



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

**PROPUESTA TÉCNICA A ESCALA PILOTO PARA LA
REMOCIÓN DE COLOR DE ORIGEN TEXTIL, POR MEDIO DE
ELECTROCOAGULACIÓN PARA FAVORECER EL PROCESO DE
POTABILIZACIÓN DE AGUA, EN UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS**

Erick Estuardo Pinzón Gamboa

Asesorado por el Ing. Zenon Much Santos

Guatemala, junio de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA TÉCNICA A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE
COLOR DE ORIGEN TEXTIL, POR MEDIO DE ELECTROCOAGULACIÓN
PARA FAVORECER EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA, EN
UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN DE EPS
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

ERICK ESTUARDO PINZÓN GAMBOA

ASESORADO POR EL ING. ZENON MUCH SANTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Lorena Victoria Pineda Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**PROPUESTA TÉCNICA A ESCALA PILOTO PARA LA
REMOCIÓN DE COLOR DE ORIGEN TEXTIL, POR MEDIO DE
ELECTROCOAGULACIÓN PARA FAVORECER EL PROCESO DE
POTABILIZACIÓN DE AGUA, EN UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 26 de enero de 2009.

A handwritten signature in black ink, reading "Erick Pinzón". The signature is stylized with large, flowing letters and a circular flourish at the end.

Erick Estuardo Pinzón Gamboa

Guatemala, 18 de marzo de 2010.

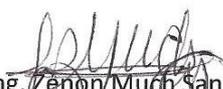
Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía.
Director de la Escuela de Ingeniería Química.
Facultad de Ingeniería.
Presente.

Estimado Ing. Álvarez.

Por medio de la presente le informo que asesoré al estudiante Erick Estuardo Pinzón Gamboa, que se identifica con carnet número 2004-12572, en su Ejercicio Profesional Supervisado (EPS) de la carrera de Ingeniería Química, desarrollando la investigación titulada **“PROPUESTA TECNICA A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCION DE COLOR DE ORIGEN TEXTIL POR MEDIO DE ELECTROCOAGULACION PARA FAVORECER EL PROCESO DE POTABILIZACION DE AGUA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS”**. De tal investigación estoy conforme con el informe final, dándolo como aprobado.

Si otro particular, me despido de usted deseándole éxitos en sus actividades diarias.

Atentamente,


Ing. Zenon Much Santos
Asesor de trabajo de graduación.

ZENON MUCH SANTOS
Ing. Químico Col. No. 420
M. Sc. en Ingeniería Sanitaria

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería



UNIDAD DE E.P.S.

Guatemala, 18 de marzo de 2010.
Ref.EPS.DOC.246.03.10.

Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Sarmiento Zeceña.

Por este medio atentamente le informo que como Asesora-Supervisora de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Erick Estuardo Pinzón Gamboa** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **200412572**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“PROPUESTA TÉCNICA A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE ORIGEN TEXTIL POR MEDIO DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA FAVORECER EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

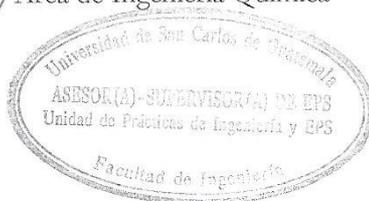
Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
Asesora-Supervisora de EPS
Área de Ingeniería Química

c.c. Archivo
LVPC/ra



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería



UNIDAD DE E.P.S.

Guatemala, 18 de marzo de 2010.
Ref.EPS.D.542.03.10.

Ing. Williams G. Alvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Alvarez Mejía.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"PROPUESTA TÉCNICA A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE ORIGEN TEXTIL POR MEDIO DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA FAVORECER EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS"** que fue desarrollado por el estudiante universitario **Erick Estuardo Pinzón Gamboa**, quien fue debidamente asesorada por el Ing. Zenon Much Santos y Asesorado y Supervisado por la Ingeniera Lorena Victoria Pineda Cabrera.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y de la Asesora -Supervisora de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS

NISZ/ra





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Guatemala, 22 de abril de 2010
Ref. TG.049.2010

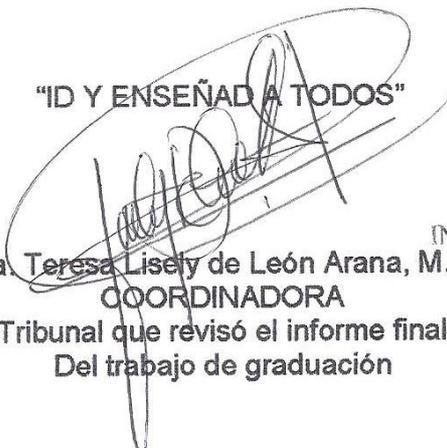
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta EPS-47-10-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del Ejercicio Profesional Supervisado -EPS-, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario **ERICK ESTUARDO PINZÓN GAMBOA**, identificado con carné No. 2004-12572, titulado "PROPUESTA TÉCNICA A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE ORIGEN TEXTIL, POR MEDIO DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA FAVORECER EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS", el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico Zenon Much Santos y asesorado-supervisado de EPS por la ingeniera Lorena Victoria Pineda Cabrera.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **Pinzón Gamboa** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Ref.EIQ.TG.056.2010

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (EPS final) del estudiante **ERICK ESTUARDO PINZÓN GAMBOA** titulado: **“PROPUESTA TÉCNICA A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE ORIGEN TEXTIL, POR MEDIO DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA FAVORECER EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA, EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.

Ing. César Alfonso García Guerra
Director en Funciones
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, Junio de 2010

Cc: Archivo
CAGG/am



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 218.2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA TÉCNICA A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE COLOR DE ORIGEN TEXTIL, POR MEDIO DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA FAVOCECER EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA, EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS**, presentado por el estudiante universitario **Erick Estuardo Pinzón Gamboa**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, appearing to be 'Murphy Olympo Paiz Recinos', written over a large, empty oval shape.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, junio de 2010



/gdech

DEDICATORIA

A:

Dios

A ti Señor Dios Padre Todopoderoso. Ser Supremo que nunca nos abandona e ilumina nuestros pasos de esta vida, en un camino de bien.

Mi madre

La persona con más influencia en mi vida, mi imagen a seguir, con tu ejemplo de sencillez y constancia, por todo tu amor, amistad, comprensión y apoyo, este sueño se ha realizado. Te amo.

Mi padre y abuelos

A mi padre, mi inspiración. Lo que siempre quisiste de mí. Ahora es misión cumplida.

Abuelito, gracias por ser la persona más inteligente que yo he conocido, espero ser como tú.

Abuelita, te agradezco con todo mi corazón haberme apoyado todos estos años, por haber confiado en mí y nunca dudar de mis capacidades. Este triunfo es para ustedes y que Dios los tenga en su gloria

Mi familia

A las familias Gamboa y familias Morales, en especial a la familia Gramajo Gamboa, por estar siempre pendiente de mis actos. Cada día le agradezco a Dios haberme dado una familia tan maravillosa como ustedes.

Alejandra

Mi apoyo incondicional, me has brindado tu amor y cariño, gracias por hacerme luchar por mis objetivos y metas, por ser mi novia y mejor amiga.

Amigos y compañeros

A ustedes, la familia que uno escoge. A mis amigos de Coatepeque, ustedes los que me vieron crecer José Carlos, Ricardo, José Roberto, Jorge y Eduardo Téllez, Teffy. A mis amigos de la "Resi", gracias por los momentos vividos y cada uno sabe lo agradecido que estoy con ustedes. A mis compañeros y amigos con los que estudie esta carrera, gracias por todo, Pamela, Gaby, Vera, Susana, José, Humberto y Victor.

AGRADECIMIENTOS

A:

Dios

Señor te agradezco que me hayas prestado la vida para llegar a este día y hayas puesto a personas muy especiales en mi camino de la consecuencia de este título.

Universidad de San Carlos de Guatemala

Nuestra casa de estudios, creadora de intelecto y conocimiento, gracias por formarme profesionalmente.

Escuela de Ingeniería Química

Por brindarme las herramientas y los conocimientos necesarios para triunfar en este mundo.

Inga. Lorena Pineda, Ing. Jorge Mario Estrada

Por guiarme en este proceso, por su tiempo y amistad, mis más sinceros agradecimientos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
HIPÓTESIS	XIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Tratamiento de acuíferos contaminados con efluentes líquidos.	5
2.2. Turbiedad	6
2.3. Color	7
2.4. Coloides	8
2.5. Clasificación de tratamientos de aguas residuales	9
2.6. Coagulación y floculación	12
2.7. Electrocoagulación	14
2.7.1. Diseño de una celda de electrocoagulación	17
2.7.2. Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación.	18
2.7.2.1. Ventajas del proceso de electrocoagulación	19
2.7.2.2. Desventajas del proceso de electrocoagulación	20

2.7.3. Tratamientos para las aguas residuales industriales textiles por electrocoagulación	20
3. DISEÑO METODOLÓGICO	23
3.1. Variables	23
3.2. Delimitación del campo de estudio	24
3.3. Recursos humanos disponibles	24
3.4. Recursos materiales disponibles	25
3.4.1. Celda electroquímica	25
3.4.2. Equipos de medición	29
3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa	31
3.6. Recolección y ordenamiento de la información	34
3.7. Tabulación y ordenamiento de la información	39
3.8. Análisis estadístico	44
3.8.1. Identificación de valores atípicos	44
3.8.1.1. Gráfica de aberrantes	45
3.8.1.2. Prueba de Dixon	45
3.8.2. Análisis de valores atípicos a los datos obtenidos	46
3.8.3. Análisis de varianza (ANOVA)	56
3.8.3.1. Tabla ANOVA	56
3.8.3.2. Tabla de medias	58
3.8.3.3. Pruebas de rangos múltiples	59
3.8.3.4. Gráfica ANOVA	60
3.8.3.5. Gráficas de residuales	61
3.8.4. ANOVA de turbiedad	62
3.8.5. ANOVA de color	67
3.8.6. ANOVA de pH	72
4. RESULTADOS	77
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	83

CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	93
APÉNDICE	95
1. Diagrama de Ishikawa de causa y efecto	95
2. Requisitos académicos	96
ANEXOS	97
1. Fotografías	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Vista isométrica de la celda de electrocoagulación.	26
2. Vista frontal de la celda de electrocoagulación.	26
3. Vista superior de la celda de electrocoagulación.	27
4. Circuito utilizado en la celda de electrocoagulación.	28
5. Fotografía del montaje experimental.	28
6. Fotografía de colorímetro.	29
7. Fotografía de turbidímetro.	30
8. Fotografía de potenciómetro.	30
9. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 10% de coloración tratada con 0.5 amperios.	46
10. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 10% de coloración tratada con 0.5 amperios.	46
11. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 10% de coloración tratada con 0.5 amperios.	46
12. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 10% de coloración tratada con 1 amperios.	47

13. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 10% de coloración tratada con 1 amperios.	47
14. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 10% de coloración tratada con 1 amperios.	47
15. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 20% de coloración tratada con 0.5 amperios.	48
16. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 20% de coloración tratada con 0.5 amperios.	48
17. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 20% de coloración tratada con 0.5 amperios.	48
18. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 20% de coloración tratada con 1 amperios.	49
19. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 20% de coloración tratada con 1 amperios.	49
20. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 20% de coloración tratada con 1 amperios.	49
21. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 30% de coloración tratada con 0.5 amperios.	50
22. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 30% de coloración tratada con 0.5 amperios.	50
23. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 30% de coloración tratada con 0.5 amperios.	50
24. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 30% de coloración tratada con 1 amperios.	51
25. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 30% de coloración tratada con 1 amperios.	51
26. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 30% de coloración tratada con 1 amperios.	51

27. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 40% de coloración tratada con 0.5 amperios.	52
28. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 40% de coloración tratada con 0.5 amperios.	52
29. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 40% de coloración tratada con 0.5 amperios.	52
30. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 40% de coloración tratada con 1 amperios.	53
31. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 40% de coloración tratada con 1 amperios.	53
32. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 40% de coloración tratada con 1 amperios.	53
33. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 50% de coloración tratada con 0.5 amperios.	54
34. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 50% de coloración tratada con 0.5 amperios.	54
35. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 50% de coloración tratada con 0.5 amperios.	54
36. Gráfica de aberrantes para datos de turbiedad de una muestra con 50% de coloración tratada con 1 amperios.	55
37. Gráfica de aberrantes para datos de color de una muestra con 50% de coloración tratada con 1 amperios.	55
38. Gráfica de aberrantes para datos de pH de una muestra con 50% de coloración tratada con 1 amperios.	55
39. Gráfica ANOVA para turbiedad.	65
40. Gráfica de residuos para turbiedad.	65
41. Gráfica multivariable para turbiedad.	66
42. Gráfica ANOVA para color.	70

43. Gráfica de residuos para color.	70
44. Gráfica multivariable para color.	71
45. Gráfica ANOVA para pH.	75
46. Gráfica de residuos para pH.	75
47. Gráfica multivariable para pH.	76
48. Requisitos académicos.	95
49. Diagrama de causa y efecto.	96
50. Personal de EMPAGUA tomando muestras en sector de descarga.	97
51. Descarga de agua contaminada con colorantes.	97
52. Agua contaminada previo a tratamiento.	98
53. Agua contaminada en proceso de remoción de colorantes.	98
54. Agua ya tratada con el proceso de electrocoagulación.	99
55. Vista superior de la celda, mostrando la espuma formada por el proceso.	99
56. Formación de las burbujas de arrastre de partículas en suspensión.	100
57. Comparación de muestras de agua previo a tratamiento, tratamiento con 0.5 Amperio y tratamiento con 1 Amperio.	100
58. Prueba confirmativa de presencia de coliformes totales.	101
59. Comparación de formación de gas en muestra sin tratar y muestra tratada.	101
60. Prueba presuntiva de presencia de coliformes fecales.	102
61. Comparación de formación de gas en muestra sin tratar y muestra tratada.	102
62. Comparación tubos con análisis presuntivo y confirmativo de muestras sin tratar y ya tratadas.	103

TABLAS

I	Datos de remoción para una concentración de 10% de colorantes.	39
II	Datos de remoción para una concentración de 20% de colorantes.	40
III	Datos de remoción para una concentración de 30% de colorantes.	41
IV	Datos de remoción para una concentración de 40% de colorantes.	42
V	Datos de remoción para una concentración de 50% de colorantes.	43
VI	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 10% de coloración tratada con 0.5 amperios.	46
VII	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 10% de coloración tratada con 0.5 amperios.	46
VIII	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con 10% de coloración tratada con 0.5 amperios.	46
IX	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 10% de coloración tratada con 1 amperios.	47
X	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 10% de coloración tratada con 1 amperios.	47
XI	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con 10% de coloración tratada con 1 amperios.	47
XII	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 20% de coloración tratada con 0.5 amperios.	48

XIII	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 20% de coloración tratada con 0.5 amperios.	48
XIV	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con 20% de coloración tratada con 0.5 amperios.	48
XV	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 20% de coloración tratada con 1 amperios.	49
XVI	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 20% de coloración tratada con 1 amperios.	49
XVII	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con 20% de coloración tratada con 1 amperios.	49
XVIII	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 30% de coloración tratada con 0.5 amperios.	50
XIX	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 30% de coloración tratada con 0.5 amperios.	50
XX	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con 30% de coloración tratada con 0.5 amperios.	50
XXI	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 30% de coloración tratada con 1 amperios.	51
XXII	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 30% de coloración tratada con 1 amperios.	51
XXIII	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con 30% de coloración tratada con 1 amperios.	51
XXIV	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 40% de coloración tratada con 0.5 amperios.	52
XXV	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 40% de coloración tratada con 0.5 amperios	52
XXVI	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con	52

	40% de coloración tratada con 0.5 amperios.	
XXVII	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 40% de coloración tratada con 1 amperios.	53
XXVIII	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 40% de coloración tratada con 1 amperios.	53
XXIX	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con 40% de coloración tratada con 1 amperios.	53
XXX	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 50% de coloración tratada con 0.5 amperios.	54
XXXI	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 50% de coloración tratada con 0.5 amperios.	54
XXXII	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con 50% de coloración tratada con 0.5 amperios.	54
XXXIII	Prueba Q de Dixon para datos de turbiedad de una muestra con 50% de coloración tratada con 1 amperios.	55
XXXIV	Prueba Q de Dixon para datos de color de una muestra con 50% de coloración tratada con 1 amperios.	55
XXXV	Prueba Q de Dixon para datos de pH de una muestra con 50% de coloración tratada con 1 amperios.	55
XXXVI	Análisis de varianza para turbiedad.	62
XXXVII	Tabla de medias por mínimos cuadrados para turbiedad.	63
XXXVIII	Pruebas de múltiple rangos para turbiedad.	64
XXXIX	Análisis de varianza para color.	67
XL	Tabla de medias por mínimos cuadrados para color.	68
XLI	Pruebas de múltiple rangos para color.	69
XLII	Análisis de varianza para pH.	72
XLIII	Tabla de medias por mínimos cuadrados para pH.	73
XLIV	Pruebas de múltiple rangos para pH.	74
XLV	Resultados para muestra con 10% de coloración.	80

XLVI	Resultados para muestra con 20% de coloración.	81
XLVII	Resultados para muestra con 30% de coloración.	81
XLVIII	Resultados para muestra con 40% de coloración.	82
XLIX	Resultados para muestra con 50% de coloración.	82

GLOSARIO

Acidez	La capacidad cuantitativa del agua de neutralizar una base, expresada en equivalente de carbonato de calcio en PPM o del mg/l. El número de los átomos de hidrógeno que están presente determina esto. Es medido generalmente por medio de una valoración con una solución de hidróxido sódico estándar.
Aglomeración	Proceso de unir partículas más pequeñas para formar una masa más grande.
Agua contaminada	La presencia en el agua de suficiente material perjudicial o desagradable para causar un daño en la calidad del agua.
Agua potable	Agua que es segura para beber y para cocinar.
Agua superficial	Toda agua natural abierta a la atmósfera, concerniente a ríos, lagos, reservorios, charcas, corrientes, océanos, mares, estuarios y humedales.
Aguas residuales	Fluidos residuales en un sistema de alcantarillado. El gasto o agua usada por una casa, una comunidad, una granja, o industria que contiene materia orgánica disuelta o suspendida.

Alcalinidad	La alcalinidad significa la capacidad tapón del agua; la capacidad del agua de neutralizar. Evitar que los niveles de pH del agua lleguen a ser demasiado básico o ácido. Es También añadir carbón al agua. La alcalinidad estabiliza el agua en los niveles del pH alrededor de 7. Sin embargo, cuando la acidez es alta en el agua la alcalinidad disminuye, puede causar condiciones dañinas para la vida acuática.
Anión	Un ion cargado negativamente que resulta de la disociación de sales, de ácidos o de álcalis en la solución.
Ánodo	Un sitio en la electrólisis donde el metal entra en solución como catión que se va detrás de un equivalente de los electrones que se transferirán a un electrodo opuesto, llamada cátodo.
Bacteria coliforme	Bacteria que sirve como indicador de contaminantes y patógenos cuando son encontradas en las aguas. Estas son usualmente encontradas en el tracto intestinal de los seres humanos y otros animales de sangre caliente.
Catión	ión de carga negativa, resultado como la disolución de moléculas en agua.
Cátodo	Un lugar en la electrolisis donde los cationes en disolución son neutralizados por electrodos que permanecen fuera de la superficie o produce una reacción secundaria con el agua.

Color	Es el color que en el agua produce la materia suspendida y disuelta.
Coloides	Es un sistema físico-químico formado por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas. La fase dispersa es la que se halla en menor proporción.
Coagulación	Proceso de desestabilización de las partículas coloidales por medio de agentes externos llamados coagulantes.
Coagulantes	Partículas líquidas en suspensión que se unen para crear partículas con un volumen mayor.
Conductividad	La cantidad de electricidad que un agua puede conducir. Esta expresada en magnitudes químicas.
Contaminante	Un compuesto que a concentración suficientemente alta causa daños en la vida de los organismos.
Contaminantes tóxicos del agua	Compuestos que no son encontrados de forma natural. en el agua vienen dados en concentraciones que causan la muerte, enfermedad, o defectos de nacimiento en organismos que los ingieren o absorben.
Efluente	La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, a un tanque de oxidación, a un tanque para un proceso de depuración biológica del agua, etc.

Escherichia coli	Bacteria coliforme que está a menudo asociada con el hombre y desechos a animales y es encontrada en el intestino. Es usada por departamentos de salud y laboratorios privados para medir la calidad de las aguas.
Electrocoagulación	Técnica electroquímica de tratamientos de aguas residuales donde un electrodo de sacrificio se corroe para que se lleve a cabo la coagulación.
Floculación	Proceso por el cual las partículas coloidales desestabilizadas llamadas flocs se agregan unas con otras, con el fin de sedimentarse.
Flóculo	Masa floculada que es formada por la acumulación de partículas suspendidas. Puede ocurrir de forma natural, pero es usualmente inducido e orden de ser capaz de eliminar ciertas partículas del agua residual.
Flotación	Proceso de separación sólido-líquido o líquido-líquido, el cual es aplicado para partículas cuya densidad es más pequeña que la densidad del líquido que las contiene. Hay tres tipos: flotación natural, ayudada e inducida.
Hidrófilo	Que tiene afinidad por el agua.
Hidrófobo	Que repele al agua.
Hidrólisis	La descomposición de compuestos orgánicos por la interacción del agua.

Lodos	Residuo semisólido, que contiene microorganismos y sus productos, de cualquier sistema de tratamiento de aguas.
pH	El valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculado por el número de iones de hidrógeno presente. Es medido en una escala desde 0 a 14, en la cual 7 significa que la sustancia es neutra. Valores de pH por debajo de 7 indica que la sustancia es ácida y valores por encima de 7 indican que la sustancia es básica.
Planta de tratamiento	Una estructura construida para tratar el agua residual antes de ser descargada al medio ambiente.
Turbiedad	Falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido, generalmente se hace referencia al agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez.

RESUMEN

La electrocoagulación es una técnica limpia y eficiente para el tratamiento de aguas residuales, la cual no se ha desarrollado ampliamente y falta un largo camino para su perfección.

En esta investigación se buscó determinar la viabilidad técnica de utilizar la electrocoagulación para eliminar contaminación de colorantes de origen textil del río Xayá, el cual se utiliza en la distribución de agua potable para la ciudad de Guatemala. Se discuten las ventajas y desventajas que tiene este método, planteando el diseño y operación del reactor.

