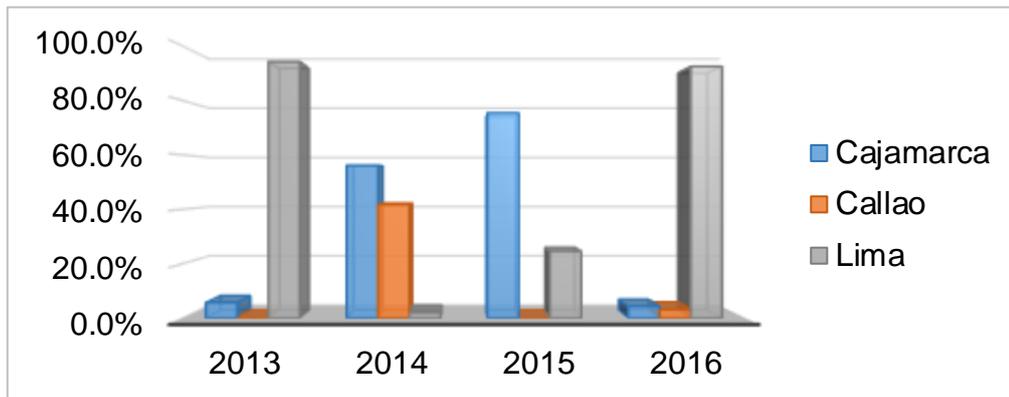
DEPARTAMENTO	VOLUMEN GENERADO EN MILES DE METROS CÚBICO			
	2013	2014	2015	2016
Cajamarca	230,01	154,04	318,74	154,04
Callao	---	114,41	---	114,41
Lima	3 788,52	5,60	103,89	3 311,28
TOTAL	4 018,53	274,05	422,63	3 579,73

Fuente : (INEI, 2016), (INEI, 2017)

En la **Tabla N° 2.3** se puede observar ejemplos de los colorantes más usados en la industria alimentaria, clasificados según su naturaleza.

GRÁFICO N° 2.2

VOLUMEN PORCENTUAL ANUAL DE VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN EL SECTOR ALIMENTICIO, AUTORIZADAS SEGÚN DEPARTAMENTO



Fuente : (INEI, 2016), (INEI, 2017)

TABLA N° 2.3

COLORANTES SEGÚN SU NATURALEZA

TIPO	COLORANTE	
Colorante natural hidrosoluble	Curcumina (E100) Cochinilla (E120) Batanina (E162)	Riboflavina (E101) Caramelo (E150) Antocianos (E163)
Colorante natural hiposoluble	Clorofilas (E140 y 141) Xantofilas (E161) Carotenoides (E160)	
Minerales	Carbón vegetal (E153) Dióxido de titanio (E171) Aluminio (E173) Oro (E175)	Carbonato cálcico (E170) Hidróxidos de hierro (E172) Plata (E174)
Colorantes sintéticos azoicos	Tartrazina (E102) Azorrubina (E122) Rojo Ronceau 4R (E124) Rojo allura AC (E129) Marrón Fk (E154) Litol Rubina BK (E180)	Amarillo Ocaso FCF (E110) Amaranto (E123) Rojo 2G (E128) Negro brillante BN (E151) Marrón HT (E155)
Colorantes sintéticos azoicos no	Amarillo de quinoleína (E104) Azul patentado V (E131) Azul brillante FCF (E133)	Eritrosina (E127) Indigotina (E132)

Fuente : (Sanchez Juan, 2013)

Para determinar la concentración que presenta un efluente, se pueden utilizar técnicas espectrofotométricas las cuales se basan en la absorción de radiaciones electromagnéticas, donde la cantidad de luz absorbida depende de forma lineal de la concentración. En la **Tabla N° 2.4** se presentan los colores absorbidos y reflejados, y su rango de longitud de onda correspondiente.

TABLA N° 2.4
RELACIÓN ENTRE LAS LONGITUDES DE ONDA Y COLORES
ABSORBIDOS Y REFLEJADOS

LONGITUD DE ONDA	COLOR DE LUZ QUE SE ABSORBE	COLOR DE LUZ QUE SE REFLEJA
650 – 780 nm	Rojo	Verde azulado
595 – 650 nm	Naranja	Azul verdoso
580 – 595 nm	Amarillo	Azul
490 – 580 nm	Verde	Rojo
435 – 490 nm	Azul	Amarillo
390 – 435 nm	Violeta	Amarillo verdoso

Fuente : (Restrepo Gallego, 2007)

- a) **Amarillo Ocaso FCF (E110).**- Según la **Tabla N° 2.3 (Ver pág. N° 22)**, el colorante amarillo FCF (E110) se clasifica según su naturaleza como un colorante sintético azoico.

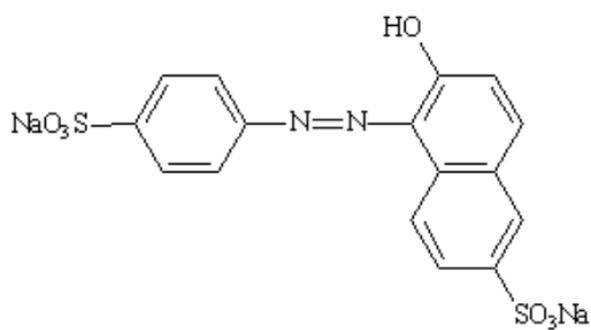
Químicamente es la sal disódica del ácido 6 – hidroxí – 5 – [(4 – sulfofenil) fenilazo] – 2 – naftalenosulfónico en conjunto con agentes secundarios de color que ligado con el cloruro de sodio o sulfato de sodio componen la parte no colorida de este ingrediente. (FAO, 2008)

Es de color amarillo intenso al naranja brillante. Se obtiene derivado del petróleo. Pertenece al grupo de colorantes azoicos. Es frecuente su combinación con otros colorantes como la tartrazina (E102), o la mezcla con amaranto (E123) para así fabricar colorante marrón. Su nivel de toxicidad es ALTA. Se emplea en sopas instantáneas, fideos chinos, bebidas en polvo, batidos, néctares,

zumos, jugos, galletas, flanes, gelatinas, yogures, snacks, fritos, harinas, conservas, productos ahumados, pastelería, mermeladas, y en salchichas. También se utiliza de forma habitual como colorante alimentario para arroz y paellas, en medicamentos de farmacia y productos multivitaminas. (Anónimo, 2016)

FIGURA N° 2.1

ESTRUCTURA QUÍMICA DEL AMARILLO OCASO FCF



Fuente : (FAO, 2008)

El amarillo ocaso es soluble en agua, glicerina, propilenglicol y prácticamente insoluble en etanol. Es altamente estable al calor, soporta temperaturas de horneado, además de ser estable ante la luz, medios ácidos y neutros. En solución acuosa se observa una coloración amarilla – naranja y en soluciones básicas se torna roja – café. En ácido sulfúrico se torna naranja y al diluir en agua la solución se vuelve amarilla (Ingredia, s.f.)

La Ingesta Diaria Aceptable (IDA) del Amarillo Ocaso, según las recomendaciones de la FAO/OMS, es de 0 – 2,5 mg/Kg de peso corporal. Para el caso de este ingrediente la FDA requiere de una certificación especial para validar su pureza y autenticidad cada vez que se elabora un nuevo lote de color. De esta manera se asegura la inocuidad del ingrediente (Ingredia, s.f.)

2.2.3. Tratamiento de efluentes residuales

Los efluentes industriales deben ser sometidos a tratamiento para reducir su carga contaminante antes de su reproceso o eliminación, con el fin de elevar la calidad y cumplir normas legales.

En la actualidad existen diversos métodos mediante los cuales se pueden tratar los efluentes industriales, dependiendo de la naturaleza de la misma. El agua contaminada puede ser tratada, en general, por métodos físicos, químicos y biológicos (Escalante - Pozos & Bandala, 2014). La elección del tipo de tratamiento debe estar sometido a una investigación, en la que se consideren a parte de la naturaleza del efluente, factores externos como aspectos económicos, marco legal, etc. (Donoso, 2016)

A continuación presentamos los tipos de tratamiento que se encuentran dentro de los grupos de tratamientos físicos, químicos y biológicos.

a) Tratamientos físicos.- En este tipo de tratamiento predomina la acción de fuerzas físicas, y son conocidas como operaciones unitarias, fueron los primeros tipos de tratamiento de aguas utilizados. En su mayoría presentan bajo coste y bajo impacto ambiental. (Donoso, 2016)

Dentro de estos tenemos a los procesos de adsorción, sistemas de filtración, y las resinas de intercambio iónico como las más importantes. Existiendo una influencia del pH sobre las cinéticas de adsorción, en el que a condiciones ácidas se favorece la remoción de colorantes ácidos, directos, reactivos y dispersos, mientras que en medios alcalinos se favorece la remoción de colorantes básicos (Barrios - Ziolo et al., 2015)

b) Tratamientos biológicos.- Consiste en provocar el desarrollo de microorganismos capaces de asimilar la materia orgánica a la que transforman en nuevos microorganismos y fáciles de retirar del agua por decantación. Al reducir la materia orgánica disuelta se consigue

reducir la demanda de oxígeno, biológica o química, y la toxicidad, además mejora las cualidades de color, sabor y aspecto externo. (Donoso, 2016)

Entre los procesos aplicados para el tratamiento biológico de efluentes con presencia de colorantes y pigmentos, los tratamientos anaerobios producen una remoción de DQO y color entre el 80% y 100% entre periodos que oscilan entre los 2 y 58 días, mientras que la secuencia de tratamientos anaerobia – aerobia, presenta rendimiento en los valores de remoción de color, DQO, COT sobre el 60%, 80% y 90% respectivamente, con la utilización de co – sustratos como almidón, glucosa y ácido acético y, en tiempos de residencia hidráulicos de 16 horas y 8 días (Barrios - Ziolo et al., 2015)

c) Tratamientos químicos.- Los métodos químicos se aplican generalmente para el tratamiento de compuestos orgánicos peligrosos presentes en bajas concentraciones y pueden servir en algunas ocasiones como pre – tratamiento antes de los procesos biológicos. Se basan en la oxidación de los compuestos orgánicos mediante oxidantes químicos como cloro, permanganato de potasio y peróxido de hidrógeno. Siendo el cloro y el peróxido de hidrógeno los reactivos más utilizados. (Donoso, 2016)

Dentro del grupo de tratamientos químicos se presentan algunas técnicas como: ultrasonido, procesos de coagulación / floculación y electrocoagulación, entre otras tecnologías. Alcanzando porcentajes de remoción superior al 90% en medios ácidos (Barrios-Ziolo et al., 2015)

Sin embargo, el uso de los métodos convencionales no está completamente aceptado en la actualidad debido a que suelen resultar económicamente no sustentable y conlleva a problemas operacionales. Además, no es muy eficiente para el tratamiento de contaminantes persistentes en agua, como es el caso de los colorantes. Por ello, es necesario adoptar sistemas más modernos

como por ejemplo los procesos de oxidación avanzada. (Donoso, 2016)

2.2.4. Procesos de oxidación avanzada

Las tecnologías basadas en la aplicación de Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) se basan en la destrucción de contaminantes por medio de radicales libres hidroxilos OH^* (Arroyave Roja, Garcés Giraldo, Arango Ruiz, & Agudelo López, 2008)

Los POA's abarcan 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 OH^* (Arroyave Rojas et al., 2009) Se trata de una familia de métodos en los que se incluyen todos los procesos catalíticos y no catalíticos que utilizan la elevada capacidad oxidante del radical OH^* , y que se diferencian entre sí en la forma en la que generan dicho radical (Donoso, 2016)

Los POA's son tecnologías compatibles con el medio ambiente y en base a ellos se viene desarrollando procesos competitivos desde un punto de vista económico. La viabilidad de los POA's depende de la eficacia del radical OH^* , que es la segunda especie conocida con mayor poder oxidante después del flúor. (Donoso, 2016) En la **Tabla N° 2.5 (Ver pag. N° 29)** se indican los potenciales de oxidación de distintas especies.

Una forma de clasificar los POA's es en función de la fuente de generación de la especie oxidante, es decir, el método para generar el radical hidroxilo. Esta clasificación se muestra en la **Tabla N° 2.6 (Ver pag. N° 30)**, donde se recogen los principales tipos de POA's. La amplia variedad de técnicas disponibles evidencia la versatilidad de los POA's (Donoso, 2016)

Las principales ventajas de los POA's respecto a los métodos tradicionales son :

- a) Transforman y destruyen químicamente el contaminante hasta la mineralización.

- b) En general, no general subproductos que requieran posterior procesamiento.
- c) Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- d) Operan en rangos donde los sistemas convencionales no son factibles
- e) Son ideales para preparar las corrientes a tratamientos convencionales. Aumenta la biodegradabilidad (Forero, 2005)

2.2.5. Radical hidroxilo

Los radicales libres hidroxilos (OH^{\bullet}) tienen la propiedad de ser altamente oxidantes, dichos radicales reaccionan con el contaminante y lo transforman en compuestos inocuos al medio ambiente (Arroyave Roja et al., 2008). Incluso, los OH^{\bullet} pueden modificar la estructura química de los compuestos orgánicos recalcitrantes convirtiéndolos en compuestos más simples, de menor masa molecular, menos tóxicos a los microorganismos y, en consecuencia, más biodegradables (Rodríguez, Botelho, & Cleto, 2008)

2.2.6. Sistema H_2O_2/UV

El H_2O_2 es un oxidante versátil, capaz de producir radicales hidroxilo vía catálisis en presencia o ausencia de radiación, utilizado con la finalidad de remover materia orgánica. Es una solución atractiva para la reducción de compuestos recalcitrantes presentes en efluentes industriales debido a su capacidad selectiva, que puede ser ajustada realizando cambios en el pH, temperatura, tiempo de reacción y adición de catalizadores. Sin embargo, el exceso de H_2O_2 y altas concentraciones de OH^{\bullet} originan reacciones competitivas que producen efectos inhibitorios en la degradación de compuestos.

Esto se puede apreciar en las siguientes reacciones, en las que se verifica que el H_2O_2 en contacto con los OH^{\bullet} forma un radical menos reactivo, el HO_2^{\bullet} , lo que conduce a una disminución del poder oxidativo del proceso. Por ello debe determinarse la dosis óptima de H_2O_2 , para

que no se presenten efectos negativos en la degradación de los compuestos orgánicos (Rodríguez et al., 2008)

TABLA N° 2.5
POTENCIALES DE OXIDACIÓN DE DISTINTAS ESPECIES

ESPECIE	E° (V, 25°C)
Flúor	3,03
Radical hidroxilo	2,08
Oxígeno atómico	2,42
Ozono	2,07
Peróxido de hidrógeno	1,78
Radical perhidroxilo	1,70
Permanganato	1,68
Dióxido de cloro	1,57
Ácido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Yodo	0,54

Fuente : (Pey Clemente, 2008)



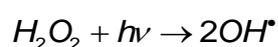
La luz ultravioleta actúa mediante la interacción con las moléculas presentes en el medio líquido provocando en la mayoría de los casos, una ruptura de los enlaces químicos. Para que la fotólisis ocurra (disociación) es necesario la absorción de un fotón por la molécula y además que la energía del fotón exceda la energía del enlace que se quiere destruir (Rodríguez et al., 2008)

TABLA N° 2.6
CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA (POAs)	
Fotólisis	Fotólisis Fotólisis VUV
Procesos basados en el empleo de ozono	O ₃ O ₃ /UV O ₃ /H ₂ O ₂ O ₃ /H ₂ O ₂ /UV
Procesos basados en el empleo de H₂O₂	UV/H ₂ O ₂ Fenton Fenton – like Foto – Fenton
Oxidación en condiciones severas	Oxidación supercrítica Oxidación subcrítica Oxidación húmeda (WO) Oxidación húmeda catalítica (WCO)
Fotocatálisis	
Oxidación electroquímica	
Oxidación por ultrasonidos	
Radiaciones electromagnéticas	

Fuente : (Donoso, 2016)

El proceso combinado de H₂O₂/UV tiene la capacidad de acelerar la generación de radicales OH^{\bullet} que son capaces de transformar diversos compuestos orgánicos recalcitrantes en productos más biodegradables y menos peligrosos, proporcionando, de esta forma, mejoras para la tratabilidad de los efluentes industriales. El mecanismo ocurre por la acción de la radiación emitida por las lámparas UV (con longitudes de onda menores de 400nm) que son capaces de fotolizar las moléculas de H₂O₂. El mecanismo propuesto para la fotólisis del H₂O₂ es el rompimiento de la molécula por fotones produciendo dos radicales OH^{\bullet} , como se observa en la siguiente reacción (Rodríguez et al., 2008) :



Reacción 5

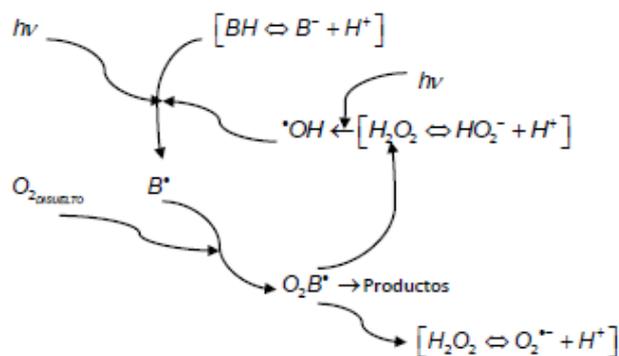
Generalmente, se utilizan para la disociación del peróxido de hidrogeno lámparas UV con emisión máxima de 254 nm, debido a que la

absorción del H_2O_2 alcanza su máximo a los 220 nm. Debe tomarse en consideración 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 H_2O_2 /UV en el tratamiento de los efluentes (Donoso, 2016)

La fotólisis de un compuesto orgánico en disolución acuosa catalizada por la presencia de peróxido de hidrógeno es un proceso muy complejo que, de forma resumida, se esquematiza en la **Figura N° 2.2**, la cual muestra el mecanismo de reacciones más comúnmente aceptado para la misma (Donoso, 2016)

FIGURA N° 2.2

MECANISMO DE REACCIÓN DE LA COMBINACIÓN UV/ H_2O_2 SOBRE LA MATERIA ORGÁNICA



Fuente : (Donoso, 2016)

Este mecanismo considera que en la primera etapa tiene lugar la degradación fotolítica de peróxido de hidrógeno (**Reacción 5**) Una vez formados estos radicales altamente reactivos, reaccionan a continuación con el compuesto orgánico mediante diferentes mecanismos: abstracción de un átomo de hidrógeno, adición a dobles enlaces $\text{C} = \text{C}$ o transferencia de electrones, dependiendo de la naturaleza y grupos funcionales del compuesto orgánico.