Desde este punto de vista, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación optimizando los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico.

Palabras clave: Tratamiento de aguas residuales. Contaminación textil, Electrocoagulación, Electrólisis, Electroodos, Coagulación, Electroflotación.

OBJETIVOS

General:

- Evaluar la técnica de electrocoagulación a escala piloto para la remoción de colorantes de origen textil aplicada al agua cruda proveniente del río Xayá, para ayudar al proceso de potabilización en la planta de tratamiento de Lo de Coy.

Específicos:

1. Diseñar una celda de electrocoagulación que remueva los colorantes y turbiedad, presentes en el agua cruda del río Xayá.
2. Determinar valores óptimos de operación en la celda de electrocoagulación para remoción de diferentes concentraciones de colorantes disueltos en el agua cruda.
3. Obtener la eficiencia del sistema a través del porcentaje de remoción de color y turbiedad, con al menos un 50%.

HIPÓTESIS

La hipótesis manejada en la presente investigación es que, la cantidad de corriente eléctrica que se le aplica a una celda de electrocoagulación para el tratamiento de una muestra de agua contaminada con coloración de origen textil determina de forma directa la cantidad de remoción tanto de coloración como de turbiedad de dicha muestra tratada.

INTRODUCCIÓN

En el siguiente trabajo se presenta la investigación titulada “Propuesta técnica a escala piloto para la remoción de color de origen textil, por medio de electrocoagulación para favorecer el proceso de potabilización de agua, en una planta de tratamiento de aguas”

El río Xayá es parte fundamental del acueducto nacional Xayá – Pixcayá, el cual suministra de agua cruda a la planta de tratamiento Lo de Coy. En esta planta se produce el 33% de la producción de la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA), beneficiando de este servicio a más de tres y medio millones de personas en la metrópoli capitalina, rigiéndose bajo la Norma Guatemalteca Obligatoria COGUANOR NGO 29001.

En la actualidad se sufre de contaminación a este río, por parte de la industria textilera del municipio de Tecpán, Chimaltenango; provocando el cierre temporal de este afluente, que representa un 37% del caudal que pasa por el acueducto nacional e infiere en la disminución de un 14% de la producción total de la planta.

En esta investigación se encontrará la solución para la reintegración del afluente del río Xayá al acueducto nacional, eliminando cualquier tipo de contaminantes y así recuperando la capacidad perdida por causa de la contaminación de la industria textilera y se buscaran maneras legales de hacer que las industrias textiles creen sistemas de tratamientos de aguas residuales previo a disposición al río Xayá.

1. ANTECEDENTES

EMPAGUA es la institución Municipal que planifica, diseña, ejecuta y supervisa las obras de construcción, mejoramiento, ampliación, reconstrucción y mantenimiento del servicio de agua potable y saneamiento en la Ciudad de Guatemala y sus áreas de influencia, solucionando las demandas y necesidades de una forma eficiente, participativa y consensuada, contribuyendo al desarrollo nacional y al bienestar social de la población guatemalteca. Para conservar y optimizar la calidad de sus servicios, EMPAGUA mantiene un mejoramiento constante que le permite responder a las demandas de los usuarios del servicio.

Esta institución cuenta, para abastecer de agua potable a la mayoría de la ciudad, con el Acueducto Nacional Xayá – Pixcayá, el cual tiene su inicio en la ciudad de Tecpán, Chimaltenango. Este acueducto se encuentra en ciertos puntos de su recorrido a cielo abierto, esto provoca que cualquier tipo de industria pueda depositar sus desechos en el caudal de este acueducto, caso que sucede con la industria textilera ubicada en este lugar de nuestro país.

Ya que la mayoría de estas textileras son de tipo domésticas, no poseen plantas de tratamiento de aguas residuales, esto indica que todos los desechos que vienen de su proceso son vertidos directamente al río Xayá, provocando una contaminación del agua. Esto hizo que EMPAGUA deshabilitara el caudal del entrada al acueducto proveniente del río Xayá, perdiendo así un 14% de producción de la planta.

A partir de este problema surge la necesidad de la realización de esta investigación, para recuperar este porcentaje de producción perdido, ya que esto afecta a parte de la ciudad ya que ese porcentaje se ve reflejado en una pérdida de 120 l/s de agua potable producida, agua que deja de llegar a los hogares de miles de personas de esta capital.

Para poder distribuir agua de calidad, EMPAGUA se basa en la norma guatemalteca obligatoria COGUANOR NGO 29001. Para poder cumplir con esta norma, EMPAGUA tiene todo un proceso de potabilización de agua cruda para distribución a nivel capitalino, esta agua cruda se obtiene de los ríos Xayá y del río Pixcayá que son unidos en el Acueducto Nacional Xayá – Pixcayá, y a su vez, introducidos a la planta de tratamiento de agua de Lo de Coy.

El problema de las industrias textileras se reflejó en la disminución de producción y paros en la planta debido a la aparición de una coloración negra en el agua ya tratada en el paso de los sedimentadores, este problema no pudo ser prevenido debido a que la presencia de contaminantes no fue detectada por el equipo de laboratorio en la caja de entrada de agua cruda a la planta de

tratamiento ni era detectable en la superficie de los floculadores, este fenómeno se presentaba en la superficie de los sedimentadores, ya que en este punto del proceso es donde se separa todo el floculo ya formado y posteriormente se deposita en el fondo de los sedimentadores. El colorante por ser materia en suspensión más pequeña que las partículas coloidales que normalmente son encontradas en el agua cruda, no eran removidas por el sulfato de aluminio, ni tampoco por los filtros, quedando así en el agua un color negro. Asimismo, algunos colorantes provienen de anilinas, que al estar en contacto con cloro y situaciones anóxicas, se descomponen en cianuros, que de no ser controlado puede ser muy peligroso.

Este problema surge en el área del río Xayá, donde se detectaron tubos de alrededor de 20 pulgadas de diámetro, descargando desechos líquidos al río de diversos colores, dependiendo de la hora del día y del tipo de material que la planta estaba utilizando. Así eran los residuos vertidos al río, vertidos de color café, verde, amarillo, rojo, etc.

La planta de tratamiento está diseñada para tratar un gasto promedio de 1500 l/s de la combinación de los dos ríos. El aporte de cada río está distribuido en 67% para el río Pixcayá y un 37% para el río Xayá. Actualmente entra un gasto de 1130 l/s proveniente del río Pixcayá, ya que el afluente del río Xayá esta deshabilitado debido al problema de contaminación de color de origen textil, lo cual se ve reflejado en la disminución de un 14% la producción total del sistema. Esto afectó a la producción que se tenía antes, que era de más de diez mil millones de litros de agua potable idóneo para el consumo humano producidos cada mes por la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA). Estos

diez millones de metros cúbicos mensuales satisface la necesidad de más de tres millones y medio de personas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tratamiento de acuíferos contaminados con efluentes líquidos.

El tratamiento del agua, previo a su vertido en el medio ambiente o para la potabilización de esta para que sea apta al consumo humano, tiene por objeto eliminar los contaminantes de la manera más económica posible, los principales problemas aparecen con los vertimientos de efluentes industriales, que deterioran gravemente el medio ambiente debido a la alta concentración de contaminantes y a la peligrosidad de cada uno de ellos.

El agua consta de tres tipos principales de impurezas: físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista físico, se puede hablar que los sólidos totales que son impurezas del agua se pueden clasificar como partículas no filtrables o en suspensión, filtrables o disueltas y una tercera posibilidad es el caso intermedio que corresponde a los coloides. En general, los coloides no tienen un límite fijo de tamaño y se suelen estudiar bajo un enfoque

fisicoquímico desde el punto de vista de sus propiedades. Un material coloidal puede tardar 755 días en sedimentar, por tanto es importante cambiar esta condición.

2.2. Turbiedad

Para comprender mejor el estudio del proceso de clarificación del agua se introduce el concepto de turbiedad. Se entiende por turbiedad a la propiedad óptica de una muestra de diseminar y absorber la luz en lugar de transmitirla en línea recta.

La turbiedad esta principalmente formado por arcillas en dispersión. El término arcilla comprende una gran variedad de compuestos, pero en general se refiere a tierra fina (0.002 mm de diámetro de grano o menos), a veces coloreada, que adquiere plasticidad al mezclarse con limitadas cantidades de agua. Químicamente son silicatos de aluminio con fórmulas bastantes complejas como la kaolinita, illita, muscovita, bentonita.

Existen dos tipos de equipos para medir turbiedad. En la primera clase de equipos están el turbidímetro de aguja de platino y la bujía de Jackson, los cuales son aptos para medir turbiedades altas. En la segunda clase de equipos está el turbidímetro Hach, que se utiliza para medir turbiedades bajas (nefelometría).

2.3. Color

Además de turbiedad es posible también definir color. Se habla de color aparente si no se ha removido la turbiedad y de color verdadero del agua en caso contrario. En general el color se determina mediante unidades de Hazen o Unidades de Color en escala Platino Cobalto. Estas mediciones se realizan con comparaciones de estándares a base de cloruro de cobalto (Cl_2Co) y cloroplatinato de potasio (Cl_6PtK_2) usando espectrofotometrías. El color del agua se debe principalmente a materia orgánica o minerales en suspensión o en estado coloidal. En general las sustancias liofílicas son responsables de la coloración del agua.

2.4. Coloides

Los sistemas coloidales se pueden dividir en:

- **Los coloides moleculares**, están formados por sustancias poliméricas, formadas de largas cadenas orgánicas, con pesos moleculares altos.
- **Los coloides de asociación o micelares**, pueden formarse por asociación de las moléculas más pequeñas de minerales o compuestos orgánicos, que espontáneamente se aglutinan en presencia de un dispersante en partículas de tamaño coloidal.
- **Los coloides liofílicos**, están constituidos por las dispersiones moleculares de sustancias poliméricas o sustancias aglutinadas en tamaño coloidal, que tienen fuerte atracción al solvente y reaccionan químicamente con el agua en la cual están dispersas.
- **Los coloides liofóbicos**, están formados por sustancias insolubles en el dispersante y por lo mismo son mucho más inestables que los liofílicos.
- **Los coloides diuturnos**, son aquellos que no se modifican o aglutinan durante mucho tiempo comparado con el tiempo de observación.
- **Los coloides caducos**, son, al contrario, los transitorios que se aglutinan o cambian rápidamente.
- Los coloides además pueden ser orgánicos como las grasas o las proteínas, o inorgánicos como las arcillas naturales.

En cuanto a los coloides, se pueden clasificar en el rango de tamaño entre 1 μm a 1000 μm mediante un microscopio electrónico. Los coloides se pueden clasificar según varios aspectos. Pueden considerarse liofílicos si se estabilizan con capas de hidratación o bien liofóbicos si presentan repulsión por el solvente y por tanto son más inestables. También pueden clasificarse según sea su duración en Caduco (cambian rápidamente) o Diuturno (larga duración). Del punto de vista de la química hay dos clases: orgánicos o inorgánicos.