La vía de reacción más general es la abstracción de un átomo de hidrógeno y producción del consiguiente radical orgánico B^\bullet , que a su vez reacciona rápidamente con O_2 disuelto para formar el radical orgánico peróxido O_2B^\bullet . Estos radicales orgánicos se descomponen mediante reacciones bimoleculares dando lugar a los diferentes productos de degradación del compuesto de partida junto con otros subproductos tales como peróxido de hidrógeno, radicales hidroperóxido, formaldehído, etc. (Donoso, 2016)

En resumen, existe un ciclo de descomposición y formación simultánea de peróxido de hidrógeno cuyo resultado global dependerá de diversas variables, como la intensidad de la radiación ultravioleta, la temperatura, el pH y la naturaleza de los compuestos orgánicos. Este tratamiento es considerado como uno de los procesos de oxidación avanzada más viable. Es preferible con respecto a la ozonización porque es menos sensible a la naturaleza y concentración de las especies contaminantes. (Donoso, 2016)

2.2.7. Efectos de las variables en las POA's

Las variables consideradas para este caso son el pH, tiempo de exposición a la radiación UV, temperatura.

a) pH.- (Rodríguez et al., 2008) recomienda adicionar ácido para disminuir el pH y trabajar en la franja de 2,5 a 3,5, debido a que de esta forma, se tendrían alteraciones en el equilibrio ácido carbónico – bicarbonato-carbonato, desfavoreciendo la formación más ácida, H_2CO_3 . Este equilibrio es importante, porque los iones carbonato y bicarbonato son conocidos secuestradores de OH^\bullet

En las pruebas experimentales realizadas por (Urkiaga Guinea et al., 2002) reporta que los rendimientos más prometedores los lograron mediante fotocatalisis homogénea con peróxido de hidrógeno y luz UV a pH ácido entre 3,0 y 5,0

b) Tiempo de exposición a la radiación UV.- En las pruebas experimentales realizadas por (Alegre Zorrilla & Rosales Asención,

2017), determinan que la degradación de los contaminantes presentados presenta una relación directa con el tiempo de contacto. Para este caso, obtuvieron tiempos óptimos cercanos a las 3 horas de tratamiento. Sin embargo, según Barrios - Ziolo et al. (2015) el proceso fotocatalítico alcanza la máxima cinética de remoción de color (100%) durante periodos de tratamiento inferior a 90 minutos. Esto queda comprobado con las pruebas experimentales realizadas por Pantoja Cadillo y Portales Tarrillo (2015), en las que obtuvieron los parámetros de reducción de color óptimos para un tiempo de 20 minutos.

- c) **Temperatura.**- Según Herrmann (2006), citado por (Alegre Zorrilla & Rosales Asención, 2017), la temperatura óptima se encuentra comprendida en un rango de 20°C a 80°C, debido a que en este rango, la energía de activación a menudo es muy pequeña, pudiendo realizar POA's a temperatura ambiente, sin que llegue a verse afectado la constante de velocidad de reacción.

2.2.8. Equipo de oxidación avanzada

El equipo AOP – 2 es una unidad compacta, de fácil transporte, instalación y desmontaje. El sistema posee un tanque de preparación de químicos con una capacidad de 250 L, cuenta con un equipo de radiación ultravioleta, un dosificador de H₂O₂ en cualquiera de sus diluciones, un rotámetro y un manómetro, que permitirán controlar las condiciones de operación. (Eco Innovación, 2014)

En la **Tabla N° 2.7 (Ver pag. N° 34)** se presentan los parámetros técnicos del equipo de oxidación avanzada AOP – 2

En la **Figura N° 2.3 (Ver pág. N° 35)** se presenta el diseño del equipo de oxidación avanzada AOP – 2. Donde: La línea L – 1 es la succión y la línea L – 2 es la descarga de la bomba, la línea L – 3 sirve para regular el ingreso del flujo al equipo de radiación ultravioleta. La línea L – 4 es la que contiene la muestra tratada, y de la cual se tomarán las muestras para su posterior análisis. En la **Figura N° 2.4 (Ver pág. N° 36)**

se presenta el diagrama de flujo del equipo de oxidación avanzada AOP – 2

El equipo de radiación ultravioleta se ha diseñado en función a la curva de Flujo vs Dosis ubicado en la **Figura N° 2.5 (Ver pag N° 37)** el equipo es el S5QPA, al trabajar con un flujo de 2 GPM aseguramos una radiación superior a 50 mJ/cm², lo cual nos brinda energía para descomponer el H₂O₂ en radicales libres rápidamente, los cuales a su vez generan una rápida acción para la degradación de compuestos de alto peso molecular. (Eco Innovación, 2014)

TABLA N° 2.7

PARÁMETROS TÉCNICOS DEL EQUIPO DE OXIDACIÓN AVANZADA

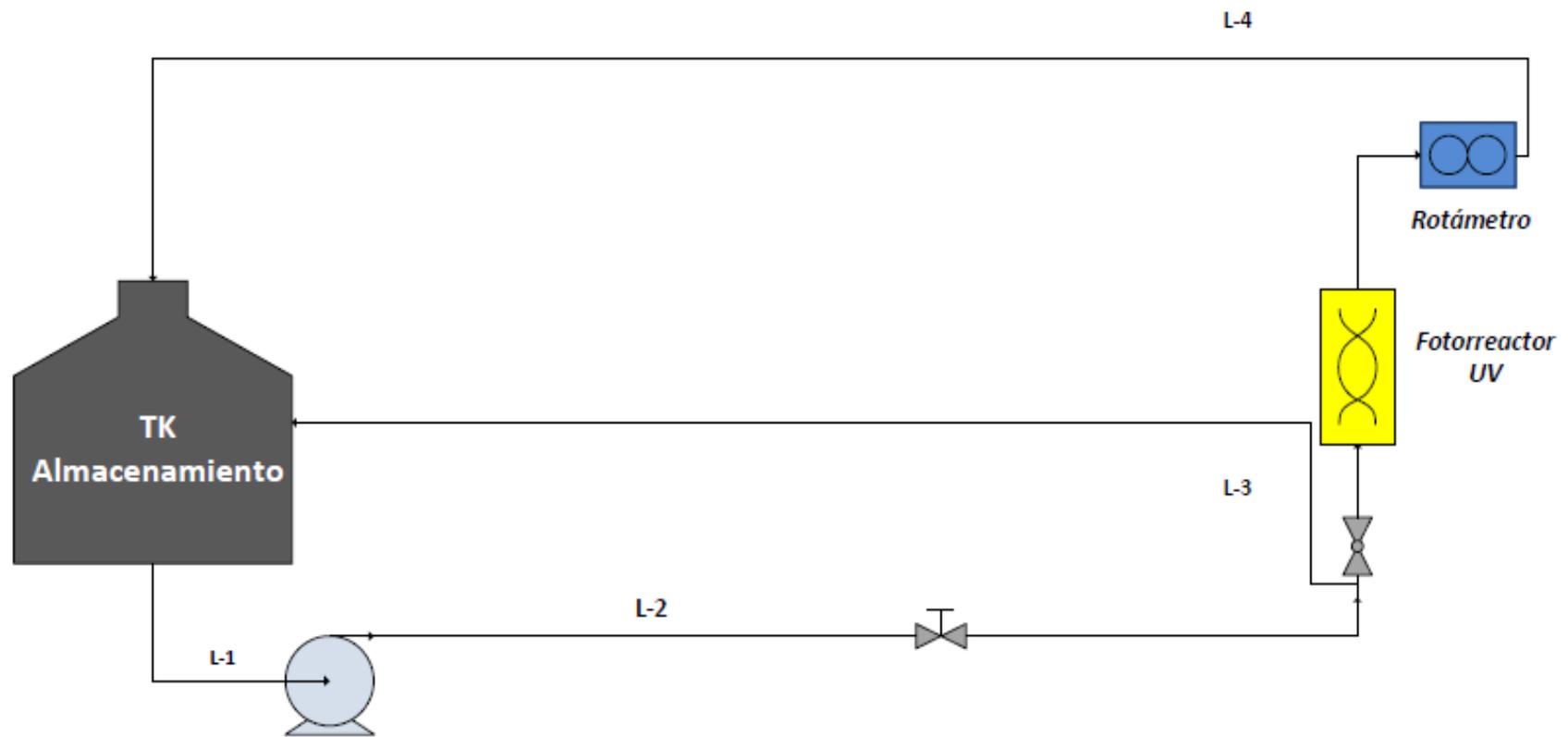
DESCRIPCIÓN	AOP – 2
Capacidad de procesamiento	2 - 5 GPM
Material de la estructura	Acero al carbono con pintura epóxica
Peso seco	200 Kg
Suministro de energía	220 V x 60 Hz

Fuente : (Eco Innovación, 2014)

2.3. Definición de términos básicos

a) Efluentes industriales.- Término empleado para las aguas residuales emitidas por las industrias provenientes de los diversos procesos que ocurren en las mismas. Siendo los efluentes de las industrias alimentaria y textil, principalmente, los que generan mayor volumen de efluentes industriales coloreados. Según Donoso (2016) se pierde entre 1% y 2% de colorante durante la producción, terminando estos impregnados en los efluentes.

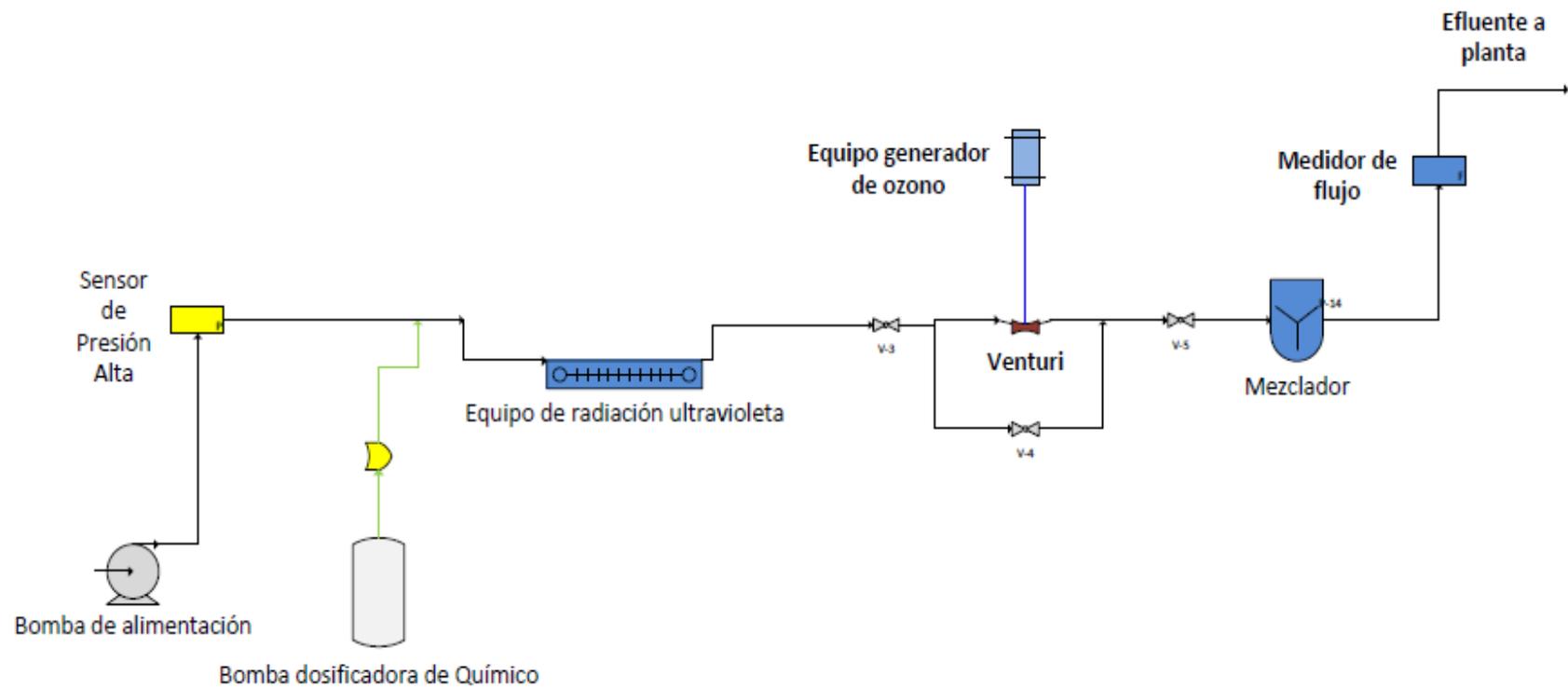
FIGURA N° 2.3
EQUIPO DE OXIDACIÓN AVANZADA



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 2.4

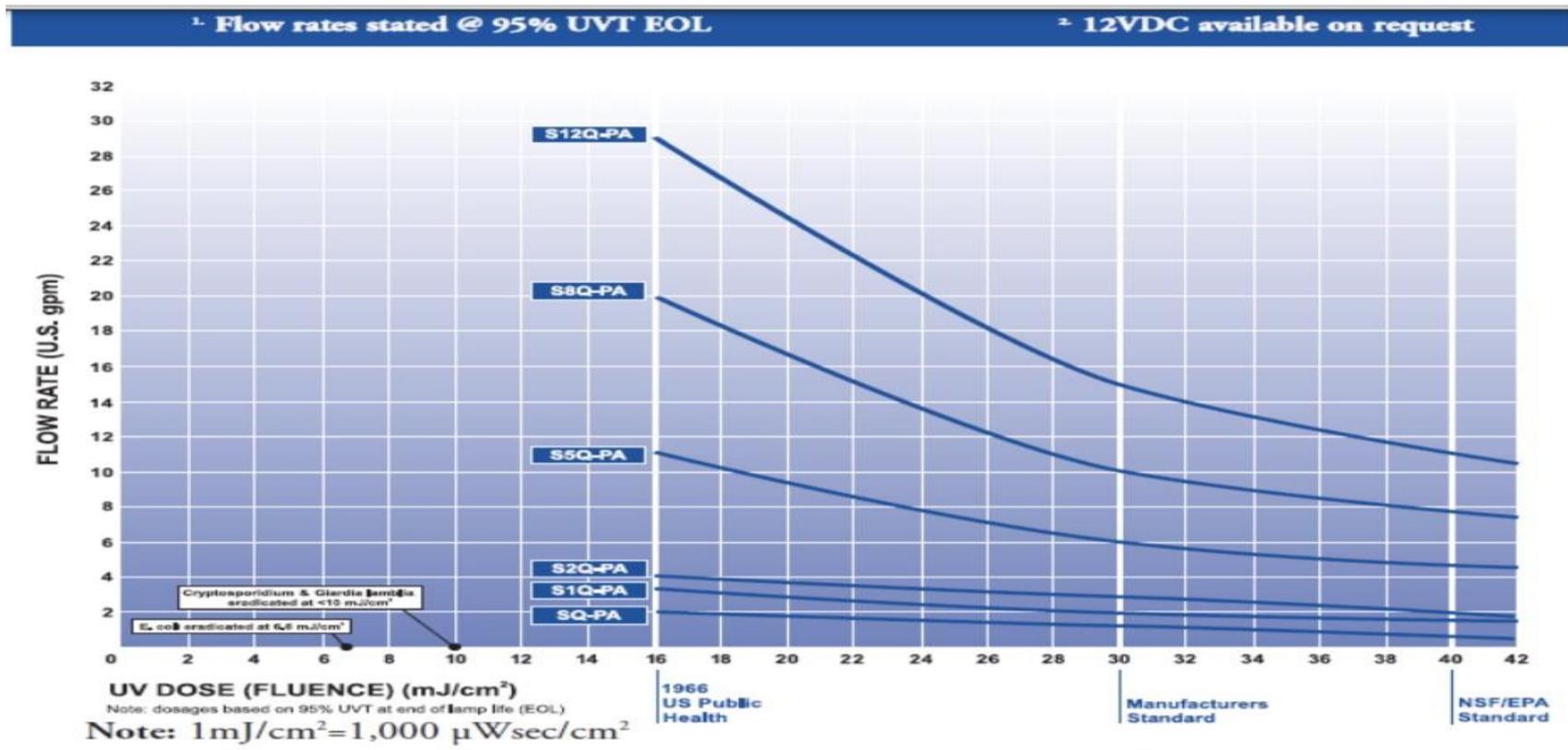
DIAGRAMA DE FLUJO – PLANTA PILOTO DE OXIDACIÓN AVANZADA



Fuente : (Eco Innovación, 2014)

FIGURA N° 2.5

GRÁFICO DE FLUJO – DOSIS UV



Fuente : (Eco Innovación, 2014)

- b) Compuestos recalcitrantes.**- Según Rodríguez et al. (2008) un compuesto recalcitrante es tóxico para los microorganismos, presenta estructuras químicas muy estables y resistentes al ataque biológico o posee elementos estructurales que raramente se encuentran en la naturaleza.
- c) Fotocatálisis.**- Según Garcés Giraldo, Mejía Franco, y Santamaría Arango (2004) la fotocatálisis puede ser definida como la “aceleración de una fotorreacción 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.
- d) Grado de acidez.**- O 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.
- e) Diseño Estadístico de Experimentos (DOE).**- Metodología de investigación, mediante la cual se pretende establecer la influencia de los factores analizados en la respuesta del proceso estudiado. Así mismo evaluar las interacciones entre estos factores sobre la respuesta, y determinar óptimos dentro de los límites de estudio. (Donoso, 2016)
- f) Diseño de superficie de respuesta.**- El diseño de superficie de respuesta, se aplica para modelar en forma de función la variable de respuesta del proceso, considerando la influencia de los factores y de las interacciones de factores dentro del proceso. (Donoso, 2016)
- g) Ecuación de regresión.**- Es la ecuación obtenida a partir del modelamiento mediante el diseño de superficie de respuesta, la cual nos permitirá pronosticar, mediante los predictores (factores), la variable de respuesta del proceso.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

Si se utilizan los procesos de oxidación avanzada basados en el empleo de H₂O₂, UV, estableciendo los parámetros fisicoquímicos adecuados, mejorará el sistema de reducción de la concentración de amarillo ocaso FCF (E110)

3.1.2. Hipótesis específicas

- 1)** Es posible determinar las características fisicoquímicas de la solución de amarillo ocaso FCF (E110) mediante procesos basados en el empleo de H₂O₂, UV
- 2)** Es posible determinar la influencia de las variables operativas en cada uno de los procesos basados en el empleo de H₂O₂, UV para lograr la reducción de la concentración de amarillo ocaso FCF (E110)

3.2. Operacionalización de las variables

Las variables en el presente proyecto se dividen en dos, una variable dependiente y una variable independiente, las cuales se presentan en la **Tabla N° 3.1 (Ver pág. N° 39)** en la cual se presenta la definición conceptual.

TABLA N° 3.1

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES
(Y) = Reducción de la concentración del colorante amarillo ocaso FCF (E110)	Reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110) en solución acuosa mediante procesos de oxidación avanzada empleando combinaciones de H ₂ O ₂ , UV	Y₁ = Concentración del colorante amarillo ocaso FCF (E110)	Se realizarán pruebas espectrofotométricas a longitud de onda óptimo (λ_{optimo}) para determinar la concentración real del amarillo ocaso FCF (E110)	Y₁ = g colorante/L solución
VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES
(X) = Procesos de Oxidación Avanzada	Proceso foto – catalítico homogéneo o heterogéneo capaz de producir cambios en la estructura de los contaminantes.	X₁ = Concentración del H ₂ O ₂	Se realizarán pruebas experimentales con tres concentraciones diferentes (15 ppm, 30 ppm y 45 ppm)	X₁ = ppm
		X₂ = pH	Se realizarán pruebas experimentales dentro de un rango de pH de 3 – 5	X₂ = Escala
		X₃ = Tiempo	Se tomarán muestras cada 20 minutos por un tiempo total de 1 horas	X₃ = Minutos

Fuente : Elaboración Propia

IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo y diseño de la investigación

Según Hernández Sampieri (2014) el presente proyecto corresponde a una investigación de tipo experimental, de categoría “experimento puro” debido a que en él, se cumplen los tres requisitos de una investigación experimental: Manipulación intencional de una o más variables independientes, medición del efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente, y control de la situación experimental. Se presenta un diseño factorial, en el que se analiza el efecto de las variables independientes sobre la variable dependiente, incluyendo 2 o más niveles de presencia de la variable independiente.

Los datos a recolectar serán medibles, mediante instrumentos válidos y confiables y posteriormente analizados estadísticamente. Lo anterior se realizará basado en un diseño estructurado y servirá para probar las hipótesis planteadas inicialmente. Por las características mencionadas anteriormente, Hernández Sampieri (2014) indica que la investigación presenta un enfoque cuantitativo.

4.2. Población y muestra

4.2.1. Población

Según la naturaleza de la investigación se tiene que la población es igual a la muestra, se tiene que $N = n$

Dónde:

N : Población

n : Muestra

4.2.2. Muestra

Solución acuosa de amarillo ocaso FCF (E110).

4.2.3. Unidad de muestreo

Solución tratada mediante procesos de oxidación avanzada.

4.3. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información documental

Se realizó una búsqueda documental en los repositorios institucionales de universidades nacionales e internacionales, así como información compartida por diversas revistas internacionales. Con la información obtenida se realizaron técnicas de comprobación y revisión analítica, con la finalidad de seleccionar la información relevante para nuestra investigación.

Con la información documental se logró establecer los límites del estudio, como lo son el pH, concentración inicial de peróxido de hidrógeno y tiempo.

4.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información de campo

4.4.1. Concentración del amarillo ocaso FCF (E110)

Como muestra se empleó una solución estándar de 100 L para cada combinación experimental. Para la preparación de la solución estándar se pesó 0,5 g del amarillo ocaso FCF en una balanza analítica. Se disolvió el colorante en el tanque de almacenamiento del equipo de oxidación avanzada en el que se agregó previamente 100,0 L de agua y se procedió con su homogenización haciendo circular la solución.

Para el cálculo de la concentración durante el tiempo, se usaron técnicas espectrofotométricas. Se hizo uso del espectrómetro UV – Visible ubicado en el laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Ingeniería Química – Universidad Nacional del Callao.

La concentración del amarillo ocaso se calculó a partir de la curva patrón, la cual se determinó preparando soluciones de distinta concentración del amarillo ocaso y realizando lecturas de la absorbancia a la longitud de onda óptimo (λ_{optimo}). El cálculo de la longitud de onda óptimo se realizó

mediante un barrido a diferentes longitudes de onda, en el cual, el pico de absorbancia más alto pasó a ser la $\lambda_{\text{óptimo}}$.

4.4.2. pH

Este parámetro se tomó para verificar el pH inicial de la solución estándar y regularlo según las condiciones experimentales. Se usó un pH – metro marca Hanna. Para regular el pH inicial, se agregó H₂SO₄ (98%)

Para determinar el pH óptimo, se trataran 100 L de solución estándar con tres diferentes rangos de pH (pH = 3, pH = 4, pH = 5) De estos, se considerará el pH que proporcione el mayor porcentaje de reducción de concentración del amarillo ocazo FCF (E110) durante el tiempo de experimentación.

4.4.3. Color

Este parámetro se consideró para comprobar la disminución del color de la muestra con la variación del tiempo. Se usó un colorímetro marca Hanna. Se tomaron muestras cada 20 minutos para cada condición experimental y se realizó la lectura en el colorímetro, en una escala Platino / Cobalto (Pt/Co)

4.5. Análisis y procesamiento de datos

Todas las pruebas y determinaciones se realizaron por duplicado. La comparación de medidas de los datos obtenidos se llevó a cabo mediante el diseño experimental Box Behnken.

La base teórica se encuentra en que toda respuesta observada por un experimentador se puede modelizar según la ecuación :

$$y_{\text{observada}} = y_{\text{real}} + \varepsilon$$

Donde :

y_{real} : Es el hipotético valor verdadero de la respuesta

ε : Es el error propio de la observación

Este error viene motivado por multitud de factores, mucho de los cuales son desconocidos y no pueden minimizarse, o tienen que ver con aspectos ocultos del proceso: habilidad del experimentador, aspectos no considerados de importancia, y errores de medidas de la instrumentación, etc.

Los gráficos se realizaron utilizando el programa Excel 2013 y los análisis estadísticos utilizando el programa Minitab 18. Para el análisis de los resultados se determinó la ecuación de regresión, con la cual se optimizaron las condiciones de operación, después de haber evaluado los efectos de estas en nuestra variable dependiente.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

Se realizó la evaluación de la concentración del amarillo oca FCF (E100) en el tiempo cero, y una vez iniciado los POA's en intervalos de tiempo de 20 minutos, hasta el minuto 60. Obteniéndose los siguientes resultados (**Ver Tabla N° 5.1**) En el que los resultados de las filas de números impares corresponden en los obtenidos en la primera evaluación, y las filas de números pares corresponden a los obtenidos en la segunda evaluación.

TABLA N° 5.1
PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL E110

pH	[H ₂ O ₂]	N°	% Red T = 0 min	% Red T = 20 min	% Red T = 40 min	% Red T = 60 min
3	15	1	0,00	29,24	50,02	70,80
		2	0,00	34,76	52,94	73,78
3	30	3	0,00	49,33	65,54	81,70
		4	0,00	49,67	66,19	82,73
3	45	5	0,00	57,40	75,79	83,15
		6	0,00	58,87	76,12	84,19
4	15	7	0,00	28,87	43,43	68,00
		8	0,00	29,11	48,37	71,20
4	30	9	0,00	50,66	64,71	78,17
		10	0,00	51,99	68,17	80,01
4	45	11	0,00	62,60	73,88	83,55
		12	0,00	61,89	74,17	82,61
5	15	13	0,00	28,17	46,99	56,76
		14	0,00	28,35	45,17	57,94
5	30	15	0,00	41,92	60,85	72,16
		16	0,00	40,84	60,97	73,70
5	45	17	0,00	55,06	70,46	78,74
		18	0,00	56,04	71,14	78,15

Fuente : Elaboración propia

Así mismo, se realizó la evaluación colorimétrica de las muestras, empelado un colorímetro marca Hanna, que expresa el color en una escala Platino / Cobalto (Pt/Co). Los resultados de esta evaluación se presentan en la **Tabla N° 5.2**, en el que los resultados de las filas de números impares corresponden en los obtenidos en la primera evaluación, y las filas de números pares corresponden a los obtenidos en la segunda evaluación.

TABLA N° 5.2

COLOR DE LA SOLUCIÓN DE AMARILLO OCASO FCF (E110)

pH	[H ₂ O ₂]	N°	Pt / Co T = 0 min	Pt / Co T = 20 min	Pt / Co T = 40 min	Pt / Co T = 60 min
3	15	1	500	410	380	220
		2	500	415	375	225
3	30	3	500	315	210	155
		4	500	320	220	150
3	45	5	500	260	175	55
		6	500	255	160	50
4	15	7	500	440	395	235
		8	500	445	410	230
4	30	9	500	335	250	165
		10	500	350	240	175
4	45	11	500	225	220	130
		12	500	240	205	125
5	15	13	500	485	415	295
		14	500	470	410	275
5	30	15	500	365	250	180
		16	500	360	285	185
5	45	17	500	280	235	145
		18	500	285	240	150

Fuente : Elaboración propia

5.1.1. Influencia del pH

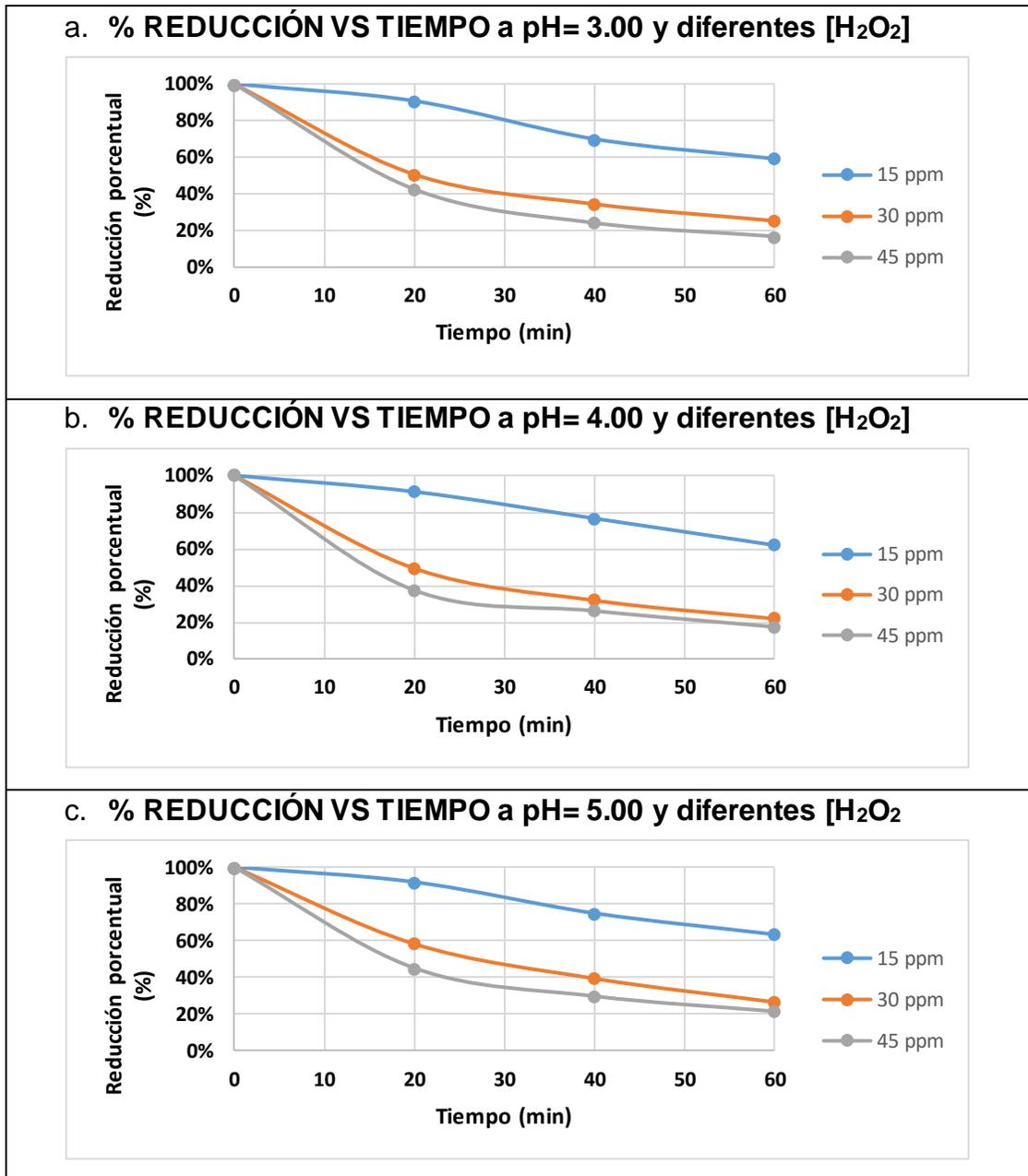
- a) **A pH = 3.-** En el **Gráfico N° 5.1.a (Ver pág. N° 45)**, se observa que el mayor porcentaje de reducción del E110 corresponde al experimento realizado aplicando una concentración de H₂O₂ igual a 45 ppm y para un tiempo de 60 minutos, siendo éste porcentaje igual a 83,15% y 84,19% según lo presentado en la **Tabla N° 5.1 (Ver pág. N° 45)**
- b) **A pH = 4.-** En el **Gráfico N° 5.1.b (Ver pág. N° 45)**, se observa que el mayor porcentaje de reducción del E110 corresponde al experimento realizado aplicando una concentración de H₂O₂ igual a 45 ppm y para un tiempo de 60 minutos, siendo éste porcentaje igual a 83,55% y 82,61% según lo presentado en la **Tabla N° 5.1 (Ver pág. N° 45)**
- c) **A pH = 5.-** En el **Gráfico N° 5.1.c (Ver pág. N° 47)**, se observa que el mayor porcentaje de reducción del E110 corresponde al experimento realizado aplicando una concentración de H₂O₂ igual a 45 ppm y para un tiempo de 60 minutos, siendo éste porcentaje igual a 78,74% y 78,15% según lo presentado en la **Tabla N° 5.1 (Ver pág. N° 45)**

5.1.2. Influencia de la concentración del H₂O₂

- a) **A [H₂O₂] = 15 ppm.-** En el **Gráfico N° 5.2.a (Ver pág. N° 50)**, se observa que el mayor porcentaje de reducción del E110 corresponde al experimento realizado aplicando un pH igual a 3 y para un tiempo de 60 minutos, siendo éste porcentaje igual a 70,80% y 73,78% según lo presentado en la **Tabla N° 5.1 (Ver pág. N° 45)**
- b) **A [H₂O₂] = 30 ppm.-** En el **Gráfico N° 5.2.b (Ver pág. N° 50)**, se observa que el mayor porcentaje de reducción del E110 corresponde al experimento realizado aplicando un pH igual a 3 y para un tiempo de 60 minutos, siendo éste porcentaje igual a 81,70% y 82,73% según lo presentado en la **Tabla N° 5.1 (Ver pág. N° 45)**

GRÁFICO N° 5.1

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL E110 vs TIEMPO A DIFERENTES [H₂O₂]



Fuente : Elaboración Propia

c) **A [H₂O₂] = 45 ppm.**- En el **Gráfico N° 5.2.c (Ver pág. N° 50)**, se observa que el mayor porcentaje de reducción del E110 corresponde al experimento realizado aplicando un pH igual a 3 y para un tiempo de 60 minutos, siendo éste porcentaje igual a 83,15% y 84,19% según lo presentado en la **Tabla N° 5.1 (Ver pág. N° 45)**

5.2. Resultados inferenciales

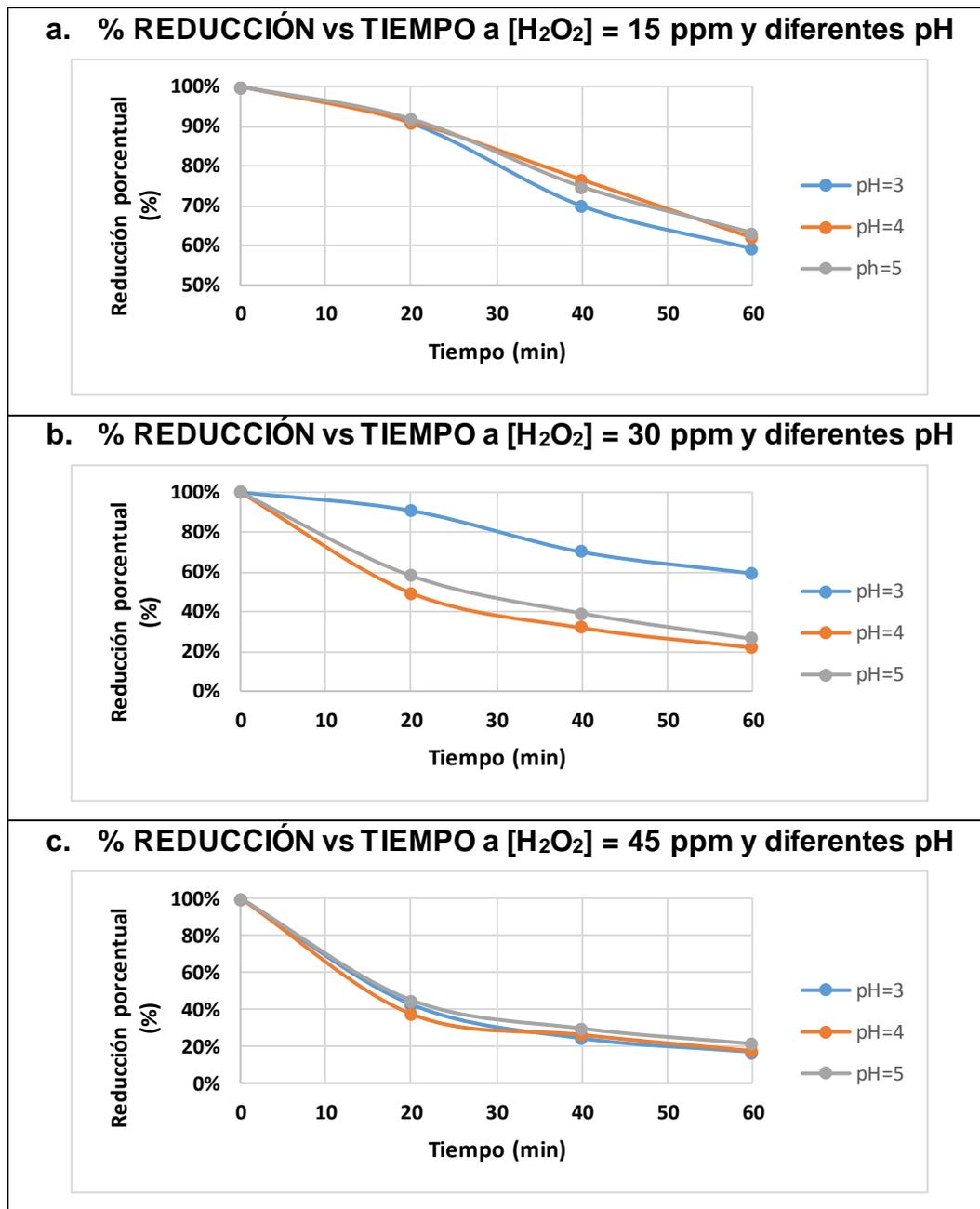
Los resultados inferenciales se basan en el análisis estadístico realizado mediante el software Minitab 18. Primero se determinó el modelo matemático que se ajusta a los datos obtenidos para la variable respuesta (%Reducción del amarillo ocaso FCF) para cada tiempo de contacto, dicho modelo matemático tiene como variables independientes al grado de acidez, tiempo de contacto y concentración de peróxido de hidrógeno inicial, el modelo tiene la forma de $Y = f(\text{pH}, \text{tiempo}, [\text{H}_2\text{O}_2])$, con el software Minitab 18 determinamos las constantes del modelo matemático (**Ver Tabla N° 5.7 pag. N° 53**), también se obtuvieron 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 (**Ver Tabla N° 5.8 ver pag. 54**)

Adicionalmente, elaboramos gráficos de contorno y gráficos de superficie, con los cuales determinamos visualmente las zonas donde existen máximos o mínimos (**Ver los Gráficos N° 5.9 pag. N° 60 al Gráfico N° 5.14 pag. N° 63**)

Las interacciones de las variables se determinaron mediante el análisis de varianza – regresión de superficie respuesta (**Ver Gráfico N° 5.7 pag. N° 59**)

GRÁFICO N° 5.2

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL E110 vs TIEMPO A DIFERENTES pH



Fuente : Elaboración propia

5.2.1. Modelo de regresión

Con los resultados se generó la ecuación que correlaciona la variable dependiente (%Reducción del amarillo ocaso FCF) y las variables independientes: Grado de acidez (pH), Tiempo de contacto (min), Concentración de peróxido de hidrógeno ($[H_2O_2]$). Para el ajuste se utilizó la regresión multivariable con el software Minitab 18, obteniendo así los coeficientes del modelo de regresión para cada tiempo = 20, 40 y 60 min. (Ver Tabla N° 5.7 pag. N° 53)

a) Diseño factorial de múltiples niveles :

TABLA N° 5.3

RESUMEN DEL DISEÑO ESTADÍSTICO DE BOX – BEHNKEN

Factores	3	Réplicas	2
Corridas base	15	Total, de corridas	30
Bloques base	1	Total, de bloques	1
Puntos centrales : 6			

Fuente : Elaboración propia

b) Regresión factorial general : % Reducción vs. pH; H_2O_2 ; Tiempo :

TABLA N° 5.4

INFORMACIÓN DEL FACTOR

FACTOR	NIVELES	VALORES
pH	3	3; 4; 5
H_2O_2	3	15; 30; 45
Tiempo	3	20; 40; 60

Fuente : Elaboración propia

TABLA N° 5.5

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA DETERMINACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

FUENTE	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	6857,65	761,96	307,75	0,000
Lineal	3	6487,31	2162,44	873,38	0,000
pH	1	173,38	173,38	70,03	0,000
Perox	1	2363,18	2363,18	954,45	0,000
Tiempo	1	3950,75	3950,75	1595,65	0,000
Cuadrado	3	173,59	57,86	23,37	0,000
pH* pH	1	62,46	62,46	25,23	0,000
Perox* Perox	1	87,18	87,18	35,21	0,000
Tiempo* Tiempo	1	50,00	50,00	20,19	0,000
Interacción de 2 factores	3	196,76	65,59	26,49	0,000
pH* Perox	1	0,55	0,55	0,22	0,642
pH*Tiempo	1	0,68	0,68	0,27	0,606
Perox* Tiempo	1	195,53	195,53	78,97	0,000
Error	20	49,52	2,48		
Falta de ajuste	3	23,47	7,82	5,11	0,011
Error puro	17	26,05	1,53		
Total	29	6907,17			

Fuente : Elaboración propia

c) Resumen del modelo :

TABLA N° 5.6

RESUMEN DEL MODELO ESTADÍSTICO

S	R – cuad.	R – cuad. (ajustado)	R – cuad. (pred)
1,57351	99,28%	98,96%	98,42%

Fuente : Elaboración propia

d) **Ecuación de regresión.**- Con la ayuda del Software Minitab 18, se pudo obtener la siguiente ecuación de regresión :

1) **Ecuación 1 : ECUACIÓN DE REGRESIÓN DEL % REDUCCIÓN DEL COLORANTE AMARILLO OCASO FFC (E110)**

$$\begin{aligned} \% \text{ Red} = & - 70,4 + 21,08 \text{ pH} + 2,456 [\text{H}_2\text{O}_2] + 1,859 \text{ Tiempo} - \\ & 2,908 \text{ pH}^* \text{ pH} - 0,01527 [\text{H}_2\text{O}_2] * [\text{H}_2\text{O}_2] - \\ & 0,00651 \text{ Tiempo}^* \text{ Tiempo} - 0,0175 \text{ pH}^* [\text{H}_2\text{O}_2] - \\ & 0,0146 \text{ pH}^* \text{ Tiempo} - 0,01648 [\text{H}_2\text{O}_2] * \text{Tiempo} \end{aligned}$$

TABLA N° 5.7

COEFICIENTES PARA CADA UNA DE LAS VARIABLES, VALOR "p", PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL AMARILLO OCASO FCF

TÉRMINO	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	67,017	0,642	104,32	0,000	
pH	- 3,292	0,393	- 8,37	0,000	1,00
Peróxido	12,153	0,393	30,89	0,000	1,00
Tiempo	15,714	0,393	39,95	0,000	1,00
pH* pH	- 2,908	0,579	- 5,02	0,000	1,01
[H ₂ O ₂] * [H ₂ O ₂]	- 3,436	0,579	- 5,93	0,000	1,01
Tiempo* Tiempo	- 2,602	0,579	- 4,49	0,000	1,01
pH* [H ₂ O ₂]	- 0,263	0,556	- 0,47	0,642	1,00
pH* Tiempo	- 0,291	0,556	- 0,52	0,606	1,00
[H ₂ O ₂]* Tiempo	- 4,944	0,556	- 8,89	0,000	1,00

Fuente : Elaboración propia

e) **Porcentaje de reducción calculado con el modelo matemático.**- Para determinar el porcentaje de reducción mediante el modelo matemático, se hizo uso de la **Ecuación 1**, obteniéndose los datos presentados a continuación.