2.5. Clasificación de tratamientos de aguas residuales

Los contaminantes presentes en aguas residuales pueden eliminarse con procesos químicos, físicos y/o biológicos. Los métodos individuales de tratamiento de aguas suelen clasificarse en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios. Los métodos de tratamiento en los que predominan la acción de fuerzas físicas se conocen como operaciones unitarias, entre estas se encuentran el desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, transferencia de gases y filtración. Los métodos en los cuales la eliminación o conversión de los contaminantes se consigue con la adición de productos químicos o gracias al desarrollo de ciertas reacciones químicas, se conocen como procesos químicos unitarios y fenómenos como la precipitación, adsorción y la desinfección son ejemplos de procesos convencionales en el tratamiento de aguas.

El tratamiento de agua puede subdividirse en cuatro etapas: pretratamientos, clarificación (tratamientos primarios), desinfección (tratamientos secundarios), acondicionamiento químico y organoléptico (tratamientos terciarios), basándose en procesos y operaciones unitarias que se combinan y complementan.

Los pretratamientos son los procesos de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Consiste en la eliminación de material grueso, arenoso y flotante (grasas y aceites) y en la modificación de la distribución del tamaño de las partículas presentes en el agua residual. Sus objetivos son: acondicionar el agua residual para ser tratada en las siguientes etapas de proceso, remover materiales que puedan interferir con los equipos y procesos de tratamiento de aguas abajo, y reducir la acumulación de materiales en procesos aguas abajo.

Los tratamientos primarios son los que eliminan los sólidos suspendidos, coloides y de la materia orgánica del agua residual. Se efectúan previos a los tratamientos secundarios y no remueve microorganismos. Se subdivide en coagulación, floculación y sedimentación y/o filtración.

Cuando las aguas residuales han sido previamente tratadas mediante métodos preliminares y primarios (físicos o físico-químicos) y no se ha logrado eliminar un gran porcentaje de la contaminación orgánica, se requiere someter estas aguas a tratamientos en donde la acción de los microorganismos transforma la materia orgánica biodegradable de los residuos en material estable e inofensivo a las fuentes receptoras.

Los tratamientos secundarios son la combinación de diferentes procesos empleados para la eliminación microorganismos dañinos al ser humano, mediante la adición de compuestos con acción desinfectante tal como pueden ser el cloro y/o yodo.

Los tratamientos terciarios son los procesos encargados de conseguir una calidad excepcional en el efluente, por tanto se aplican en casos especiales. Las aguas que han sido tratadas con tratamientos terciarios pueden ser utilizadas en gran variedad de fines entre los que se encuentra el reúso. Es el nivel de tratamiento necesario para la eliminación de constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención como nutriente, compuestos tóxicos, excesos de materia orgánica o de sólidos suspendidos, iones y sólidos disueltos.

2.6. Coagulación y floculación

Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico mayor al del agua, llamados floc. Dicho proceso se usa para:

- Remoción de la turbiedad orgánica e inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- Remoción del color verdadero o aparente.
- Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y precipitados químicos suspendidos en otros.

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales de la coagulación-floculación del agua:

- La desestabilización de partículas suspendidas, ósea la eliminación de las fuerzas que las mantienen separadas.
- El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre si y formando una malla de tridimensional coágulos porosos

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas, entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores.

Dos modelos explican el primer aspecto: el de la doble capa, basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión y el del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides. El segundo aspecto debe distinguirse entre floculación ortocinética y pericinética. La primera es inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas y la segunda la producida internamente dentro del líquido, por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro de aquel y por la gravedad o peso de las partículas que la caer tienden a aglomerarse y se realiza en un tiempo muy corto después de la desestabilización de las partículas.

2.7. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un método electroquímico de tratamiento de clarificación de aguas contaminadas donde un electrodo de sacrificio se corroe para que se lleve a cabo la coagulación.

La electrocoagulación es un proceso complicado que envuelve varios mecanismos químicos y fenómenos físicos, que emplea electrodos consumibles para suplir iones en el agua residual. Un proceso de electrocoagulación involucra tres etapas sucesivas:

- Formación de los coagulantes por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio.
- Desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión.
- Agregación de las fases desestabilizadas para formar flocs.

El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y del rompimiento de emulsión se describe a continuación:

- Compresión de la doble capa difusiva alrededor de las especies cargadas por la interacción de los iones generados por la oxidación del ánodo de sacrificio.

- Neutralización de las cargas de las especies iónicas presentes en el agua residual ocasionada por los iones coagulantes producidos por disolución electroquímica del ánodo de sacrificio. Estos iones coagulantes reducen la repulsión electrostática entre partículas lo que causa la coagulación y de este proceso resulta una carga neta igual a cero.
- Los flocs que se forman como resultado de la coagulación crean una capa de lodos que atrapa y conduce las partículas coloidales que permanecen en el medio acuoso.

Las siguientes reacciones fisicoquímicas tienen lugar en una celda de electrocoagulación:

- Reducción catódica de las impurezas presentes en el agua residual.
- Descarga y coagulación de las partículas coloidales.
- Migración electroforética de iones en solución.
- Electroflotación de las partículas coaguladas ocasionada por las burbujas de hidrógeno y oxígeno producidas por los electrodos.
- Reducción de los iones metálicos en el cátodo.
- Otros procesos químicos y electroquímicos.

Cuando un potencial es aplicado por una fuente externa de energía, en el ánodo se lleva a cabo una oxidación mientras que en el cátodo se lleva a cabo una reducción. La reacción electroquímica con el metal (M) como ánodo se puede resumir como se muestra a continuación

En el ánodo:



En el cátodo:



En el ánodo metálico, fabricado habitualmente de hierro o aluminio, se llevan a cabo dos reacciones de separación. Inicialmente el ánodo se disuelve y produce de manera continua hidróxidos poliméricos metálicos que son excelentes agentes coagulantes. La coagulación ocurre cuando los cationes combinados con las partículas negativas son llevados cerca del ánodo por movimiento electroforético.

También se da la electrolisis del agua en una reacción paralela produciendo pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas atraen las partículas floculadas y las hace flotar hasta la superficie, y es por esto que el proceso de electrocoagulación está asociado de manera intrínseca a la electroflotación. Los contaminantes presentes en el agua residual son tratados por reacción química y por precipitación o adición física o química

a materiales coloidales que se generan por la erosión del electrodo. Estos son removidos posteriormente por electroflotación o por sedimentación y filtración. El éxito de un proceso de electrocoagulación está determinado por el tamaño de burbuja y la mezcla adecuada de éstas con el agua residual. Las pequeñas burbujas proveen mayor área superficial para que las partículas se adhieran en el lodo acuoso, resultando así una separación eficiente.

2.7.1. Diseño de una celda de electrocoagulación

Es importante diseñar una celda de electrocoagulación para alcanzar la máxima eficiencia posible, por lo tanto se deben considerar los siguientes factores:

- Se debe minimizar el sobrepotencial entre electrodos causado por la resistencia de la solución y la acumulación de burbujas en la superficie de los electrodos.
- Se debe maximizar el paso de electrones entre los electrodos, reduciendo la distancia entre ellos.

El transporte de masa se puede incrementar aumentando la turbulencia de la solución en el reactor. Las burbujas gaseosas de oxígeno e hidrógeno que se forman alrededor de los electrodos son de forma esférica y a medida que se acumulan en la superficie de los electrodos se incrementa la resistencia

eléctrica de la celda y como resultado de esto se requiere mayor cantidad de energía para lograr la eficiencia de remoción óptima; para minimizar esta acumulación de las burbujas se puede emplear vibraciones.

Se debe tener en cuenta que una diferencia de potencial mayor se requiere para un mismo flujo de corriente cuando se realiza el arreglo en serie, por que las celdas conectadas en serie tienen una mayor resistencia mientras que en un arreglo en paralelo la corriente eléctrica se divide entre los electrodos de manera proporcional a la resistencia de la celda individual.

2.7.2. Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación.

La electrocoagulación es una técnica eficiente cuya relación costo efectividad es buena. Además como no se requiere de productos químicos en este proceso entonces no se produce contaminación secundaria. Con esta técnica se pueden remover partículas coloidales pequeñas de manera eficiente en comparación con las técnicas químicas convencionales, ya que las pequeñas partículas cargadas tienen mayor probabilidad de ser coaguladas por el campo eléctrico que las mantiene en movimiento.

2.7.2.1. Ventajas del proceso de electrocoagulación:

- Las burbujas producidas durante la electrocoagulación tienen mayor estabilidad que las generadas en los tratamientos de efluentes con flotación de aire comprimido y de flujo de aire disuelto, por lo que conservan su gran superficie de contacto y por tanto, aumenta la eficiencia de la remoción.
- Éste tratamiento electroquímico provoca una mejor y rápida ruptura de las emulsiones, comparado con los equipos convencionales para separación de aceites.
- La cantidad de lodos generados son menores que para otros métodos tradicionales, ya que se efectúa de manera simultánea flotación y coagulación.
- Permite la reducción de una amplia variedad de contaminantes, como: metales pesados, grasas y aceites, materia orgánica, fosfatos y cianuros.
- Sus costos de operación son relativamente bajos si se realiza un apropiado diseño del reactor, selección de los materiales para electrodos, y una optimización de los parámetros de funcionamiento. Éste proceso requiere poca corriente eléctrica y bajos costos de mantenimiento.
- El líquido separado por electrocoagulación puede ser reprocesado como subproducto, lo cual permite que el efluente tratado pueda ser reutilizado.
- Los equipos para electrocoagulación son compactos y fáciles de instalar, factores que son muy apreciables cuando no se dispone de espacio suficiente.
- Este proceso es sencillo de automatizar debido a que el control de dosificación se realiza mediante el ajuste de corriente.

2.7.2.2. Desventajas del proceso de electrocoagulación:

Entre las desventajas de la electrocoagulación se encuentran requerimientos como el reemplazo periódico del electrodo de sacrificio, y que el agua tenga una conductividad mínima diferente de cero que varía según el diseño del reactor lo que limita su uso en aguas con baja cantidad de sólidos disueltos. En el caso de la remoción de componentes orgánicos se pueden formar compuestos orgánicos tóxicos al emplear el método de electrocoagulación. También como una desventaja se encuentra la formación de una película de óxido impermeable en el cátodo que interfiere con el buen desempeño de la celda, este efecto se puede disminuir cambiando la polaridad de la celda. Los costos de operación de la celda de electrocoagulación pueden ser altos donde los costos de la electricidad sean altos.

2.7.3. Tratamientos para las aguas residuales industriales textiles por electrocoagulación

La industria textil es un sector expuesto a la sensibilidad pública y está sometido a críticas, por lo tanto debe considerar como lograr sobre la tela los efectos finales deseados sin tener un impacto sobre el medio ambiente negativo. Por el momento la importancia del impacto ambiental es una realidad

en los países industrializados y una necesidad a corto y mediano plazo para aquellos que se encuentran en vía de desarrollo, esto significa que toda inversión realizada en la protección del medio ambiente supone una garantía para el futuro, el alcance de mercados internacionales, el aumento de la competitividad, evita problemas con el público, el gobierno y las entidades financieras internacionales, además permite controlar riesgos de accidentes, sacar ventajas de nuevas oportunidades y disminuir sanciones por contaminación.

Debido a la variabilidad en composición de las aguas residuales provenientes de la industria textil algunos de los métodos convencionales empleados para la descontaminación de este tipo de ARI como degradación química, adsorción, precipitación, fotodegradación, biodegradación y coagulación química son inadecuados e insuficientes, y los costos de emplear dichos métodos son altos debido a que requieren de gran cantidad de reactivos químicos y espacio para el montaje de los equipos de proceso. Es por esto que los métodos electroquímicos para tratamiento de estos efluentes son tan prometedores debido a que se han comprobado su buen funcionamiento para remover contaminantes que se encuentran en este tipos de aguas y además se ha encontrado que la mayoría de los compuestos que originan el color de los efluentes son factibles de remover por medio de tratamientos electrolíticos. La electrocoagulación es un método electroquímico simple y efectivo que ha sido empleado de manera en los últimos años como un método para tratar aguas residuales de la industria textil, debido a que remueve de manera eficiente DQO, color, turbiedad y sólidos disueltos y además opera con bajo consumo de energía.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables.

En la presente investigación se manejaron como variables independientes la cantidad de contaminación, por medio de coloración textil una muestra de agua y la cantidad de corriente eléctrica que se le aplica a la celda de electrocoagulación para tratar el agua contaminada.

Como variables dependientes se manejaron la turbiedad, el color y el pH de la muestra de agua ya tratada a una cantidad de corriente determinada.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio de la presente investigación se llevó a cabo en el departamento de Chimaltenango, más específicamente en la ciudad de Tecpán, que es donde se encuentran ubicadas las texileras tradicionales que son las que están causando este tipo de contaminación.

3.3. Recursos humanos disponibles

Para el desarrollo de esta investigación, se contó con recurso humano capacitado para el tratamiento de aguas, personal que labora en la Empresa Municipal de Agua de la Ciudad de Guatemala, EMPAGUA, en la planta de tratamiento Lo de Coy y personal del Laboratorio Unificado Dra. Alba Tabarini Molina.

- Ing. Zenon Much, asesor de trabajo de graduación.
- Ing. Hugo Vásquez. Sub-gerente técnico de EMPAGUA,
- Ing. Víctor Paz, superintendente de la planta Lo de Coy.
- Ing. Williams Álvarez, Director de Escuela de Ing. Química.
- Ing. Lorena Pineda, supervisora docente de área de EPS.

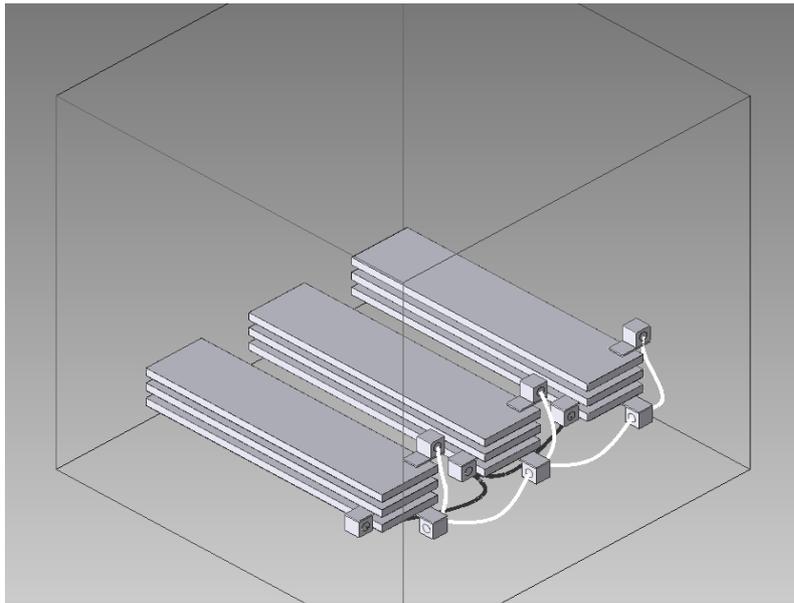
- Ing. Jorge Mario Estrada Asturias, revisor de trabajos de graduación.
- Daniel Pérez, encargado del Laboratorio de análisis químicos y físicos de la planta de tratamiento Lo de Coy.
- Personal del Laboratorio Unificado Dra. Alba Tabarini Molina.
- Jefes de turno de la planta de tratamiento Lo de Coy.
- Operadores de la planta de tratamiento Lo de Coy.
- Cuadrilla encargada del acueducto nacional Xayá – Pixcayá.

3.4. Recursos materiales disponibles

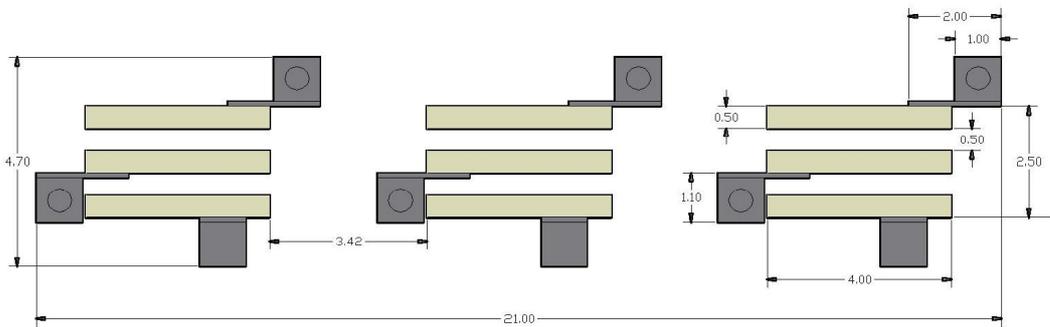
3.4.1. Celda electroquímica.

El equipo que se utilizó para desarrollar este trabajo de graduación es una celda electroquímica a escala piloto, la cual consta de electrodos, 3 electrodos en total y cada uno consta de 3 placas de aluminio de 17 cm por 4 cm, de las cuales las placas externas están conectadas al positivo y la placa intermedia al negativo de la fuente de poder. Las placas están separadas entre sí a 0.5 cm de distancia por medio de aislantes plásticos. La fuente de poder tiene 12 V en corriente directa y 5 amperios en su salida, las placas están conectadas entre sí mediante cable número 14 y terminales de aluminio. Los electrodos se introducen en un recipiente de vidrio de forma cúbica de 25 cm de lado con capacidad de 12 litros.

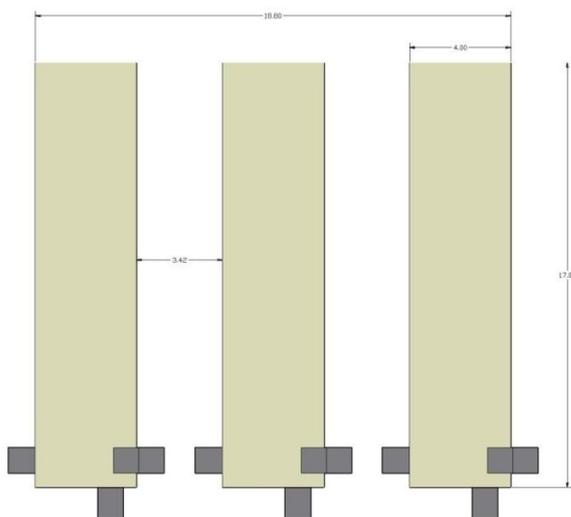
Figura 1. Vista isométrica de la celda de electrocoagulación



**Figura 2. Vista frontal del diseño de una celda de electrocoagulación.
(Medidas tomadas en centímetros)**



**Figura 3. Vista superior del diseño de una celda de electrocoagulación.
(Medidas tomadas en centímetros)**



El circuito utilizado para el proceso de clarificación del agua con fines de la eliminación de colorante de origen textil, es sencillo de fabricar y los componentes se encuentran en cualquier tienda electrónica. La fuente de poder recibe un voltaje AC de 110 V y en su salida da 13 V en corriente DC, esta está conectada en serie a un transistor TIP 41A en el cual la Base está conectada a la fuente de poder, el Colector está conectado al polo negativo de la fuente de poder y el Emisor se conecta en serie con dos Reóstatos, uno de 100K Ω y otro en serie de 20 K Ω , esto para regular la cantidad de corriente, amperaje que se le introducirá a los electrodos de aluminio, este amperaje se pudo regular en un rango de 0-1.2 Amperios, lo suficiente para llevar a cabo el experimento.

Figura 4. Diagrama del montaje experimental

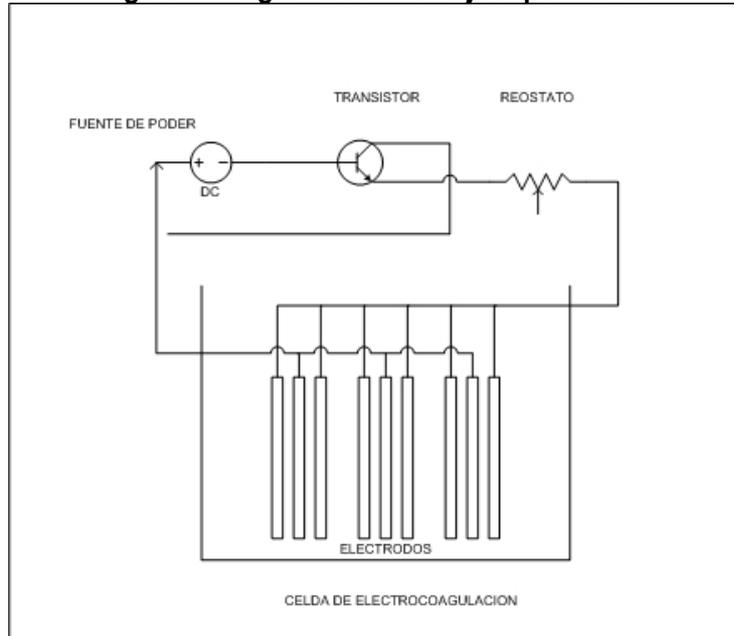
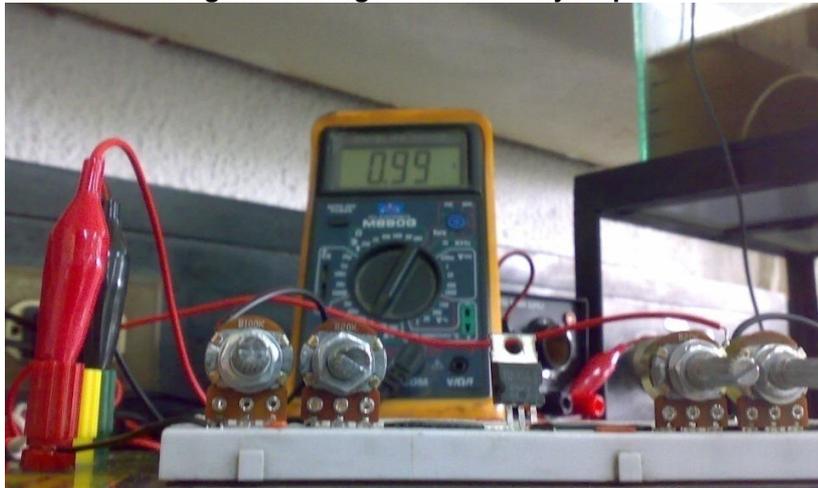


Figura 5. Fotografía del montaje experimental



3.4.2. Equipos de medición

Para la toma de datos se contó con espectrómetros digitales, para las mediciones de color, se utilizó el colorímetro HACH DR/2000 en mediciones de unidades de color en escala platino-cobalto.