TABLA N° 5.8

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL E110 EXPERIMENTAL Y POR REGRESIÓN

pH	H₂O₂	Tiempo	% Reducción 1	% Reducción 2	Regresión
3	15	20	29,24	34,76	28,2598
		40	50,02	52,94	52,6838
		60	70,08	73,78	71,8998
3	30	20	49,33	49,67	48,4040
		40	65,54	66,19	67,8840
		60	81,80	82,73	82,1560
3	45	20	57,40	58,87	61,6780
		40	75,79	76,12	76,2128
		60	83,15	84,19	85,5407
4	15	20	28,87	29,00	28,5407
		40	43,43	48,37	28,5023
		60	68,00	71,20	52,9263
4	30	20	50,66	51,99	72,1423
		40	64,71	68,17	48,1650
		60	78,17	80,01	81,9170
4	45	20	62,60	61,89	60,9563
		40	73,88	74,17	75,4923
		60	83,55	82,61	84,8203
5	15	20	28,17	28,35	22,9288
		40	46,99	45,17	47,3528
		60	56,76	57,94	66,5688
5	30	20	41,92	40,84	41,1100
		40	60,85	60,97	61,5000
		60	72,16	73,70	75,8620
5	45	20	55,06	56,04	54,4198
		40	70,46	71,14	68,9558
		60	78,74	78,15	78,2837

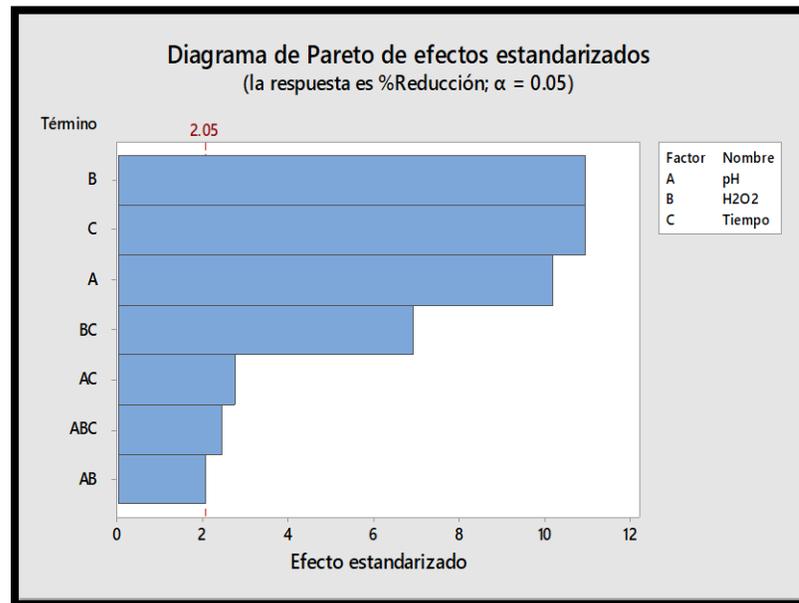
Fuente : Elaboración propia

5.2.2. Pareto de los efectos de las variables de operación

Mediante el diagrama de Pareto (Ver Gráfico N° 5.3) se puede deducir que los factores que tienen mayor significancia, es decir mayor importancia, son los factores de H₂O₂ y el tiempo de residencia que va a permanecer en contacto con dichos factores, no olvidar que el pH tiene un grado de importancia muy alto sólo que en menor proporción con respecto a las dos variables antes mencionadas. También se puede apreciar que la interacción de los factores tiene un grado de relevancia importancia, es decir todo gráfico de barras que este o sobrepase el efecto estandarizado de 2,05 (línea roja), tiene un alto grado de significancia para lograr el objetivo de reducción del E110

GRÁFICO N° 5.3

DIAGRAMA DE PARETO DE EFECTOS ESTANDARIZADOS



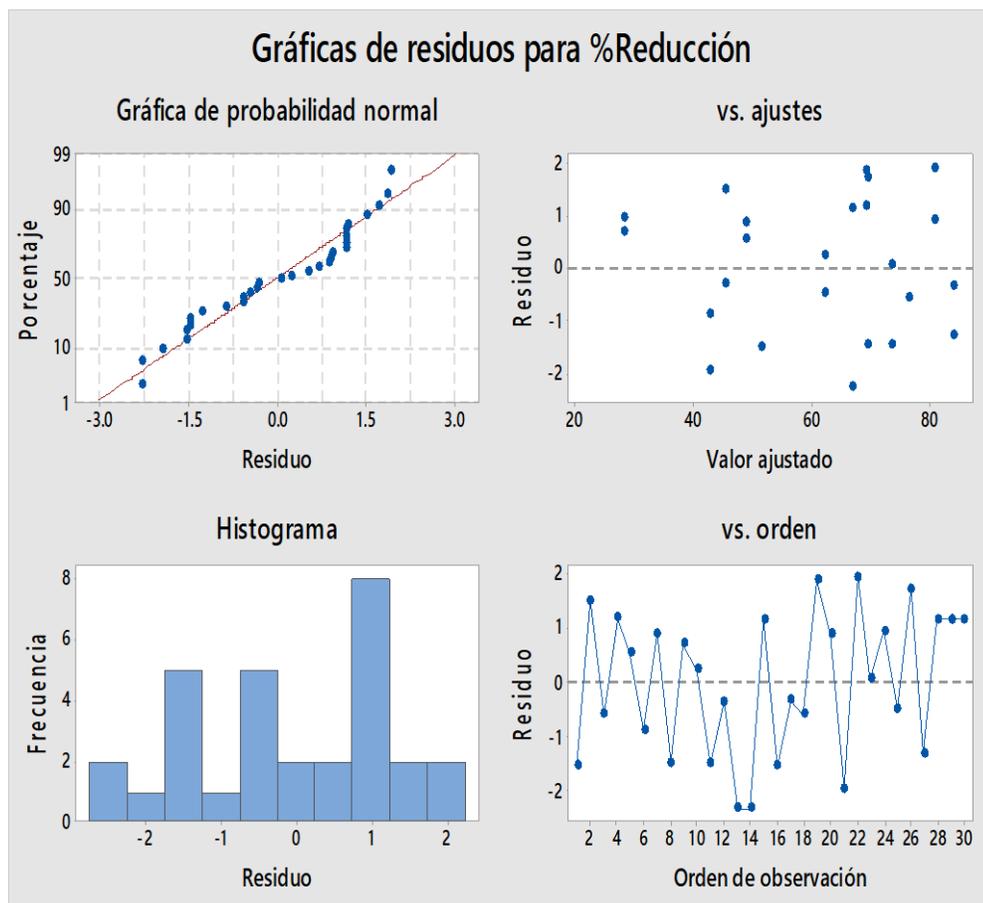
Fuente : Elaboración Propia

5.2.3. Gráficos de residuos para % Reducción del E110

Mediante el siguiente gráfico de probabilidad normal y residuos, podemos tener conclusiones muy importantes, el porcentaje de residuo (se le llama así a toda desviación que existe luego de ajustar nuestros datos con el R^2 ajustado), que nuestros datos obtenidos de reducción tienen una distribución normal y simétrica.

GRÁFICO N° 5.4

GRÁFICAS DE RESIDUOS PARA % REDUCCIÓN DEL E110



Fuente : Elaboración propia

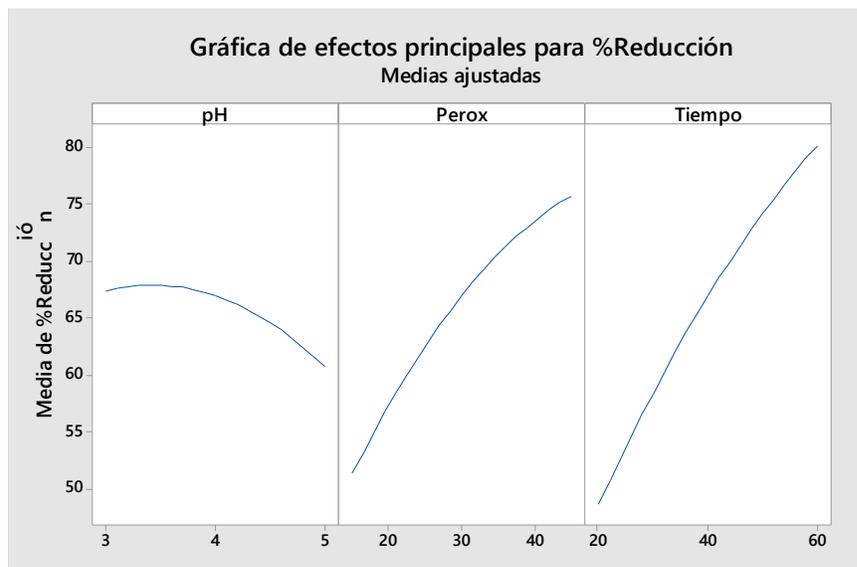
5.2.4. Gráficos de efectos principales y de interacción

Del **Gráfico N° 5.5** se puede apreciar lo siguiente :

A menor pH (pH = 3), a mayor concentración de H₂O₂ (45 ppm) y a mayor tiempo de contacto se obtiene una mayor media de % Reducción. Todo lo opuesto genera un efecto contrario, a medida que aumenta el pH, disminuye la concentración de H₂O₂ y el tiempo de contacto, también disminuye la media de %Reducción.

GRÁFICO N° 5.5

EFFECTOS PRINCIPALES Y DE INTERACCIÓN PARA EL % REDUCCIÓN DEL E110

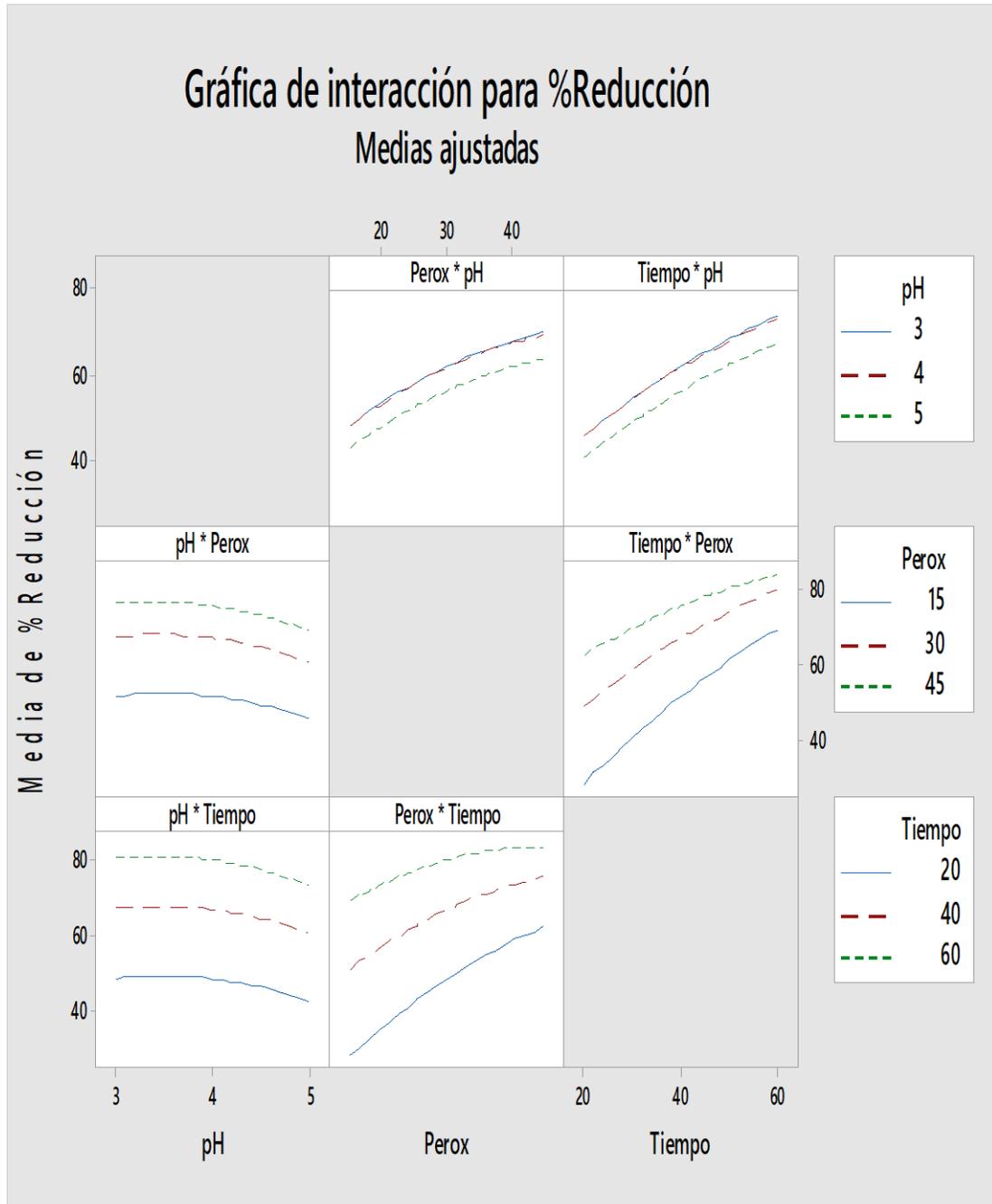


Fuente : Elaboración propia

En el **Gráfico N° 5.6 (Ver pag. N° 58)** se observa una representación de la interacción de las variables operativas para determinar el porcentaje de reducción del amarillo ocaso FCF (E110)

GRÁFICO N° 5.6

INTERACCIÓN PARA % REDUCCIÓN DEL E110



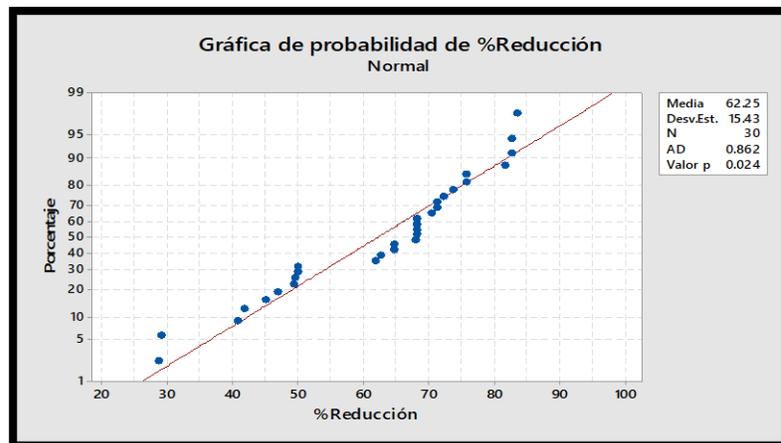
Fuente : Elaboración propia

5.2.5. Probabilidad normal de la respuesta

Con la ecuación de regresión (Ver Ecuación 1 pag. N° 53), se calculó los residuales y la normalidad de la respuesta y sus valores atípicos **Gráfico N° 5.7 y Gráfico N° 5.8)**

GRÁFICO N° 5.7

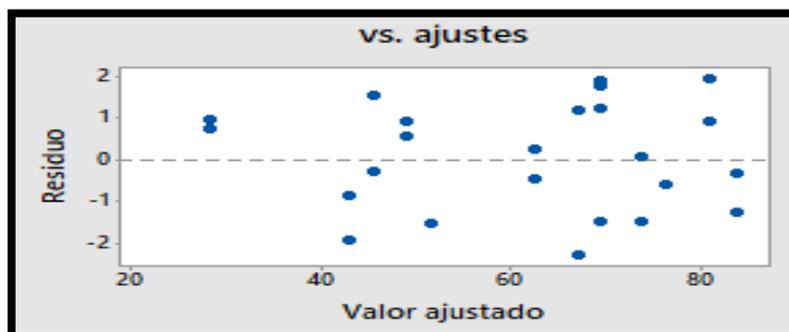
PROBABILIDAD DE % REDUCCIÓN DEL E110



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.8

RESIDUOS DEL % REDUCCIÓN DEL E110



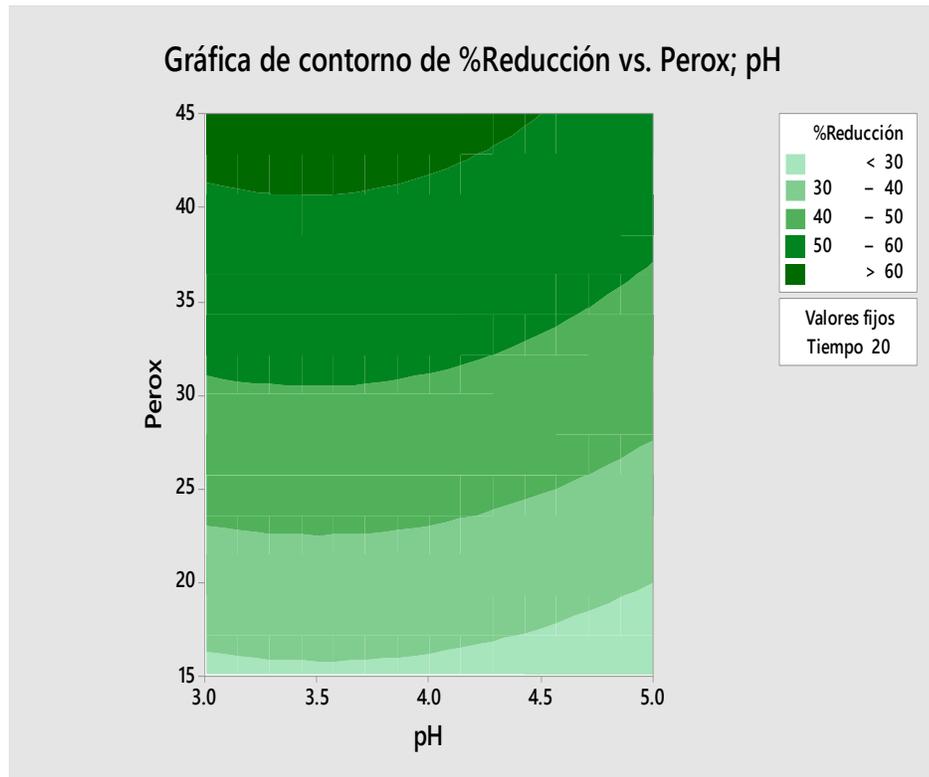
Fuente : Elaboración propia

5.2.6. % Reducción mediante graficas de contorno

Para analizar las interacciones se usó el software MINITAB 18. Se elaboró gráficos para el porcentaje de reducción de Amarillo Ocaso FCF vs pH, H₂O₂ y tiempo (Ver del Gráfico N° 5.9 y del Gráfico N° 5.10 al Gráfico N° 5.14 de la pag. N° 63 a la N° 63)

GRÁFICO N° 5.9

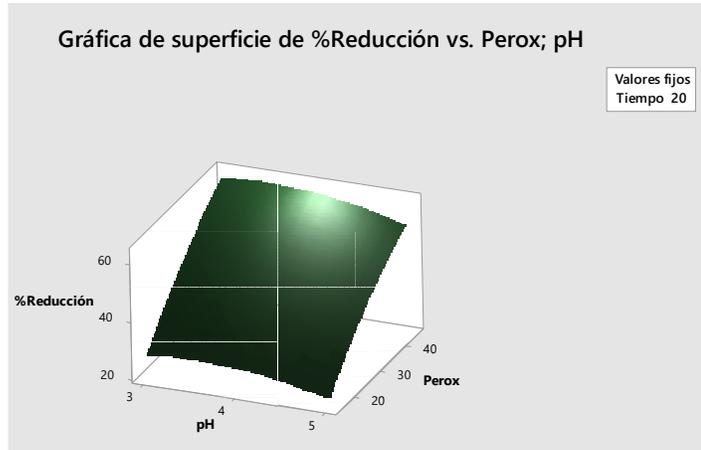
GRÁFICA DE CONTORNO DE % REDUCCIÓN vs H₂O₂; pH A UN TIEMPO DE 20 min.



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.10

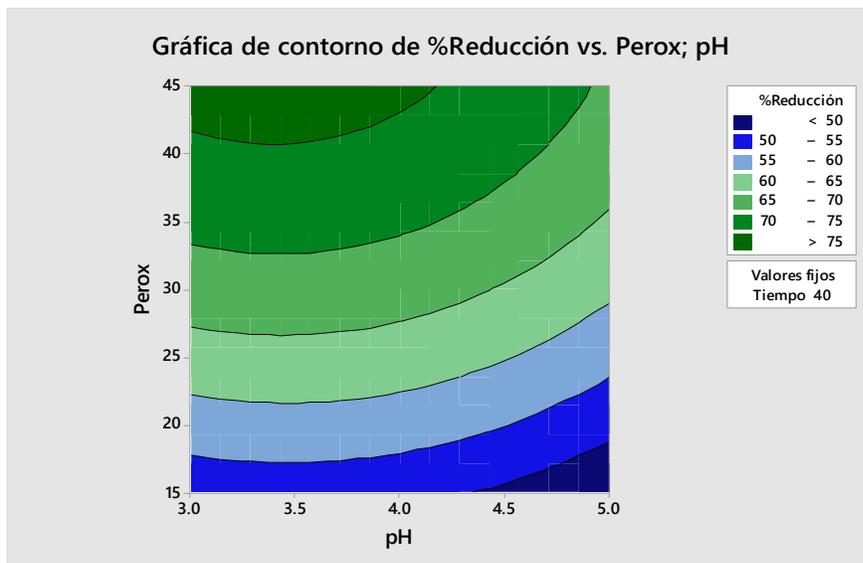
GRÁFICA DE SUPERFICIE DE % REDUCCIÓN vs H₂O₂; pH A UN TIEMPO DE 20 min.



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.11

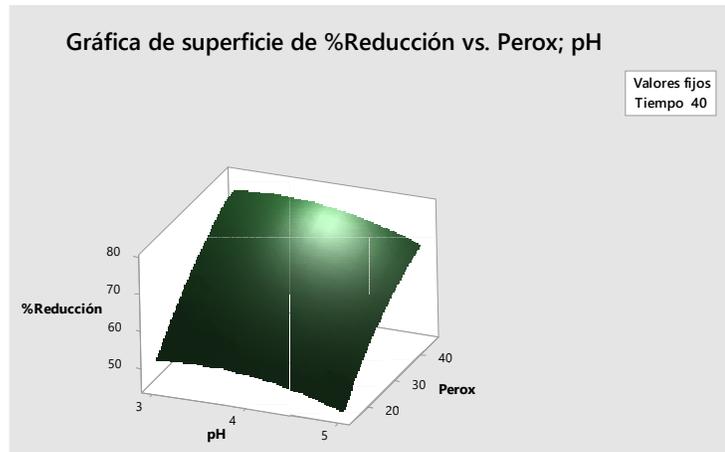
GRÁFICA DE CONTORNO DE % REDUCCIÓN vs H₂O₂; pH A UN TIEMPO DE 40 min.



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.12

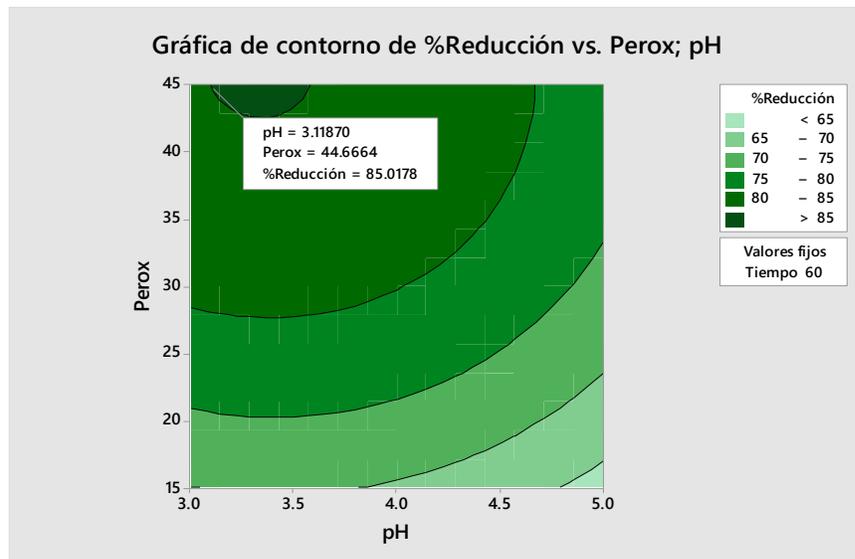
GRÁFICA DE SUPERFICIE DE % REDUCCIÓN vs H₂O₂; pH A UN TIEMPO DE 40 min.



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.13

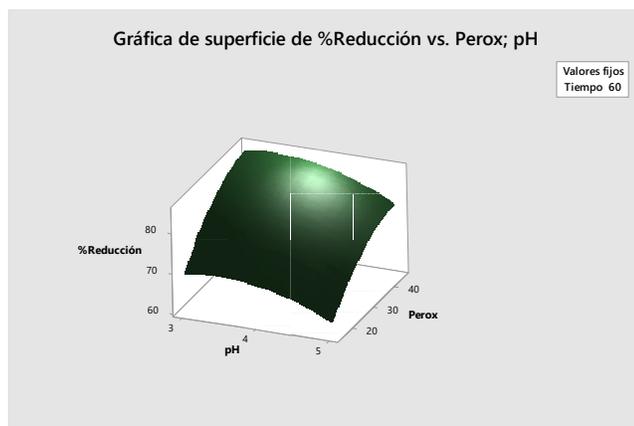
GRÁFICA DE CONTORNO DE % REDUCCIÓN vs H₂O₂; pH AUN TIMEPO DE 60 min.



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.14

GRÁFICA DE SUPERFICIE DE % REDUCCIÓN vs H₂O₂; pH A UN TIEMPO DE 60 min.



Fuente : Elaboración propia

5.2.7. Diagrama de caja para la variable de respuesta

Otro gráfico muy ilustrativo y usado para determinar el efecto de las variables de respuesta es el diagrama de caja para los tiempos estimados de 20, 40 y 60 minutos (Ver condiciones óptimas para la reducción del E100)

Se determinó los valores óptimos para cada una de las constantes para las 54 pruebas experimentales (**Gráfico N° 5.18 pag. N° 66**)

En el (**Gráfico N° 5.15 pag. N° 63**) también se puede apreciar un diagrama de cajas del %Reducción vs [H₂O₂] (**Ver Gráfico N° 5.16 pag. N° 64**), y por ultimo visualizamos el grafico de caja del % Reducción vs pH (**Ver Gráfico N° 5.17 pag. N° 65**)

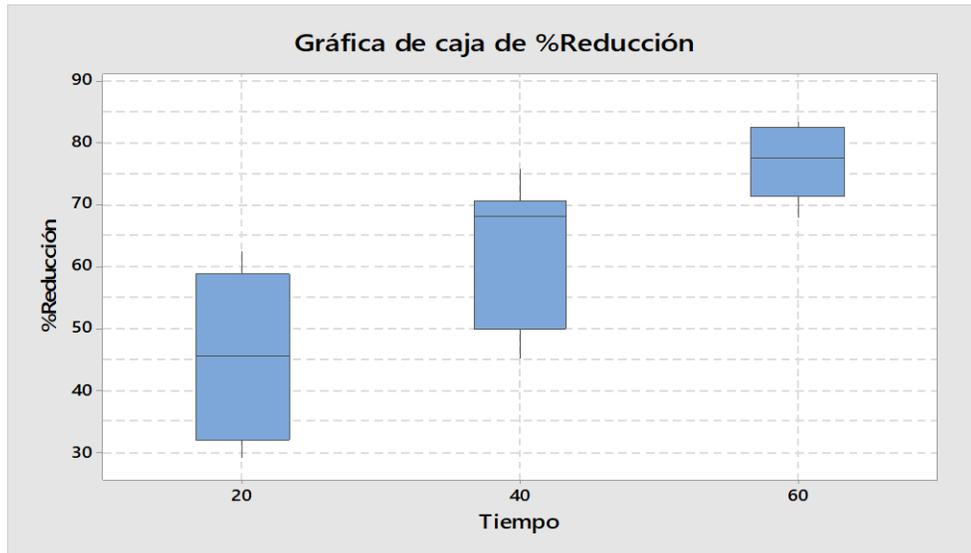
La reducción de la concentración se acerca al 86,00% a los 60 minutos de reacción.

5.2.8. Condiciones óptimas para la reducción del E100

Se determinó los valores óptimos para cada una de las constantes para las 54 pruebas experimentales (**Ver Gráfico N° 5.18 pag. N° 66**)

GRÁFICO N° 5.15

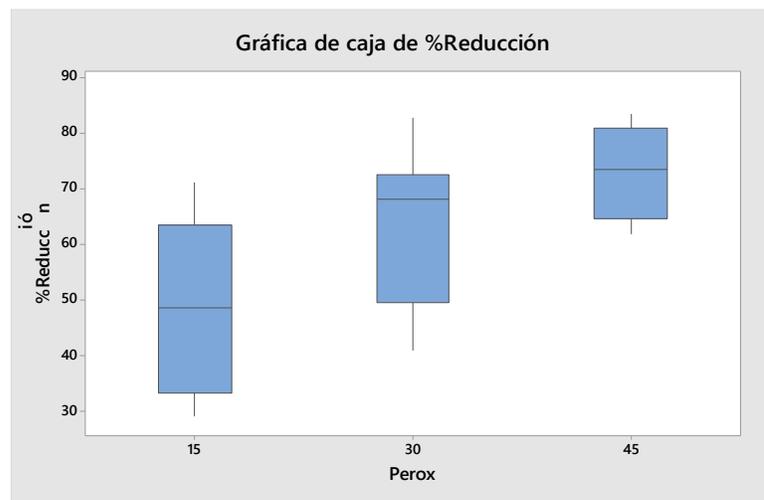
CAJA BIGOTE A LOS TIEMPOS 20, 40 Y 60 min



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.16

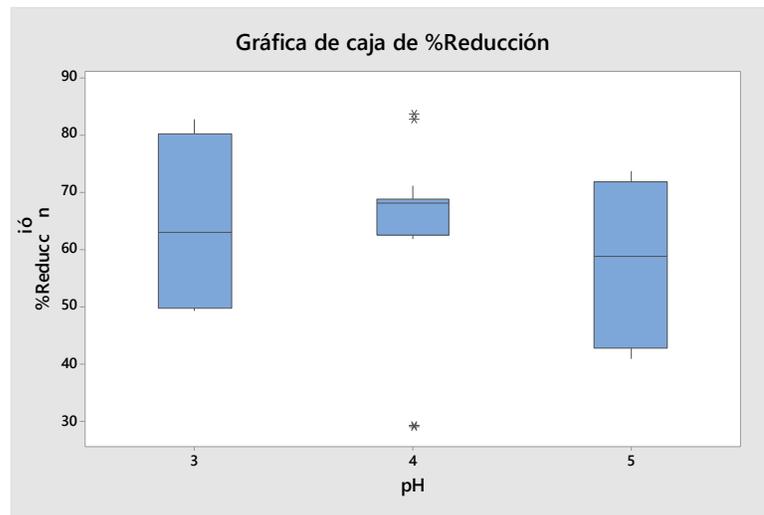
DIAGRAMA DE CAJA: % REDUCCIÓN DEL E110 vs H₂O₂ A TIEMPO DE 20, 40 y 60 min.



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.17

DIAGRAMA DE CAJA: % REDUCCIÓN DEL E110 vs pH, A TIEMPO DE 20, 40 y 60 min.

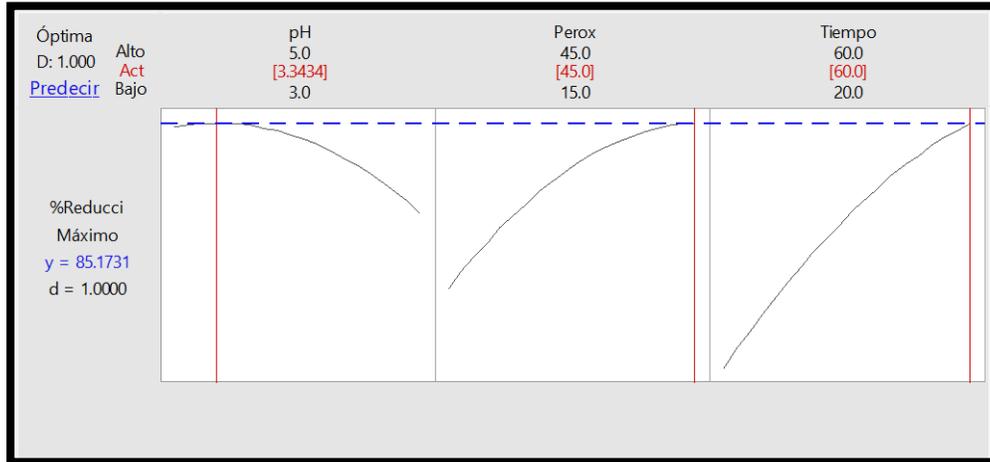


Fuente : Elaboración propia

Las condiciones de pH, H₂O₂ y Tiempo óptimos para nuestro caso será para la máxima reducción posible que podemos obtener, mediante el software Minitab V18 este valor fue de 85,1731%, a las condiciones de 45,00 ppm de [H₂O₂], pH = 3,3434 en un tiempo de 60 min.

GRÁFICO N° 5.18

CONDICIONES ÓPTIMAS PARA LA OBTENCIÓN DEL MAYOR % REDUCCIÓN DEL E110



Fuente : Elaboración propia

VI. DISCUSIÓN 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

6.1.1. Contrastación de la hipótesis general

H_{a_G} : Si se utilizan los procesos de oxidación avanzada basados en el empleo de H₂O₂, UV, estableciendo los parámetros fisicoquímicos adecuados, se mejorará el sistema de reducción de la concentración de amarillo ocaso FCF (E110)

$$H_{a_G} \neq 0$$

H_{a_0} : Si no se utilizan los procesos de oxidación avanzada basados en el empleo de H₂O₂, UV, estableciendo los parámetros fisicoquímicos adecuados, mejorará el sistema de reducción de la concentración de amarillo ocaso FCF (E110)

$$H_{a_G} = 0$$

Se aceptan la hipótesis alterna H_{a_G} que nos dice que se utilizan los procesos de oxidación avanzada basados en el empleo de H₂O₂, UV y estableciendo los parámetros fisicoquímicos adecuados, mejorara el sistema de reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110), para los tiempos 20, 40 y 60 minutos, porque el valor p está por debajo del nivel de significancia (p = 0,024)

Se aceptan las hipótesis alternas (Ha_G) a 20, 40, 60, min (Ha_G) debido a que los valores de p – value están por debajo de la significancia establecida 0,05

6.1.2. Contrastación de las hipótesis específicas

a) Es posible determinar las características fisicoquímicas de la solución de amarillo ocaso FCF (E110) mediante procesos basados en el empleo de H_2O_2 , UV

1) Ha_e^1 : Es posible determinar las características fisicoquímicas de la solución de amarillo ocaso FCF (E110) mediante procesos basados en el empleo de H_2O_2 , UV. $Ha_e^1 \neq 0$

2) $H0_e^1$: No es posible determinar las características fisicoquímicas de la solución de amarillo ocaso FCF (E110) mediante procesos basados en el empleo de H_2O_2 , UV $H0_e^1 = 0$

Se aceptan las hipótesis alternas (Ha_e^1) a 20, 40, 60, min.

3) (Ha_G) : Debido a que los valores de p – value están por debajo de la significancia establecida 0,05

b) Es posible determinar la influencia de las variables operativas en cada uno de los procesos basados en el empleo de H_2O_2 , UV para lograr la reducción de la concentración de amarillo ocaso FCF (E110)

1) Ha_e^2 : Es posible determinar la influencia de las variables operativas en cada uno de los procesos basados en el empleo de H_2O_2 , UV para lograr la reducción de la concentración de amarillo ocaso FCF (E110)

2) $H0_e^2$: No es posible determinar la influencia de las variables operativas en cada uno de los procesos basados en el empleo de H_2O_2 , UV para lograr la reducción de la concentración de amarillo ocaso FCF (E110)

Se aceptan las hipótesis alternas (Ha_e^1) a 20, 40, 60, min.

3) (H_{a_c}) Debido a que los valores de p-value están por debajo de la significancia establecida 0,05

6.2. Contrastación de los resultados con estudios similares

6.2.1. Influencia del pH, $[H_2O_2]$, y el tiempo

De los resultados obtenidos (**Ver Tabla N° 6.1, pág. 69**), se afirma :

- a)** En promedio a pH = 5 y a 20 minutos se redujo la concentración hasta 41,73%; a 40 minutos hasta 59,26% y a 60 minutos se redujo hasta 69,58%
- b)** En promedio a pH = 4 y a 20 minutos se redujo la concentración hasta 47,52%, a 40 minutos se redujo hasta un 62,12% y a 60 minutos se redujo en un 77,17%
- c)** En promedio a pH = 3 y a 20 minutos se redujo la concentración hasta un 46,55%; a 40 minutos hasta un 64,43% y a 60 minutos se redujo en un 80,95%

Pantoja Cadillo y Portales Tarrillo (2015), evalúan la reducción del colorante tartrazina, obteniendo que a pH y a 20,00 minutos redujeron la concentración hasta 91,00%; a 40,00 minutos a 96,00%; a 60 minutos a 98,00%; 80,00 minutos a 100,00% y a 100 minutos a 99,00%; para concentraciones iniciales de H_2O_2 entre 12,5 ppm y 50 ppm.