Figura 6. Fotografía de Colorímetro



Fotografía tomada en laboratorio.

Para la medición de turbiedad, se utilizó el turbidímetro HACH 2100N con lecturas de unidades nefelométricas de turbiedad NTU.

Figura 7. Fotografía de Turbidímetro



Fotografía tomada en laboratorio.

Para la determinación del pH del agua tratada, se utilizó un potenciómetro HANNA INSTRUMENTS pH 213 capaz de tomar lecturas de temperatura.

Figura 8. Fotografía de Potenciómetro



Fotografía tomada en laboratorio.

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

Para determinar la factibilidad del uso de la técnica de electrocoagulación en el tratamiento de agua contaminada por colorantes de origen textil y así ayudar al proceso de potabilización del agua, se utilizó un software especializado en estadística, STATSGRAPHIC Centurion. Con la ayuda de este software se determinó la manera adecuada de realizar el diseño del experimento, de tal forma que los resultados obtenidos tengan una significancia estadística útil.

Este paquete tiene una herramienta llamada “Determinación de tamaño de muestra”. En la cual se determina el tamaño de muestra requerido para estimar la media de una distribución normal. Asumiendo que la desviación estándar de la distribución normal es igual a 1.0, se requieren 5 observaciones para estimar la media dentro de ± 1.0 con 90.0% de confianza con la cual se espera que el experimento se lleve a cabo.

Este programa permite diseñar la manera de realizar el experimento, este se basa en un diseño experimental factorial estándar. En este diseño experimental se estimarán los efectos de 2 factores categóricos experimentales, sobre la manera en que afectan a 3 factores respuestas.

DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Este experimento factorial estudia el efecto que tiene, la cantidad de corriente eléctrica que se le imparte a una cantidad de agua con cierto porcentaje de contaminación por colorantes, sobre los factores respuestas, que en este caso son el color, la turbiedad y el pH.

Con la ayuda de este programa se determinó que hay 10 combinaciones de estos dos factores experimentales que afectan a los factores respuesta y para tener una significancia estadística, estos se replicarán 5 veces para cumplir con un 90% de confiabilidad. Dando como total 50 corridas para completar el experimento.

Los factores experimentales y factores respuestas se detallan a continuación.

Factores.

- Concentración de colorantes (10%, 20%, 30%, 40%, 50%)
- Cantidad de corriente (0.5 y 1.0 Amperios)

Factores respuesta.

- Color (U. Pt-Co, unidades de color en escala Platino-Cobalto)

- Turbiedad (NTU, unidades nefelométricas de turbiedad)
- pH

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

HOJA DE TOMA DE DATOS

Concentración de colorante	10	%	/	/	/	/	/	
Cantidad de corriente	0,5	Amperios						
Turbiedad inicial	899	NTU						
Color inicial	4200	U						
pH inicial	7,63							
Voltaje	1,2	voltios						
Tiempo de tratamiento	60	min						
			Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
			Turbiedad (NTU)	Color (U, Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U, Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U, Pt-Co)
			189	1530	198	1500	196	1570
			pH	8,5	pH	8,63	pH	8,5
			Notas:					
			Corrida 4		Corrida 5			
			Turbiedad (NTU)	Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)		
			174	1490	186	1540		
			pH	8,36	pH	8,42		

Concentración de colorante	10	%	/	/	/	/	/	
Cantidad de corriente	1,0	Amperios						
Turbiedad inicial	899	NTU						
Color inicial	4200	U						
pH inicial	7,63							
Voltaje	1,2	voltios						
Tiempo de tratamiento	60	min						
			Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
			Turbiedad (NTU)	Color (U, Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U, Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U, Pt-Co)
			15,3	66	14,3	79	12,5	63
			pH	8,88	pH	8,92	pH	8,84
			Notas:					
			Corrida 4		Corrida 5			
			Turbiedad (NTU)	Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)		
			13,2	81	13,8	75		
			pH	8,92	pH	8,94		

min: minutos.

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad.

U: unidades de color en la escala Platino-Coalto.

HOJA DE TOMA DE DATOS

Concentracion de colorante	20	%	/	/	/	/	/	
Cantidad de corriente	0,5	Amperios						
Turbiedad inicial	889	NTU						
Color inicial	4470	U						
pH inicial	7,80							
Voltaje	12	voltios						
Tiempo de tratamiento	60	min						
			Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)		
	201	1720	198	1840	214	1790		
	pH	8,32	pH	8,64	pH	8,21		
			Corrida 4		Corrida 5		Notas:	
	Turbiedad (NTU)	Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)				
	208	1780	203	1820				
	pH	8,41	pH	8,80				

Concentracion de colorante	20	%	/	/	/	/	/	
Cantidad de corriente	1,0	Amperios						
Turbiedad inicial	889	NTU						
Color inicial	4470	U						
pH inicial	7,80							
Voltaje	12	voltios						
Tiempo de tratamiento	60	min						
			Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)		
	19,3	157	20,1	148	21,3	152		
	pH	9,13	pH	9,15	pH	9,10		
			Corrida 4		Corrida 5		Notas:	
	Turbiedad (NTU)	Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)				
	19,8	161	20,5	154				
	pH	9,12	pH	9,14				

min: minutos

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad.

U: unidades de color en la escala Platino-Cobalto.

HOJA DE TOMA DE DATOS

Concentracion de colorante	30	%	/	/	/	/	/	
Cantidad de corriente	0,5	Amperios						
Turbiedad inicial	901	NTU						
Color inicial	4640	U						
pH inicial	8,36							
Voltaje	12	voltios						
Tiempo de tratamiento	60	min						
			Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
			Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)
			292	1930	276	1880	235	1870
			pH	9,03	pH	8,93	pH	8,83
			Notas:					
			Corrida 4		Corrida 5			
			Turbiedad (NTU)	Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)		
			280	1940	308	1850		
			pH	8,80	pH	8,33		

Concentracion de colorante	30	%	/	/	/	/	/	
Cantidad de corriente	1,0	Amperios						
Turbiedad inicial	901	NTU						
Color inicial	4640	U						
pH inicial	8,36							
Voltaje	12	voltios						
Tiempo de tratamiento	60	min						
			Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
			Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)
			28,3	261	23,6	225	18,3	202
			pH	9,15	pH	9,11	pH	9,04
			Notas:					
			Corrida 4		Corrida 5			
			Turbiedad (NTU)	Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)		
			25,8	216	24,9	247		
			pH	9,02	pH	9,12		

min: minutos.

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad.

U: unidades de color

en la escala Platino-Cobalto.

HOJA DE TOMA DE DATOS

Concentracion de color ante	40	%	/ / /	/ / /	/ / /
Cantidad de corriente	0,5	Amperios	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Turbiedad inicial	908	NTU	Turbiedad (NTU)	Turbiedad (NTU)	Turbiedad (NTU)
Color inicial	5050	U	Color (U. Pt. Co)	Color (U. Pt. Co)	Color (U. Pt. Co)
pH inicial	8,79		2360	336	305
Voltaje	12	voltios	pH	pH	pH
Tiempo de tratamiento	60	min	8,44	8,95	8,96
Notas:					
Corrida 4					
Corrida 5					
Turbiedad (NTU)			Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)
31,4			2260	315	2290
pH			8,99	pH	8,78

Concentracion de color ante	40	%	/ / /	/ / /	/ / /
Cantidad de corriente	1,0	Amperios	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Turbiedad inicial	908	NTU	Turbiedad (NTU)	Turbiedad (NTU)	Turbiedad (NTU)
Color inicial	5050	U	Color (U. Pt. Co)	Color (U. Pt. Co)	Color (U. Pt. Co)
pH inicial	8,79		324	27,6	21,6
Voltaje	12	voltios	9,72	pH	pH
Tiempo de tratamiento	60	min	9,76	9,76	9,85
Notas:					
Corrida 4					
Corrida 5					
Turbiedad (NTU)			Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)
28,8			339	29,7	354
pH			9,72	pH	9,67

min: minutos

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad.

U: unidades de color

en la escala Platino-Cobalto.

Concentración de color ante	50	%	/	/	/	/	/	/
Cantidad de corriente	0,5	Amperios						
Turbiedad inicial	890	NTU						
Color inicial	5380	U						
pH inicial	8,87							
Voltaje	12	voltios						
Tiempo de tratamiento	60	min						
			Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
			Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)
			391	2520	416	2540	423	2590
			pH	9,04	pH	9,11	pH	9,09
			Notas:					
			Corrida 4		Corrida 5			
			Turbiedad (NTU)	Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)		
			424	2510	414	2560		
			pH	8,97	pH	8,98		

Concentración de color ante	50	%	/	/	/	/	/	/
Cantidad de corriente	1,0	Amperios						
Turbiedad inicial	890	NTU						
Color inicial	5380	U						
pH inicial	8,87							
Voltaje	12	voltios						
Tiempo de tratamiento	60	min						
			Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
			Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt. Co)
			45,0	626	48,8	636	45,2	660
			pH	9,37	pH	9,40	pH	9,42
			Notas:					
			Corrida 4		Corrida 5			
			Turbiedad (NTU)	Color (U)	Turbiedad (NTU)	Color (U)		
			49,8	642	48,7	630		
			pH	9,34	pH	9,35		

min: minutos.

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad.

U: unidades de color en la escala Platino-Cobalto.

3.7. Tabulación y ordenamiento de la información

Tabla I. Concentración de colorantes

10%

Cantidad de corriente

	0.5 A.					
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	189	79	1530	63	8.50	11
Experimento 2	198	78	1500	63	8.63	13
Experimento 3	196	78	1570	62	8.50	11
Experimento 4	174	81	1490	64	8.35	9
Experimento 5	186	79	1540	62	8.42	10

	1.0 A.					
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	15.3	98	66	98	8.88	16
Experimento 2	14.3	98	79	98	8.92	17
Experimento 3	12.5	99	63	98	8.84	16
Experimento 4	13.2	99	81	98	8.92	17
Experimento 5	13.8	98	75	98	8.94	17

Nota:

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad

U: unidades de color en escala platino-cobalto.

A: cantidad de corriente en amperios.

Tabla II. Concentración de colorantes

20%

Cantidad de corriente

	0.5 A.					
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	201	77	1720	62	8.32	7
Experimento 2	198	78	1840	59	8.64	11
Experimento 3	214	76	1790	60	8.21	5
Experimento 4	208	77	1780	60	8.41	8
Experimento 5	203	77	1820	59	8.80	13

	1.0 A.					
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	19.3	98	157	96	9.13	17
Experimento 2	20.1	98	148	97	9.15	17
Experimento 3	21.3	98	152	97	9.10	17
Experimento 4	19.8	98	161	96	9.12	17
Experimento 5	20.5	98	154	97	9.14	17

Nota:

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad

U: unidades de color en escala platino-cobalto.

A: cantidad de corriente en amperios.

Tabla III. Concentración de colorantes

30%

Cantidad de corriente

	0.5 A.					
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	292	68	1930	58	9.03	8
Experimento 2	276	69	1880	59	8.93	7
Experimento 3	235	74	1870	60	8.83	6
Experimento 4	280	69	1940	58	8.80	5
Experimento 5	308	66	1850	60	8.89	6

	4.0 A.					
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	28.3	97	261	94	9.15	9
Experimento 2	23.6	97	225	95	9.11	9
Experimento 3	18.3	98	202	96	9.04	8
Experimento 4	25.8	97	216	95	9.02	8
Experimento 5	24.9	97	247	95	9.12	9

Nota:

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad

U: unidades de color en escala platino-cobalto.

A: cantidad de corriente en amperios.

Tabla IV. Concentración de colorantes

40%

Cantidad de corriente

0.5 A.						
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	332	63	2360	53	8.94	2
Experimento 2	336	63	2370	53	8.95	2
Experimento 3	305	66	2280	55	8.96	2
Experimento 4	314	65	2260	55	8.99	2
Experimento 5	315	65	2290	55	8.88	1

1.0 A.						
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	28.2	97	324	94	9.72	11
Experimento 2	27.6	97	316	94	9.76	11
Experimento 3	21.6	98	300	94	9.85	12
Experimento 4	28.8	97	339	93	9.72	11
Experimento 5	29.7	97	354	93	9.67	10

Nota:

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad

U: unidades de color en escala platino-cobalto.

A: cantidad de corriente en amperios.

Tabla V. Concentración de colorantes

50%

Cantidad de corriente

	0.5 A.					
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	391	56	2520	53	9.04	2
Experimento 2	416	53	2540	53	9.11	3
Experimento 3	423	52	2590	52	9.09	2
Experimento 4	424	52	2510	53	8.97	1
Experimento 5	414	53	2560	52	8.98	1

	1.0 A.					
	Turbiedad (NTU)	Remoción Turbiedad (%)	Color (U)	Remoción Color (%)	pH	Aumento pH (%)
Experimento 1	45.0	95	626	88	9.37	6
Experimento 2	48.8	95	636	88	9.40	6
Experimento 3	45.2	95	660	88	9.42	6
Experimento 4	49.8	94	642	88	9.34	5
Experimento 5	48.7	95	630	88	9.35	5

Nota:

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad

U: unidades de color en escala platino-cobalto.

A: cantidad de corriente en amperios.

Como complemento del análisis, se determinó un análisis microbiológico de coliformes fecales, utilizando el método del Número Más Probable a estas muestras, siendo estas las más contaminadas con colorante, obteniendo los siguientes resultados.

Agua no tratada

- 210,000 NMP

Agua tratada con 0.5 Amperios

- 60,000 NMP

Agua tratada con 1.0 Amperios

- 20,000 NMP

3.8. Análisis estadístico

3.8.1. Identificación de valores atípicos

En estadística, un valor atípico es aquel dato que numéricamente está alejado al resto de los datos. Estos datos tienen que ser eliminados del tratamiento estadístico, ya que pueden dar resultados engañosos. Para este tratamiento, se utiliza el programa Statgraphic Centurion XV que tiene la opción de identificación de valores atípicos utilizando diferentes procedimientos, entre estos esta la eliminación de valores por medio de gráficas de aberrantes y por medio de la prueba Q de Dixon.

Para la identificación de valores anómalos en este experimento, se hicieron 2 tratamientos (gráfica de aberrantes y Q de Dixon) a cada grupo de datos con características iguales de concentración de color y cantidad de corriente que se utilizó para su tratamiento.

3.8.1.1. Gráfica de aberrantes

Un buen lugar para comenzar cuando se considera la posibilidad de que una muestra de n observaciones contiene uno o más valores atípicos es el *Gráfico de Aberrantes*. Este gráfico muestra cada valor de los datos junto con líneas horizontales en la media muestral más y menos 1, 2, 3, y 4 desviaciones estándar. Puntos más allá de 3σ , se considera que son valores atípicos potenciales y dignos de investigación adicional.

3.8.1.2. Prueba de Dixon

Para muestras pequeñas con $4 \leq n \leq 30$, se realiza la *prueba de Dixon*. Esta prueba comienza ordenando los valores de los datos de menor a mayor. Las estadísticas se calculan entonces para probar 5 situaciones potenciales:

- 1 valor atípico a la derecha.
- 1 valor aberrante a la izquierda.
- 2 valores aberrantes a la derecha.
- 2 valores aberrantes a la izquierda.
- 1 valor aberrante en cualquiera de los dos lados.

El estadístico calculado r se compara entonces con valores críticos en tablas. Para cada prueba, STATGRAPHICS indica si el resultado es o no estadísticamente significativo a los niveles de 5% y 1% de confiabilidad. Un resultado significativo indica la presencia de la situación hipotética.

3.8.2. Análisis de valores atípicos a los datos obtenidos.

Muestra con 10% de concentración, tratada con 0.5 Amperios

Turbiedad

Figura 9

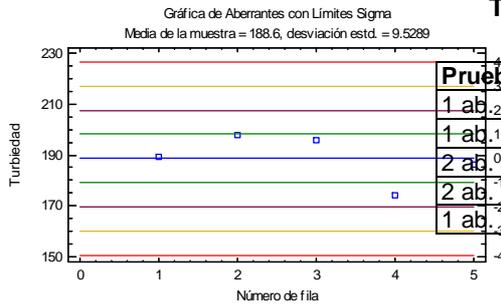


Tabla VI. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.166667	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.545455	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.75	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.681818	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.5	No sig.	No sig.

Color

Figura 10

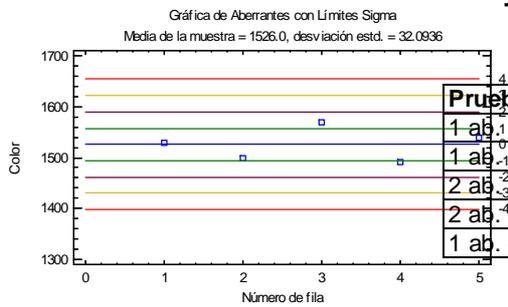


Tabla VII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.428571	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.2	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.571429	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.8	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.375	No sig.	No sig.

pH

Figura 11

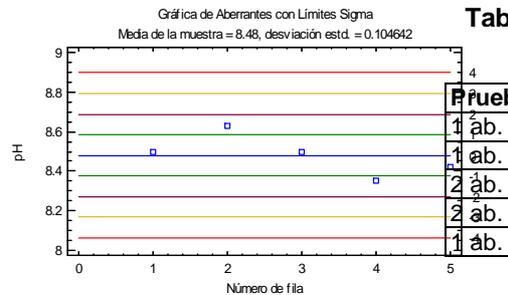


Tabla VIII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.619048	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.466667	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.619048	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	1.0	Significativo	Significativo
1 ab. en cada lado	0.464286	No sig.	No sig.

Muestra con 10% de concentración tratada con 1 Amperios

Turbiedad

Figura 12

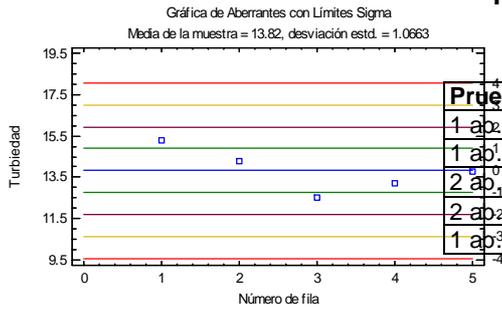


Tabla IX. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab ₂ por derecha	0.47619	No sig.	No sig.
1 ab ₁ por izquierda	0.388889	No sig.	No sig.
2 ab ₁ por derecha	0.714286	No sig.	No sig.
2 ab ₂ por izquierda	0.722222	No sig.	No sig.
1 ab ₃ en cada lado	0.357143	No sig.	No sig.

Color

Figura 13

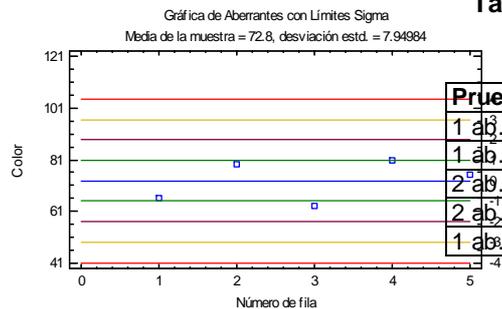


Tabla X. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab ₃ por derecha	0.133333	No sig.	No sig.
1 ab ₁ por izquierda	0.1875	No sig.	No sig.
2 ab ₃ por derecha	0.4	No sig.	No sig.
2 ab ₁ por izquierda	0.75	No sig.	No sig.
1 ab ₂ en cada lado	0.166667	No sig.	No sig.

pH

Figura 14

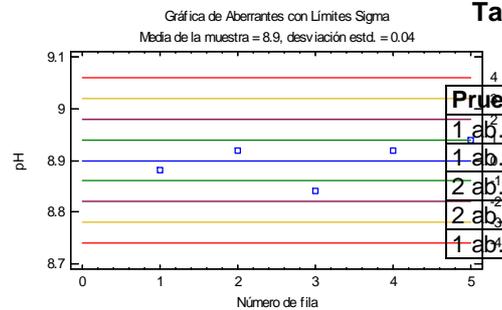


Tabla XI. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab ₂ por derecha	0.333333	No sig.	No sig.
1 ab ₁ por izquierda	0.5	No sig.	No sig.
2 ab ₁ por derecha	0.333333	No sig.	No sig.
2 ab ₂ por izquierda	1.0	Significativo	Significativo
1 ab ₃ en cada lado	0.4	No sig.	No sig.

Muestra con 20% de concentración tratada con 0.5 Amperios

Turbiedad

Figura 15

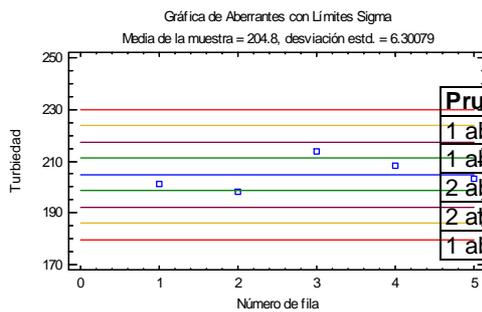


Tabla XII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ³ por derecha	0.461538	No sig.	No sig.
1 ab. ¹ por izquierda	0.3	No sig.	No sig.
2 ab. ¹ por derecha	0.846154	No sig.	No sig.
2 ab. ² por izquierda	0.5	No sig.	No sig.
1 ab. ⁴ en cada lado	0.375	No sig.	No sig.

Color

Figura 16

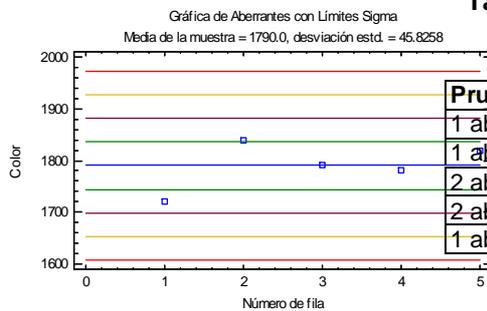


Tabla XIII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ² por derecha	0.333333	No sig.	No sig.
1 ab. ¹ por izquierda	0.6	No sig.	No sig.
2 ab. ¹ por derecha	0.833333	No sig.	No sig.
2 ab. ² por izquierda	0.7	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.5	No sig.	No sig.

pH

Figura 17

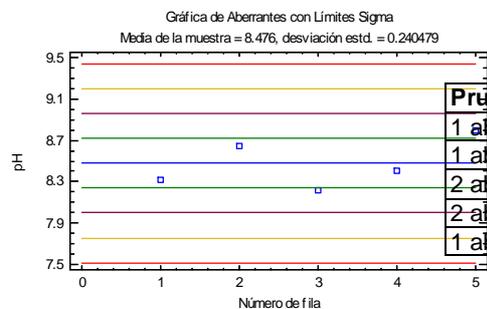


Tabla XIV. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ² por derecha	0.333333	No sig.	No sig.
1 ab. ¹ por izquierda	0.255814	No sig.	No sig.
2 ab. ¹ por derecha	0.8125	No sig.	No sig.
2 ab. ² por izquierda	0.465116	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.271186	No sig.	No sig.