Donoso (2016), evalúa la reducción del colorante tartrazina, mediante diferentes procesos de oxidación avanzada, obteniendo que para la combinación UV/ H_2O_2 una reducción de 22,3% de COT y 34,8% de DOQ para condiciones óptimas de tiempo de 60 minutos, pH = 2 y concentración de H_2O_2 de $1,222 \times 10^{-3}$ M

Arroyave, et al (2009), evalúa la reducción del colorante tartrazina, obteniendo que para la combinación UV/ H_2O_2 , un porcentaje de degradación de hasta 100% y un porcentaje de mineralización de hasta 97,8% Trabajando con una concentración de H_2O_2 0,4% v/v

TABLA N° 6.1

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL E110, A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO

pH	[H₂O₂], ppm	% Red t = 20 min.	% Red t = 40 min.	% Red t = 60 min.
3	15	29,24	50,02	70,80
3	30	49,33	65,54	81,70
3	45	57,40	75,79	85,55
3	45	58,87	76,12	84,19
3	30	49,67	66,19	82,73
3	15	34,76	52,94	80,70
	Promedio	46,55	64,43	80,95
4	15	28,87	43,43	68,00
4	30	50,66	64,71	78,17
4	45	62,60	73,88	83,05
4	45	61,89	74,17	82,61
4	30	51,99	68,17	80,01
4	15	29,11	48,37	71,20
	Promedio	47,52	62,12	77,17
5	15	28,17	46,99	56,76
5	30	41,92	60,85	72,16
5	45	55,06	70,46	78,74
5	45	56,04	71,14	78,15
5	30	40,84	60,97	73,70
5	15	28,35	45,17	57,94
	Promedio	41,73	59,26	69,58

Fuente : Elaboración Propia

6.2.2. Análisis y evaluación de los modelos estadísticos

Podemos visualizar en la **Tabla N° 5.5 (Ver pag. N° 52)**, la relación lineal presenta un modelo con vapor P – Value = 0,00, lo que indica que el modelo lineal tiene una buena correlación debido a su alta significancia, para el modelo cuadrático se observa P – Value = 0,00 y F. Value = 23,37 lo que indica que las interacciones son significativas debido a que las interacciones

individuales de perox * perox posee un P – Value = 0,00 y un F – Value = 35,21, para el caso del pH * pH posee un P – Value = 0,00 y un F – Value = 25,23 y para el caso del Tiempo * Tiempo posee un P – Value = 0,00 y un F – Value = 20,19; y para el caso de las interacciones el P – Value = 0,00 y F – Value = 26,42 lo que indica que las interacciones son significativas

Estos resultados permiten afirmar que en el análisis estadístico la correlación cuadrática y las interacciones son significativas en la reducción del amarillo ocaso FCC (E110)

6.2.3. Diagrama de Pareto

Mediante el diagrama de Pareto (**Ver Gráfico N° 5.3 pag. N° 55**), se puede deducir que los factores que tienen mayor significancia, es decir mayor importancia, son los factores de H₂O₂ y el tiempo de residencia que va a permanecer en contacto con dichos factores, no olvidar que el pH tiene un grado de importancia muy alto sólo que en menor proporción con respecto a las dos variables antes mencionadas.

6.2.4. Interpretación de los valores atípicos

Del gráfico proporcionado por el Minitab 18 se puede afirmar (**Ver Gráfico N° 5.4 pag N° 56**), lo siguiente :

El gráfico de probabilidad normal de los residuos nos ayuda a verificar el supuesto de que los residuos están distribuidos normalmente. La gráfica de probabilidad normal de los residuos debe seguir aproximadamente una línea recta. (**Ver Gráfico N° 5.4 pag. N° 56**)

También se puede apreciar que el gráfico de residuos vs. ajustes nos sirve para verificar el supuesto de que los residuos están distribuidos aleatoriamente y tienen una varianza constante. Lo ideal es que los puntos se ubiquen aleatoriamente a ambos lados del 0, sin patrones detectables en los puntos (**Ver Gráfico N° 5.4 pag. N° 56**)

Y por último interpretamos el gráfico de residuos vs. orden para verificar el supuesto de que los residuos son independientes entre sí. Los residuos independientes no muestran tendencias ni patrones cuando se muestran en orden cronológico. Los patrones en los puntos podrían indicar que los residuos que están cercanos entre sí podrían estar correlacionados y, por lo tanto, podrían no ser independientes. Lo ideal es que los residuos que se muestran en la gráfica se ubiquen aleatoriamente alrededor de la línea central tal como se puede visualizar en la **Gráfico N° 5.4 (Ver pag. N° 56)**

6.2.5. Gráficos de efectos principales y de interacción

Para la interpretación del gráfico de efectos principales (**Ver Gráfico N° 5.5 pag. N° 57**) Hay que tener en cuenta cuando la línea horizontal (paralela al eje X), no hay efectos principales presentes. El valor de la respuesta no varía según el valor del predictor.

Las líneas no son horizontales al eje X, por lo que también podremos decir que mientras nuestras pendientes sean más pronunciadas, mayor será la magnitud del efecto principal por lo tanto podemos deducir que existe un efecto principal muy significativo por parte de la variable pH ($p - \text{value} = 0,00$) para nuestra variable de respuesta que es el % Reducción.

6.2.6. Gráficos de contorno de pH, tiempo, [H₂O₂]

Del gráfico proporcionado por el software MINITAB 18 (**Ver Gráfico N° 5.9 pag. N° 60, Gráfico N° 5.11 pag. N° 61, Gráfico N° 5.13 pag. N° 62**), se puede afirmar lo siguiente :

- a) A tiempo 20,00 min. :** Se puede apreciar que las áreas que se encuentran con un rendimiento de 40,00% a 60,00% está entre los rangos : de concentración de peróxido de 40,00 a 45,00 ppm; pH de 3,00 a 4,50
- b) A tiempo 40,00 min. :** Se puede Podemos apreciar que las áreas que se encuentran con un rendimiento de 50,00% a 70,00% está entre los

rangos : de un pH de 3,00 a 4,00; concentración de peróxido de 35,00 a 45,00 ppm.

- c) A tiempo 60,00 min.** : Se puede apreciar que las áreas que se encuentran con un rendimiento de 80,00% a mayor a 85,00% se encuentra entre los rangos : de un pH de 3,00 a 3,50; una concentración de peróxido de 42,00 a 45,00 ppm, y para una reducción de concentración en el rango de 70,00% a 78,00% se tiene un pH de 3,5 a 4,4 y concentración de peróxido 28,00 a 40,00 ppm.

6.2.7. Evaluación de la distribución normal

Del gráfico proporcionado por el software MINITAB 18 se puede afirmar (**Ver Gráfico N° 5.7 pag. N° 59**), nuestros datos no siguen una distribución normal porque $p - \text{value} = 0,024$ ($p \leq \alpha$; $\alpha = 0,05$), por lo podemos decir que el nuestro $p - \text{value}$ es menor que el nivel de significancia, entonces podemos rechazar nuestra hipótesis nula (Rechaza H_0)

6.2.8. Caja bigote del %Reducción del E110 vs [H₂O₂]

Se puede afirmar (**Ver Gráfico N° 5.16 pag. N° 64**)

- a)** A 20,00 min y H₂O₂ = 15,00 ppm, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 49,50%, a H₂O₂ = 30,00 ppm supera el 50,50%. No se observan valores atípicos.
- b)** A 40,00 min y H₂O₂ = 30,00 ppm, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 67,95% y a pH = 4,00, supera el 68,17 % No se observan valores atípicos.
- c)** A 60,00 min y H₂O₂ = 45,00 ppm, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 75,15% y un máximo de % Reducción del colorante de 84,55%. No se observan valores atípicos.

6.2.9. Caja bigote del %Reducción del E110 vs pH

Se puede afirmar (**Ver Gráfico N° 5.17 pag. N° 65**)

- a) A 20,00 min y pH = 3,00, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 49,50% y a pH = 4,00 supera el 45,50%. No se observan valores atípicos.
- b) A 40,00 min y pH = 3,00, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 62,905% y a pH = 4,00, supera el 68,17%. Se observan dos valores atípicos que, se escapan del control una vez que se realiza un ajuste con la ecuación de regresión.
- c) A 60,00 min y pH = 3,00, el valor de la mediana del % de Reducción supera el 82,215% y a pH = 4,00, supera el 76,905%. No se observan valores atípicos.

6.2.10. Condiciones óptimas para la reducción del E110

Se puede afirmar (**Ver Gráfico N° 5.18 pag. N° 66**) que las condiciones óptimas para la reducción del amarillo ocaso FCC (E110), pronosticadas por el software Minitab 18 fueron : **pH = 3,3434**; Concentración de peróxido 45,00 ppm, y el tiempo de 60,00 min, se podrá obtener un %reducción esperado de 85,1731%

VII. CONCLUSIONES

- 1) Se estableció que los parámetros fisicoquímicos adecuados para obtener un alto % de reducción del colorante amarillo ocaso FCC, son el pH en medio ácido, la concentración del H₂O₂ entre un rango de 30 – 45 ppm beneficia mucho, de igual manera el tiempo de residencia que tiene el colorante en contacto con dichas variables.
- 2) Se determinó que las características fisicoquímicas del colorante amarillo ocaso FCC (E110), en la etapa pretratamiento no se ven afectadas por las condiciones ambientales y concentraciones bajas de H₂O₂, y en una solución neutra, pero luego de aplicar los parámetros fisicoquímicos adecuados las características fisicoquímicas del colorante se ven afectadas y se puede; por lo tanto, el grado de acidez, la H₂O₂ y el tiempo de tratamiento de la solución, influye en la reducción de la concentración de colorante amarillo ocaso FCC (E110)
- 3) Mediante el tratamiento estadístico de los resultados se determinó que la influencia de las variables operativas como pH = 3, [H₂O₂] = 45 ppm y en un t = 60 minutos se logra a obtener un % de reducción = 83,55%, del colorante, por lo tanto, la concentración inicial de peróxido de hidrógeno influye en la reducción de la concentración de colorante amarillo ocaso FCC (E110)

VIII. RECOMENDACIONES

- 1) Realizar estudios para ver el efecto que ejerce el catalizador TiO_2 , en la degradación o reducción del colorante amarillo ocaso FCC (E110)
- 2) Realizar estudios para ver el efecto que ejerce los diferentes tipos de caudales en el tratamiento de la reducción del colorante amarillo ocaso FCC (E110)
- 3) Realizar estudios para ver el efecto de concentraciones altas de colorante y la reducción con tratamiento fotooxidación.
- 4) Realizar estudios para ver el efecto degradativo de la radiación natural UV en productos que contengan colorantes alimentarios o azocompuestos.
- 5) Realizar estudios para ver la toxicidad de los componentes residuales de la degradación del colorante amarillo de ocaso mediante UV/ H_2O_2 en productos que contengan colorantes.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1)** Alegre Zorrilla, Y. V., & Rosales Asención, S. K. (2017) Influencia del tipo de fotocatalisis y tiempo en el tratamiento de aguas residuales textiles. (Ingeniero Químico Tesis de grado), Universidad Nacional del Centro del Perú, Repositorio institucional - UNCP Disponible en <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/3790>
- 2)** Anónimo. (2016) Aditivos Alimentarios. Disponible en 01 septiembre, 2018, from <https://www.aditivos-alimentarios.com/2016/01/E110.html>
- 3)** Arroyave Roja, J. A., Garcés Giraldo, L. F., Arango Ruiz, Á. d. J., & Agudelo López, C. M. (2008) La Tartrazina, un colorante de la industria agroalimentaria, degradado mediante procesos de oxidación avanzada. [Disponible en Item] Revista Lasallista de Investigación, 5(1), 20 - 27
- 4)** Arroyave Rojas, J., Garcés Giraldo, L., & Arango Ruíz, Á. (2009) Mineralización del colorante tartrazina mediante un proceso de oxidación avanzada. [Disponible en Item]. Revista Lasallista de investigación , 6(2), 46 - 53
- 5)** Barrios - Ziolo, L. F., Gaviria - Restrepo, L. F., Agudelo, E. A., & Cardona - Gallo, S. A. (2015) Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión. [Disponible en Item]. DYNA, 82(91), 118 - 126
- 6)** Churata Salcedo, L. M. (2017) Degradación del colorante azoico textil naranja II por el método de fotocatalisis heterogénea. (Ingeniero Químico Tesis de Grado), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Repositorio Institucional - UNSA. Disponible en <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5785>
- 7)** Delgado Nina, D., & Santander Pacoricona, N. (2017) Remoción de coloración de tintes de teñido en aguas residuales de la industria textil, utilizando procesos de oxidación avanzada (POA). (Ingeniero Químico Tesis de grado), Universidad Nacional del Altiplano, Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- 8)** Donoso, M. (2016) Eliminación de colorantes alimentarios en disolución acuosa mediante procesos químicos y electroquímicos de oxidación avanzada. (Tesis Doctoral), Universidad de Extremadura

- 9)** Eco Innovación, P. (2014) Manual de Operación y Mantenimiento Equipo de Oxidación Avanzada (pp. 14)
- 10)** Escalante - Pozos, V., & Bandala, E. (2014) Calidad del agua y su relación con alimentos: aplicación de procesos fenton y tipo fenton en la eliminación de contaminantes en agua. [Disponible en Item] Temas selectos de ingeniería de alimentos, 34 - 47
- 11)** FAO. (2008) SUNSET YELLOW FCF. Disponible en 25 de agosto, 2018, from http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/jecfa_additives/docs/monograph5/additive-450-m5.pdf
- 12)** Forero, J., Ortiz, O., Rios, F. (2005) Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. [Disponible en Item] CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, 3, 97 - 109
- 13)** Gamarra Güere, C. D. (2012) Decoloración y degradación de compuestos tipo Azo mediante el proceso Fenton y Electro - Fenton. (Licenciado en Química Tesis de grado), Universidad Nacional de Ingeniería, Repositorio Institucional - UNI. Disponible en <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3674>
- 14)** Garcés Giraldo, L., Mejía Franco, E., & Santamaría Arango, J. (2004) La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. [Disponible en Item] Revista Lasallista de Investigación, 1(1), 83 - 92
- 15)** Gil Pavas, E., Quintero Olaya, L., Rincón Uribe, M., & Rivera Agudelo, D. (2006) Degradación de colorantes de aguas residuales empleando UV/TiO₂/H₂O₂/Fe⁺² [Disponible en Item] REVISTA Universidad EAFIT, 42(146), 80 - 101
- 16)** Hernández Sampieri, R. (2014) Metodología de la Investigación (6ta ed.)
- 17)** INEI. (2016) Generación y gestión de aguas residuales. [Disponible en Item]. Anuario de Estadísticas Ambientales, 401 - 402
- 18)** INEI. (2017) Generación y gestión de estadísticas ambientales. [Disponible en Item] Anuario de Estadísticas Ambientales 419 - 420
- 19)** Ingrepedia. (s.f.). Amarillo Ocaso. Disponible en 11 de agosto, 2018, from <http://hablemosclaro.org/ingrepedia/amarillo-ocaso/>

- 20)** Pantoja Cadillo, A., & Portales Tarrillo, R. A. (2015) Reducción de concentración de amarillo de tartrazina contenido en aguas de lavado de la industria de bebidas mediante UV/H₂O₂ (Maestro en Ingeniería Química Tesis de Maestría), Universidad Nacional del Callao
- 21)** Pey Clemente, J. (2008) Aplicación de procesos de oxidación avanzada (Fotocatálisis solar) para tratamiento y reutilización de efluentes textiles. (Tesis Doctoral), Universidad Politécnica de Valencia
- 22)** Restrepo Gallego, M. (2007) Sustitución de colorantes en alimentos. [Disponible en Item] Revista Lasallista de Investigación, 4(1), 35 - 39
- 23)** Rodriguez, T., Botelho, D., & Cleto, E. (2008) Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. [Disponible en Item] Revista Facultad Ingeniería Universidad Antioquia, 46, 24 - 38
- 24)** Sanchez Juan, R. (2013) La química del color en los alimentos. [Disponible en Item] Química Viva, 234 - 246
- 25)** Sociedad Nacional de Industrias, P. (2018) Industrias de Alimentos y Bebidas. Disponible, from <http://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2018/06/TRIPTICO-ALIMENTO-Y-BEBIDAS.pdf>
- 26)** Urkiaga Guinea, A., Gómez Resa, L., Gutiérrez Ruiz, M., & de las Fuentes Intxausti, L. (2002) Aplicación de procesos de oxidación avanzada al tratamiento de efluentes de diferentes sectores industriales : Centro Tecnológico GAIKER

ANEXOS

10.1 Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADOR	MÉTODOS
¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos adecuados para alcanzar el mayor porcentaje de reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110) mediante procesos de oxidación avanzada?	Establecer los parámetros fisicoquímicos adecuados para alcanzar el mayor porcentaje de reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110) mediante procesos de oxidación avanzada	Si se utilizan los procesos de oxidación avanzada basados en el empleo de H ₂ O ₂ /UV, estableciendo los parámetros fisicoquímicos adecuados, mejorará el sistema de reducción de la concentración de amarillo ocaso FCF (E110)	A (Y) = Reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110)	Y ₁ = Concentración de colorante amarillo ocaso FCF (E110)	Y ₁ = g colorante /L solución	– Análisis espectro – fotométrico – Método colorimétrico
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODOS
<p>a) ¿Cuál es la caracterización fisicoquímica de la solución del amarillo ocaso FCF (E110) pre y post aplicación de los procesos de oxidación avanzada?</p> <p>b) ¿Cuál es la influencia de las variables operativas, en cada uno de los procesos de oxidación avanzada para lograr la reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110)?</p>	<p>a) Determinar las características fisicoquímicas de la solución de amarillo ocaso FCF (E110) pre y post aplicación de los procesos de oxidación avanzada.</p> <p>b) Determinar la influencia de las variables operativas, en cada uno de los procesos de oxidación avanzada para lograr la reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110)</p>	<p>a) Es posible determinar las características fisicoquímicas de la solución de amarillo ocaso FCF (E110) mediante procesos basados en el empleo de H₂O₂, UV</p> <p>b) Es posible determinar la influencia de las variables operativas en cada uno de los procesos basados en el empleo de H₂O₂, UV para lograr la reducción de la concentración del amarillo ocaso FCF (E110)</p>	B (X) = Procesos de oxidación avanzada	<p>X₁ = Concentración del peróxido</p> <p>X₂ = pH</p> <p>X₃ = Tiempo</p>	<p>X₁ = ppm</p> <p>X₂ = Escala</p> <p>X₃ = Minutos</p>	<p>– Ensayos de Laboratorio</p> <p>– Método potenciométrico</p>

10.2 Nomenclatura de términos científicos

UV	:	Radiación ultravioleta
UV – VIS	:	Rango ultravioleta visible
AO	:	Colorante amarillo ocaso
t	:	Tiempo de reacción
H ₂ O ₂	:	Peróxido de hidrógeno
DQO	:	Demanda química de oxígeno
C	:	Concentración en parte por millón (ppm)
C _{A0}	:	Concentración inicial del componente A
M	:	Molaridad en mol/litro
h	:	Constante de Plank
TAO	:	Tratamiento de oxidación avanzada
*HO	:	Radical hidroxilo
HO ₂ *	:	Radical hidroperoxilo
ROO*	:	Radical peroxil orgánico
pH	:	Potencial de hidrógeno
TiO ₂	:	Óxido de titanio
Tk	:	Tanque de almacenamiento
Out	:	Salida
% Red	:	Porcentaje de reducción del AMO

10.3 Especificación del producto

10.3.1 Amarillo Ocaso FCF (E110) o Amarillo N° 6

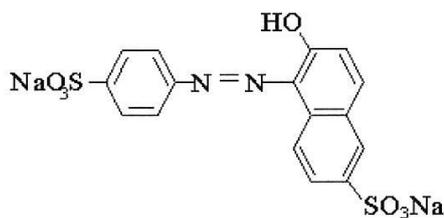
Especificación de Producto



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

AMARILLO NO. 6 M8604

NOMBRE TECNICO:	Colorante orgánico-sintético Amarillo No. 6	
NOMBRE COMUN:	Sunset Yellow FCF	
SINONIMOS:	C.I. Food Yellow 3, Amarillo crepúsculo, Amarillo naranja S.	
ORIGEN:	Compuesto derivado del carbono, obtenido por síntesis química y que se emplea como aditivo de color en alimentos, productos perfumería y belleza (NOM-038-SSA1-1993).	
DESCRIPCION:	Polvo fino homogéneo de color rojo ladrillo, inodoro, muy higroscópico, que en solución a 10 p.p.m tiene una tonalidad naranja, libre de materia extraña.	
COLOR INDEX (C.I.):	15985	NO. CAS.- 2783-94-0
NUMERO E (CEE):	E110	
PESO MOLECULAR:	452.37 g/mol	
NOMBRE QUIMICO:	Sal disódica del ácido 6-hidroxi-5-[(4-sulfofenil)azo]-2-naftalen sulfónico.	
FORMULA CONDENSADA:	C ₁₆ H ₁₀ N ₂ O ₇ S ₂ Na ₂	
FORMULA ESTRUCTURAL:		



CLASIFICACION: Monoazo.

10.3.2 Peróxido de hidrógeno

Especificación de Producto



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

AMARILLO NO. 6 M8604

ESPECIFICACIONES:

<u>Parámetros</u>	<u>Límite</u>	<u>Método</u>
Concentración de color (pureza).	85.0 % mín.	MPMCC048
Suma de material volátil a 135°C, cloruros y sulfatos de sodio.	15.0 % máx.	MPMCC042, 43 Y 45
Material insoluble en agua	0.2 % máx.	MPMCC046
Intermediarios	0.5 % máx.	MPMCC020
Colores subsidiarios.	5.0% máx.	MPMCC020
Extractos etéreos	0.2% máx.	MPMCC047
Plomo como Pb.	2.0 ppm máx.	MPMCC018
Arsénico como As.	1.0 ppm máx.	MPMCC039
Aminas aromáticas primarias no sulfonadas	0.01 % como anilina	MPMCC152
Metales pesados:	20.0 ppm máx.	MPMCC120

INFORMACION NUTRIMENTAL

No aplica

ENVASADO:

El producto se envasa en bolsas de polietileno calibre 300 contenidas en cajas de cartón según el contenido neto requerido.

CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO:

Consérvese cerrado en su empaque, en un lugar seco a temperatura ambiente y protegido de la luz, la intemperie y el polvo.

VIDA DE ANAQUEL:

Herméticamente cerrado, en las condiciones de almacenamiento arriba indicadas, el producto tiene una vida de anaquel de seis años en su envase original, después de este tiempo puede absorber humedad y se modifica su apariencia física, sin embargo, su estabilidad química es indefinida.

NOTA :La información contenida en este documento es válida y precisa, sin embargo, está fuera de nuestra competencia las condiciones de manejo y uso de este colorante por el usuario intermediario o final, por lo que, no garantizamos ningún resultado si el producto ha sufrido algún daño en su empaque o contenido. Los datos aquí incluidos no representan violación alguna a patentes o regulaciones aplicables al producto.

Para mayor información de este producto o cualquier asesoría técnica, comuníquese a nuestro departamento de Servicio a Clientes

Este producto cumple con JECFA y Directiva 95/45/CE.

CMM / Noviembre / 2008

Hoja 2 de 3

Hydrogen

 **Peroxide, 30%**
BAKER ANALYZED® A.C.S.
Reagent

Product No. 2186
Specifications current as of:
Nov 14 2018

TEST	SPECIFICATION
Meets ACS Reagent Chemical Requirements For Laboratory, Research, or Manufacturing Use	
Assay (H ₂ O ₂)	30.0 - 32.0 %
Color (APHA)	<= 10
Residue after Evaporation	<= 0.0020 %
Titration Acid (meq/g)	<= 0.0006
Chloride (Cl)	<= 2 ppm
Nitrate (NO ₃)	<= 2 ppm
Phosphate (PO ₄)	<= 2 ppm
ACS – Sulfate (SO ₄)	<= 5 ppm
Ammonium (NH ₄)	<= 5 ppm
Trace Impurities – Copper (Cu)	<= 50 ppb
Trace Impurities – Iron (Fe)	<= 100.0 ppb
Heavy Metals (as Pb)	<= 1000.0 ppb
Trace Impurities – Lead (Pb)	<= 100 ppb
Trace Impurities – Nickel (Ni)	<= 50 ppb
Meets Reagent Specifications for testing USP/NF monographs	

10.4 Certificado de análisis : FD&C YELLOW 6

CERTIFICATE OF ANALYSIS



DYECHEM PVT. LTD.

A/44 & A/45, Road No.2, M.I.D.C., Andheri(E), Mumbai-400093,India
 Tel No.: -91-22-40773100 (Hunting Line), Fax No.: -91-22-28302531/28302532
 Email:- roha.india@rohagroup.com, Website:-www.roha.com

INSP NO. : 100000133636	ORDER NO/DATE : 60008086 /01.07.2017
PRODUCT NO. : SYF08SRPD1BA25000	INVOICE NO. : 2017000338 / 25.07.2017
PRODUCT NAME : IDACOL Sunset Yellow	LOT NO. : RP17071023
EEC NO. : E 110	SR. NO. : 1006169272-1006169311
C.I. NO./CAS NO. : 15986/2783-94-0	EINECS NO. : 220-491-7
	DATE OF MFG. : 22.07.2017
SUPPLIED/SHIP TO : 50000043 (EE022)	EXPIRY DATE : 21.07.2020
GENERIC NAME : FOOD YELLOW 3, FD&C YELLOW 6	

Characteristic	Specification	Unit	Test Result
Identification	Maximum In Water At 485 nm		Complies
Physical Appearance	Orange Red Powder		Complies
Total Color / Assay	88,000-100,000	%	89,510
Loss on drying at135°C & chloride & sulphates expressed as sodium salt	0,000-15,000	%	10,440
Water Insoluble Matter	0,000-0,200	%	0,008
Ether Extractable Matter	0,000-0,200	%	< 0,200
Subsidiary Colouring Matters	0,000-5,000	%	< 5,000
Organic compounds other than colouring matters: %			
4-Aminobenzene-1- Sulfonic Acid %			
3-Hydroxynaphthalene-2,7-Disulfonic Acid %			
6-Hydroxynaphthalene-2-Sulfonic Acid %			
7-Hydroxynaphthalene-1,3-Disulfonic Acid %			
4,4'-Diazoaminodi(Benzenesulfonic Acid)%			
6,6'-Oxydi(Naphthalene-2-Sulfonic Acid)	0,000-0,500	%	< 0,500

Place : Roha / RDC/QAD/QR-001

ISSUED BY ROHA DYECHEM PVT. LTD.

Date : 27.07.2017

Q.A MANAGER

Factory Address : 42, M.I.D.C., Dhatav, Roha 402116 Dist. Raigad, Maharashtra, India

Page: 1 of 2

This is a computer generated document. Signature not required.

CERTIFICATE OF ANALYSIS



A/44 & A/45, Road No.2, M.I.D.C., Andheri(E), Mumbai-400093,India
 Tel No.:-91-22-40773100 (Hunting Line), Fax No.:-91-22-28302531/28302532
 Email:- roha.india@rohagroup.com, Website-www.roha.com

1-(Phenylazo)-2-Naphthaleno(Sudan I)	0,000-0,500	mg/kg	< 0,500
Unsulphonated Primary Aromatic Amine (calculated As Aniline)	0,000-0,010	%	< 0,010
Lead (as Pb)	0,000-2,000	mg/kg	< 2,000
Arsenic (as As)	0,000-3,000	mg/kg	< 1,000
Mercury (as Hg)	0,000-1,000	mg/kg	< 1,000
Cadmium (as Cd)	0,000-1,000	mg/kg	< 1,000
Heavy Metals (as Pb)	0,000-40,000	mg/kg	< 40,000

Quantity: 1000 KG **Packaging:** 40.000 X 25.000 KG HDPE Drum

Shipping, Handling & Storage: Shipping and handling of the product has been under such conditions that prevent contamination and will protect against undesirable deterioration of the product and the container. Product shall be placed in tightly sealed container/bag and stored at ambient warehouse conditions, carefully protected from exposure to light, heat, air, moisture, foreign odour and other contaminants.

Remark : THE PRODUCT COMPLIES AS PER EU COMMISSION DIRECTIVE 2012/231/EC SPECIFICATIONS.

The compliance to the above mentioned specification can be verified using respective methods of analysis.

Disclaimer : Above information is correct at the time of issue but may be subject to alteration. The information on the specification remains the property of ROHA Group (JJT Group companies). Information is correct to the best of our knowledge and it should not be construed as warranty. Users should conduct their own tests to determine the suitability of this product/data for this purpose. Users must satisfy themselves suitability of product, ingredients in accordance with regulations applicable and suitability of product in end application. Roha Group (JJT Group Companies) shall not be liable for any claims or losses of any nature arising directly or indirectly from use of the information, data or other material on this document.

Place : Roha / RDC/QAD/QR-001

ISSUED BY ROHA DYECHEM PVT. LTD.

Date : 27.07.2017

Q.A MANAGER

Factory Address : 42, M.I.D.C., Dhatav, Roha 402116 Dist. Raigad, Maharashtra, India

Page: 2 of 2

This is a computer generated document, Signature not required.

10.5 Curva patrón del amarillo ocaso FCF (E110)

10.5.1 Determinación de longitud de onda óptima

Para determinar la longitud de onda óptimo, se realizaron lecturas de absorbancia a una solución de concentración conocida de amarillo ocaso FCF (E110), en un rango de 435 – 560 nm, según lo indicado en la **Tabla 2.4 (Ver pag. N° 23)**

Para ello se pesó 0,0005 g de E110, se diluyó con agua destila y enrasó en una fiola de 100 mL. Luego se realizó la lectura de la absorbancia (A) y transmitancia (% T) a distintas longitudes de onda (**Ver Tabla N° 10.1**), hasta la obtención de la longitud de onda óptimo (**Ver Gráfico N° 10.1 pag. N° 89**)

TABLA N° 10.1

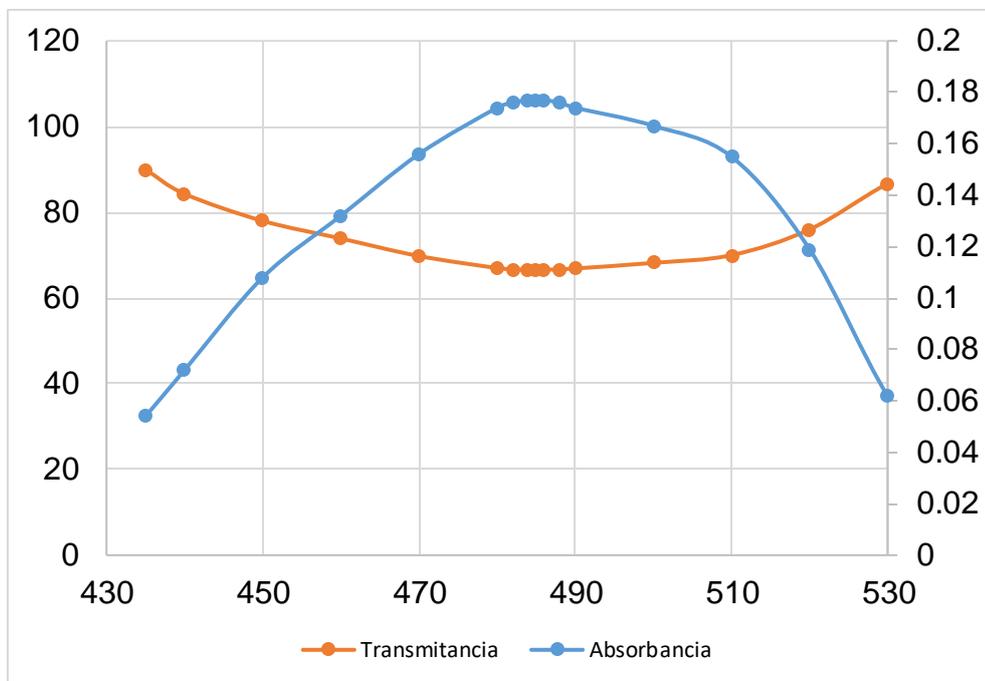
ABSORBANCIA Y % TRANSMITANCIA A DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA

LONGITUD DE ONDA (λ)	ABSORBANCIA (A)	TRANSMITANCIA (%T)
435	0,054	90,0
440	0,072	84,3
450	0,108	78,0
460	0,132	73,9
470	0,156	69,8
480	0,174	67,0
482	0,176	66,7
484	0,177	66,6
485	0,177	66,5
486	0,177	66,6
488	0,176	66,7
490	0,174	66,9

Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 10.1

ABSORBANCIA / % TRANSMITANCIA VS LONGITUD DE ONDA



Fuente : Elaboración propia

De la **Tabla N° 10.1 (Ver pag. N° 88)** y **Gráfico N° 10.1**, se establece que la longitud de onda óptima corresponde a 485 nm.

10.5.2 Cálculo de la ecuación de la curva patrón

Para el cálculo de la ecuación de la curva patrón, se prepararon soluciones de diferentes concentraciones de amarillo ocaso FCF, en un rango de $0,0001 \text{ gL}^{-1}$ a $0,0005 \text{ gL}^{-1}$. Se realizó la lectura de absorbancia de estas soluciones, a la longitud de onda óptima (485 nm) (**Ver Tabla N° 10.2 pag. N° 90**) Los datos obtenidos se representaron en una gráfica Concentración vs. Absorbancia, en la cual se estableció la ecuación de la curva patrón, mediante un análisis lineal (**Ver Gráfico N° 10.2 pag. N° 90**)

TABLA N° 10.2

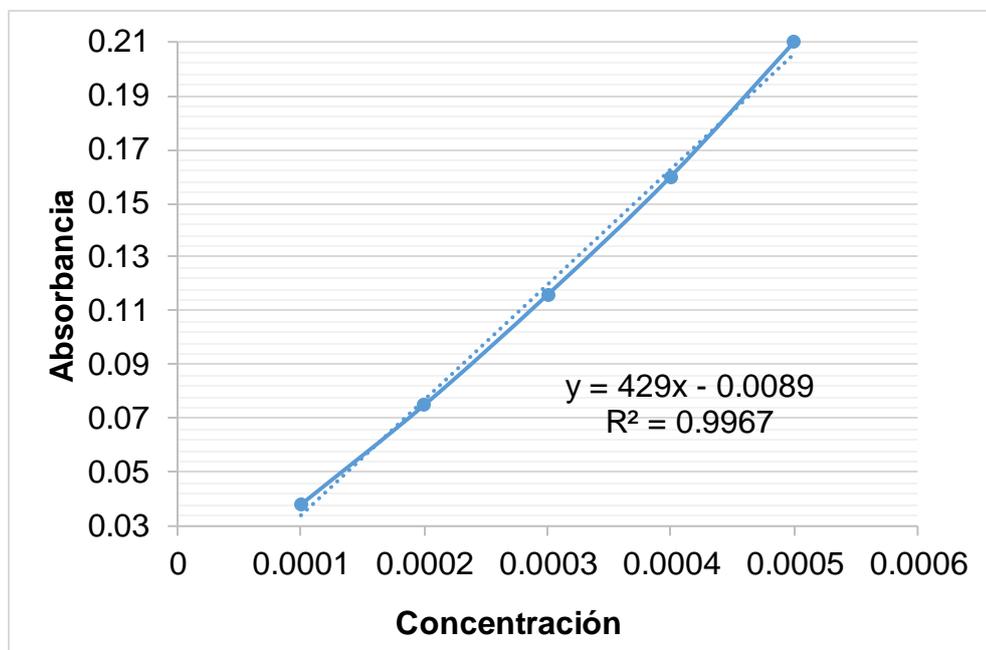
ABSORBANCIA DEL E110 A DIFERENTES CONCENTRACIONES

Concentración (gL⁻¹)	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002	0,0001
Absorbancia	0,21	0,16	0,116	0,075	0,038

Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 10.2

CONCENTRACIÓN DEL E110 vs ABSORBANCIA



Fuente : Elaboración Propia

Del análisis lineal del **Gráfico N° 10.2**, se obtiene que :

$$\text{Absorbancia} = 429 * (\text{Concentración}) - 0,0089$$

$$\text{Coeficiente de correlación} = 0,9967$$

FIGURA N° 10.1

SOLUCIONES DE CONCENTRACIÓN CONOCIDA DE E110



Fuente : Elaboración Propia

FIGURA N° 10.2

ESPECTROFOTÓMETRO UV – VIS

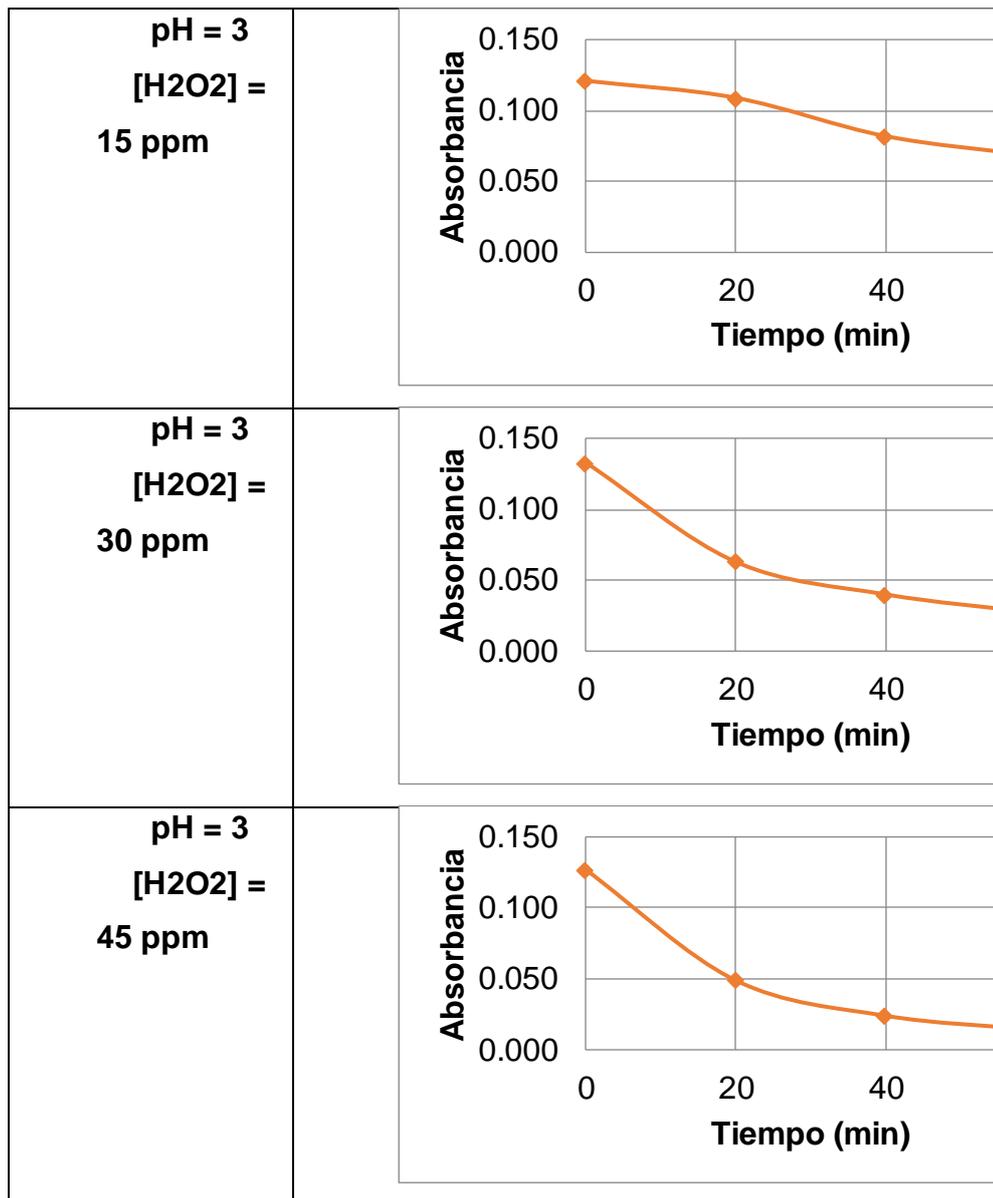


Fuente : Elaboración Propia

10.6 Absorbancia del amarillo ocaso FCF (E110)

GRÁFICO N° 10.3

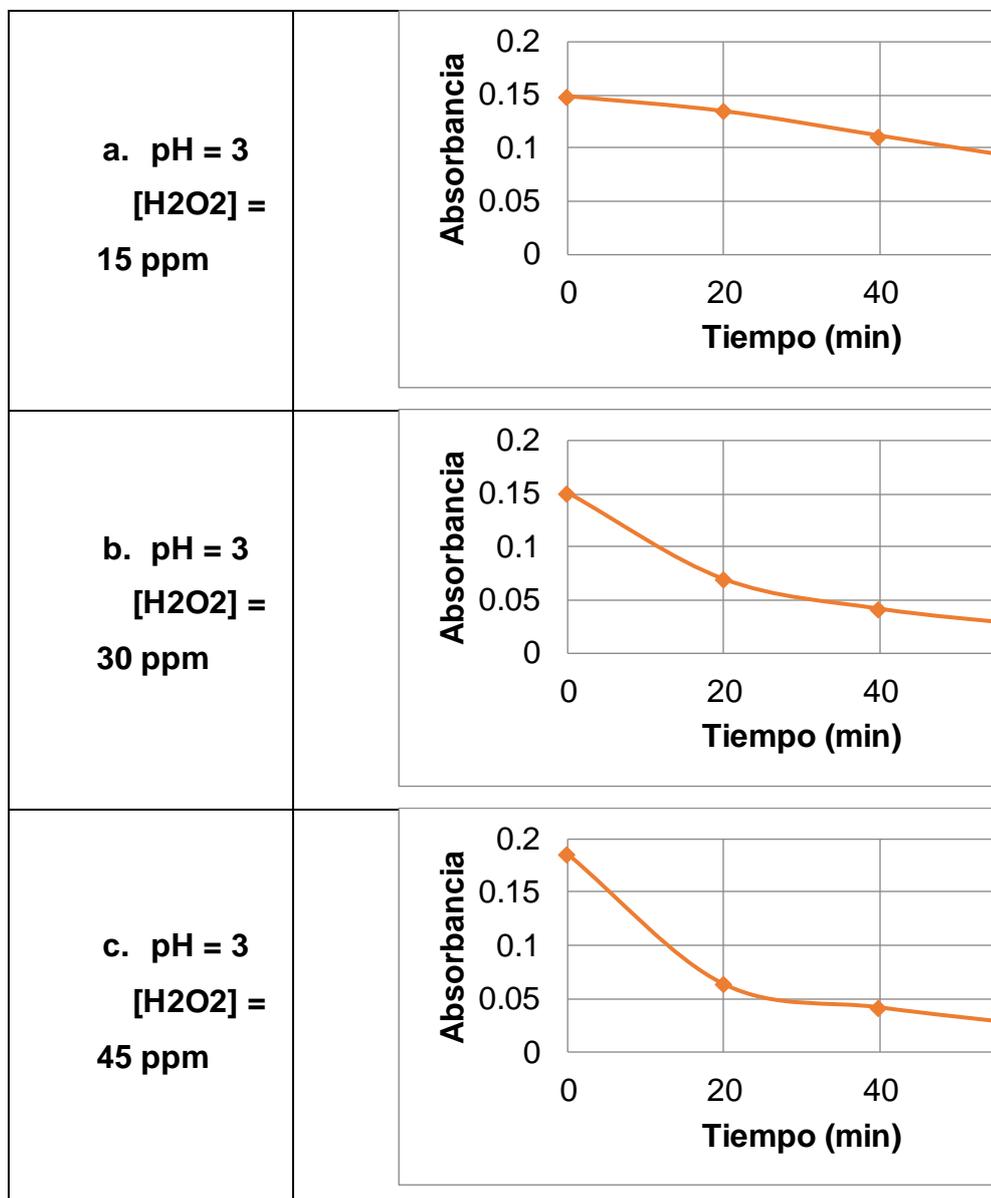
ABSORBANCIA DEL E110 A pH = 3



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 10.4

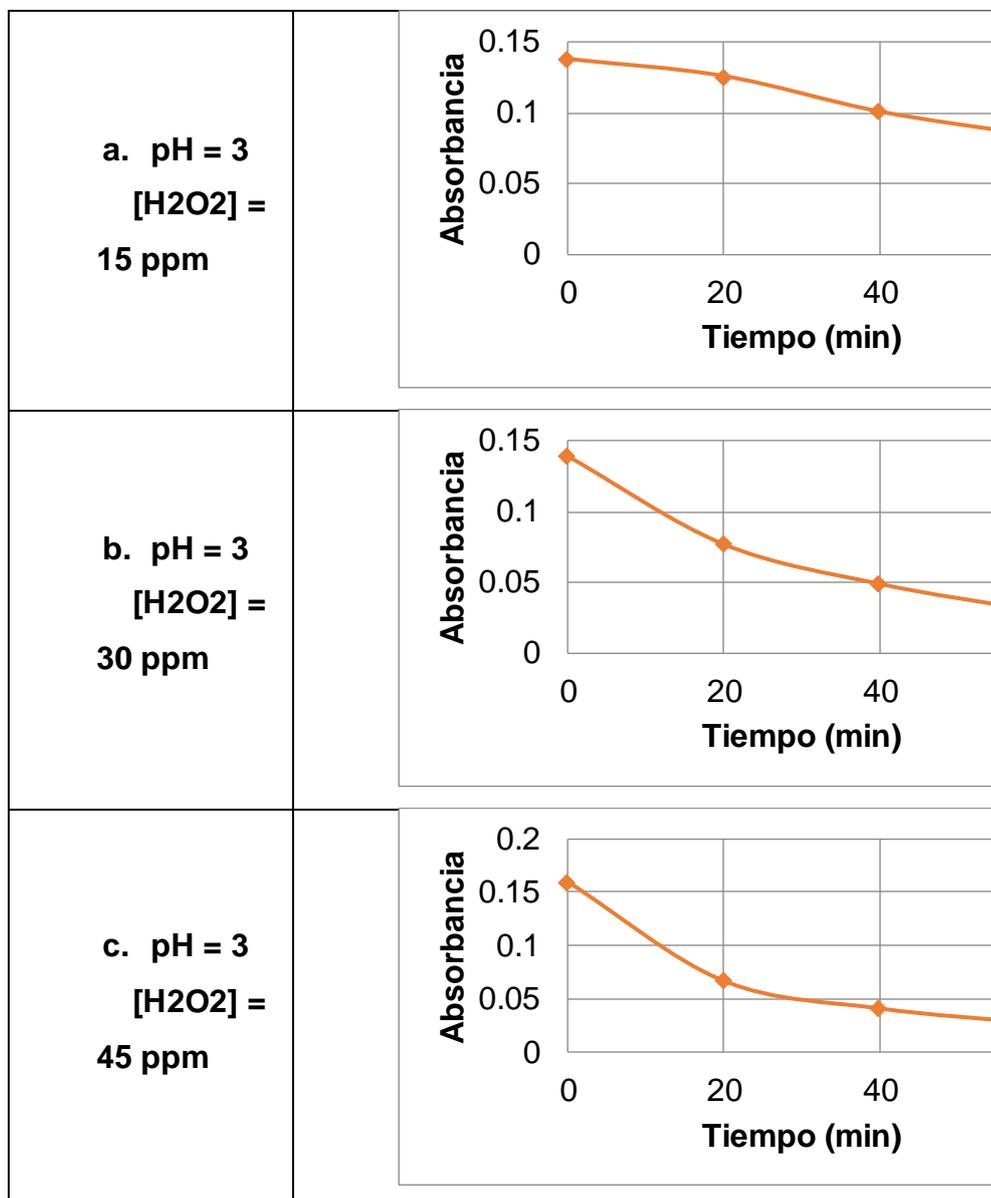
ABSORBANCIA DEL E110 A pH = 4



Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 10.5

ABSORBANCIA DEL E110 A pH = 5

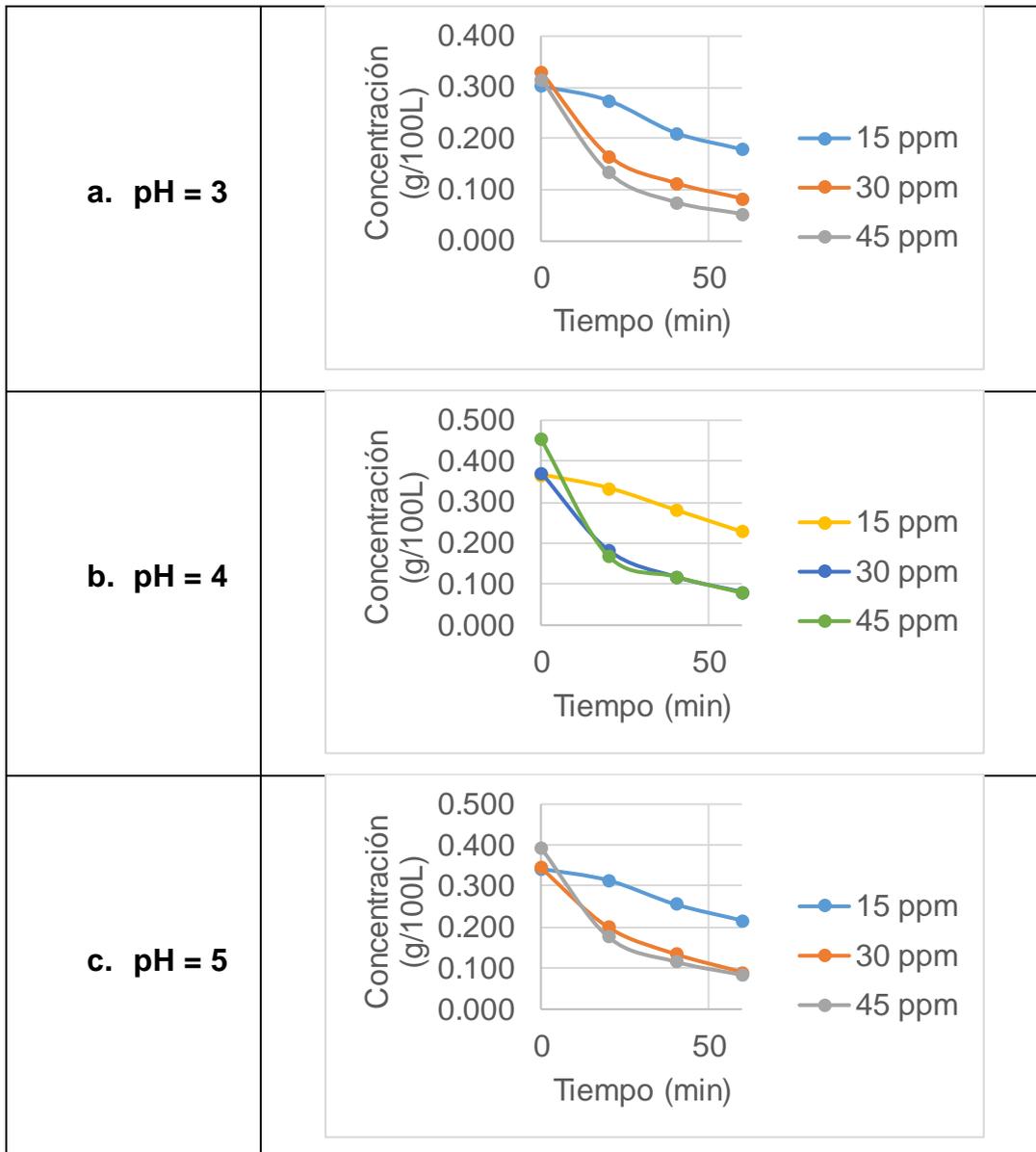


Fuente : Elaboración propia

10.7 Reducción de la concentración del E110

GRÁFICO N° 10.6

CONCENTRACIÓN DEL E110 vs TIEMPO A DIFERENTES pH

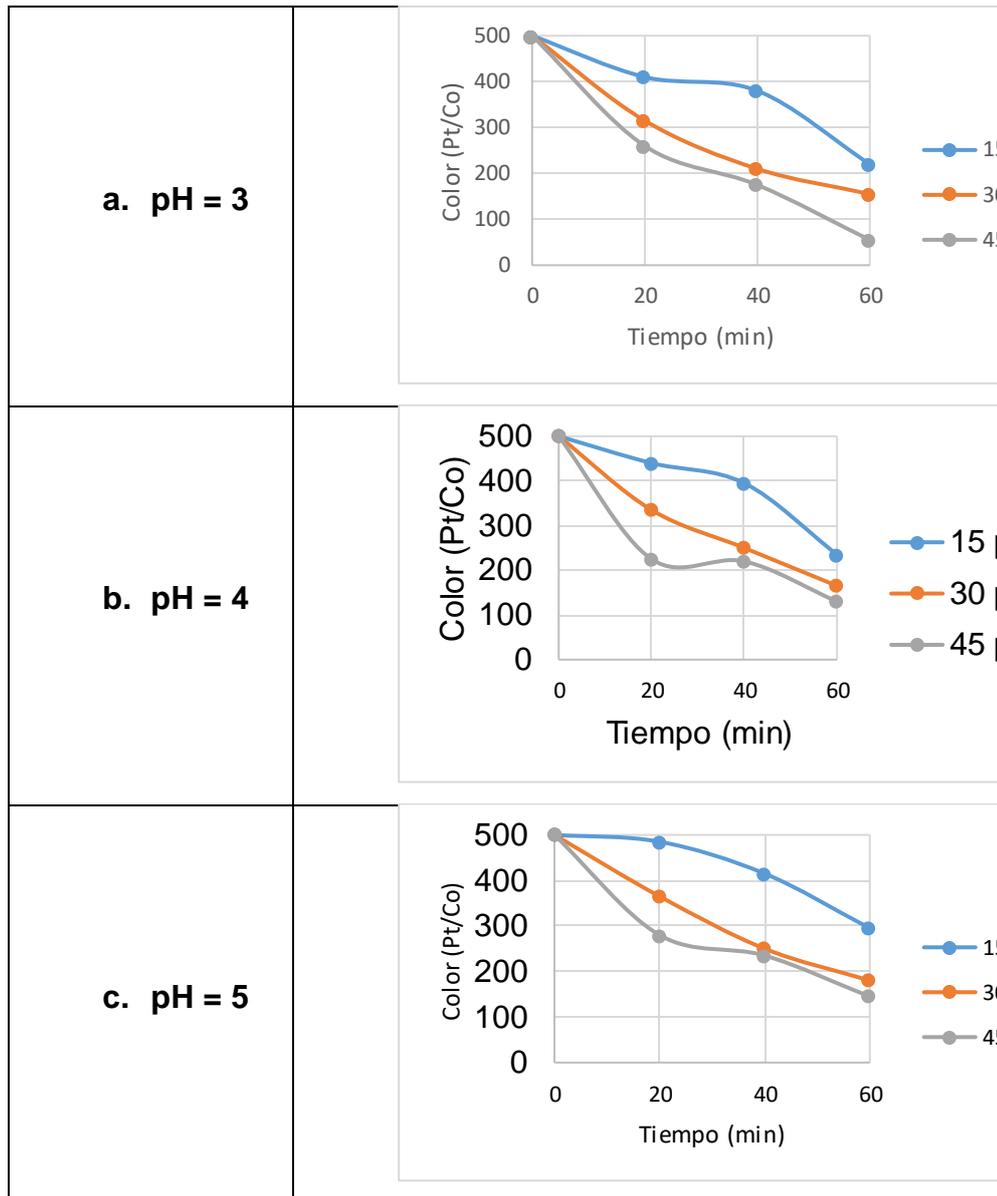


Fuente : Elaboración propia

10.8 Reducción del color en la escala Pt / Co

GRÁFICO N° 10.7

COLOR DEL E110 vs TIEMPO A DIFERENTES pH

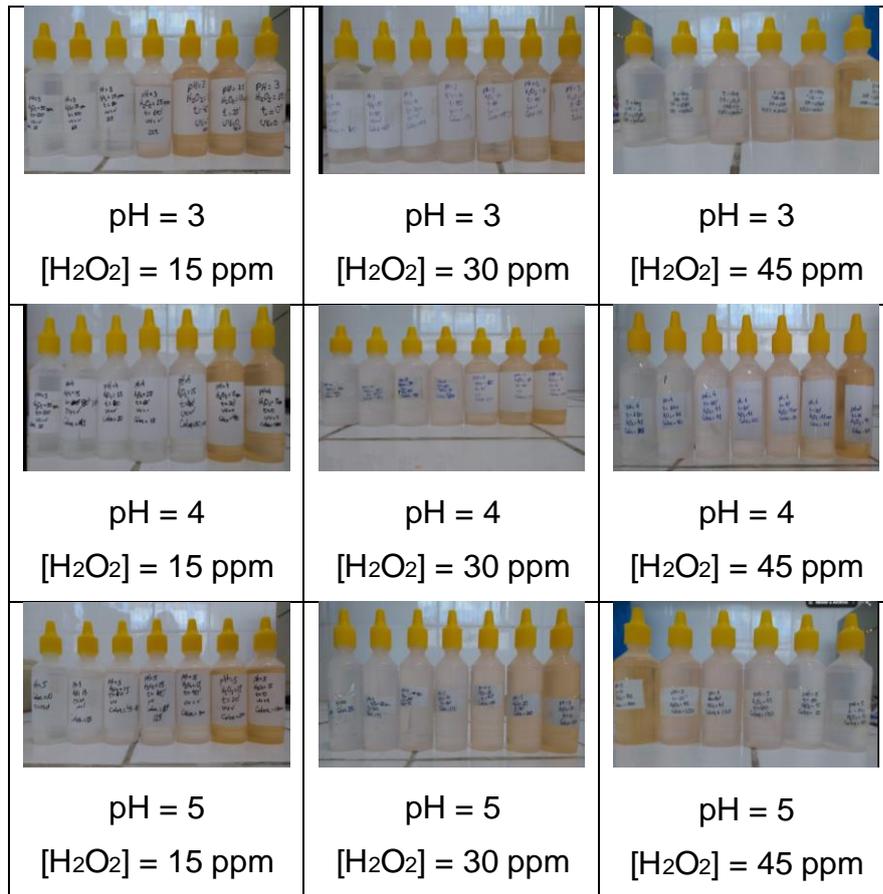


Fuente : Elaboración propia

10.9 Reducción del color

FIGURA N° 10.3

REDUCCIÓN DEL COLOR A DISTINTAS [H₂O₂] Y pH



Fuente : Elaboración propia