Muestra con 20% de concentración tratada con 1 Amperios

Turbiedad

Figura 18

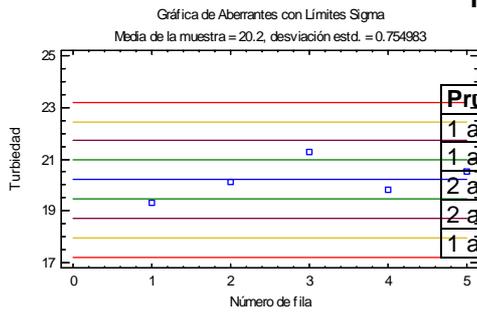


Tabla XV. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ³ por derecha	0.533333	No sig.	No sig.
1 ab. ³ por izquierda	0.416667	No sig.	No sig.
2 ab. ² por derecha	0.8	No sig.	No sig.
2 ab. ² por izquierda	0.666667	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.4	No sig.	No sig.

Color

Figura 19

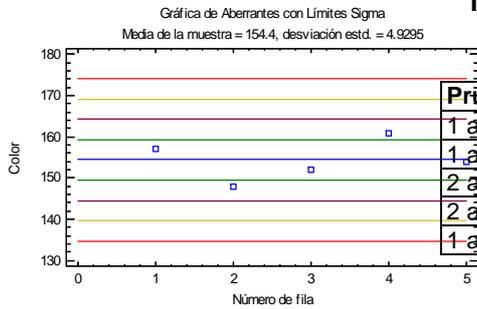


Tabla XVI Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ³ por derecha	0.444444	No sig.	No sig.
1 ab. ³ por izquierda	0.444444	No sig.	No sig.
2 ab. ² por derecha	0.777778	No sig.	No sig.
2 ab. ² por izquierda	0.666667	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.307692	No sig.	No sig.

pH

Figura 20

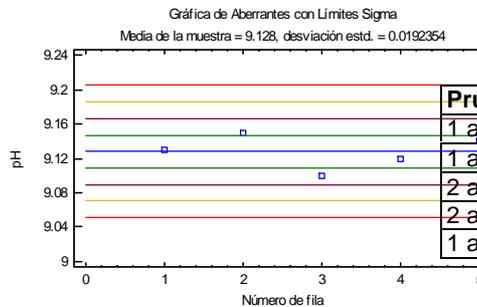


Tabla XVII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ³ por derecha	0.333333	No sig.	No sig.
1 ab. ³ por izquierda	0.5	No sig.	No sig.
2 ab. ² por derecha	0.666667	No sig.	No sig.
2 ab. ² por izquierda	0.75	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.4	No sig.	No sig.

Muestra con 30% de concentración tratada con 0.5 Amperios

Turbiedad

Figura 21

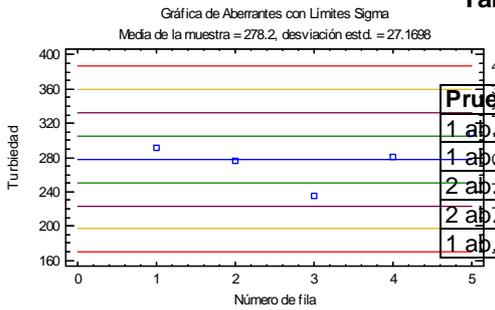


Tabla XVIII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab ₁ por derecha	0.5	No sig.	No sig.
1 ab ₀ por izquierda	0.719298	No sig.	No sig.
2 ab ₁ por derecha	0.875	No sig.	No sig.
2 ab ₂ por izquierda	0.789474	No sig.	No sig.
1 ab ₃ en cada lado	0.561644	No sig.	No sig.

Color

Figura 22

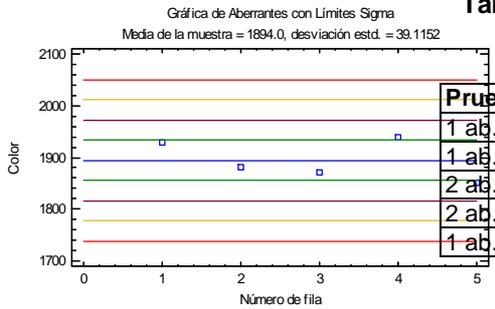


Tabla XIX. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab ₂ por derecha	0.142857	No sig.	No sig.
1 ab ₀ por izquierda	0.25	No sig.	No sig.
2 ab ₁ por derecha	0.857143	No sig.	No sig.
2 ab ₂ por izquierda	0.375	No sig.	No sig.
1 ab ₃ en cada lado	0.222222	No sig.	No sig.

pH

Figura 23

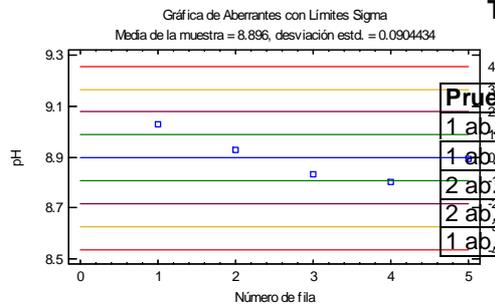


Tabla XX. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab ₁ por derecha	0.5	No sig.	No sig.
1 ab ₀ por izquierda	0.230769	No sig.	No sig.
2 ab ₁ por derecha	0.7	No sig.	No sig.
2 ab ₂ por izquierda	0.692308	No sig.	No sig.
1 ab ₃ en cada lado	0.434783	No sig.	No sig.

Muestra con 30% de concentración tratada con 1 Amperios

Turbiedad

Figura 24

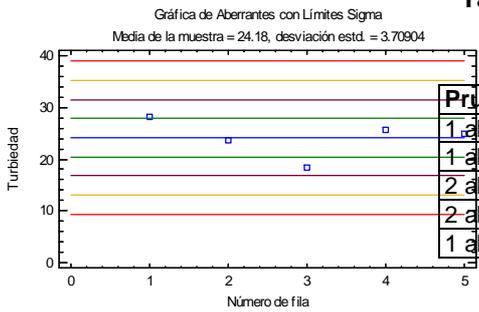


Tabla XXI. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.531915	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.706667	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.723404	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.88	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.53	No sig.	No sig.

Color

Figura 25

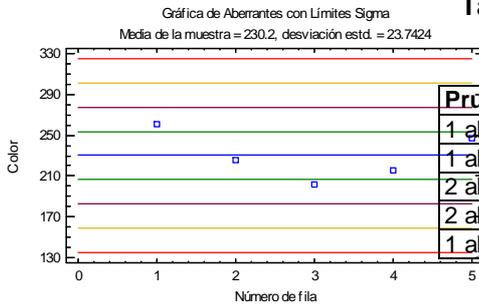


Tabla XXII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.311111	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.311111	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.8	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.511111	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.237288	No sig.	No sig.

pH

Figura 26

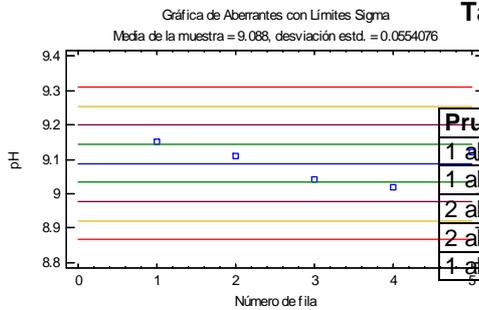


Tabla XXIII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.272727	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.2	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.363636	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.9	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.230769	No sig.	No sig.

Muestra con 40% de concentración tratada con 0.5 Amperios

Turbiedad

Figura 27

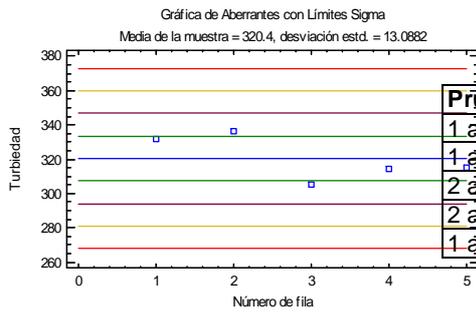


Tabla XXIV. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.181818	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.333333	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.954545	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.37037	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.290323	No sig.	No sig.

Color

Figura 28

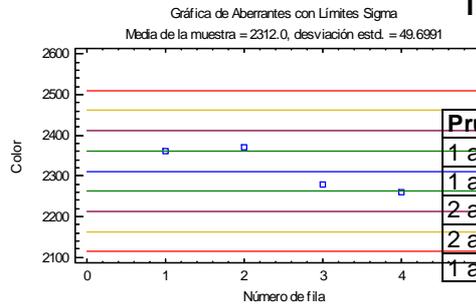


Tabla XXV. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.111111	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.2	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.888889	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.3	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.181818	No sig.	No sig.

pH

Figura 29

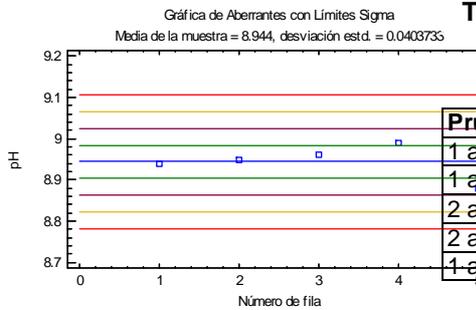


Tabla XXVI. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.6	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.75	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.8	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.875	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.545455	No sig.	No sig.

Muestra con 40% de concentración tratada con 1 Amperios

Turbiedad

Figura 30

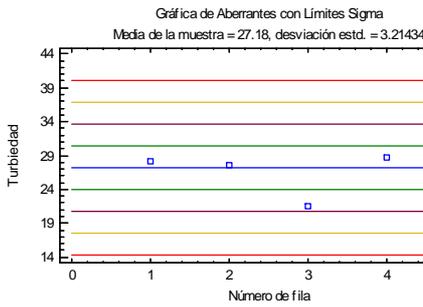


Tabla XXVII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ² por derecha	0.428571	No sig.	No sig.
1 ab. ¹ por izquierda	0.833333	Significativo	No sig.
2 ab. ¹ por derecha	0.714286	No sig.	No sig.
2 ab. ² por izquierda	0.916667	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.740741	Significativo	No sig.

Color

Figura 31

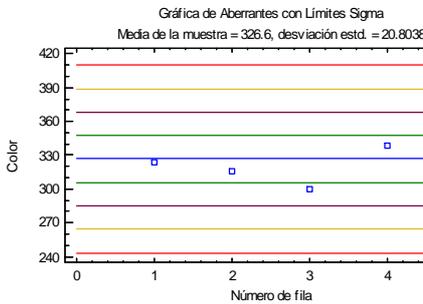


Tabla XXVIII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ² por derecha	0.394737	No sig.	No sig.
1 ab. ¹ por izquierda	0.410256	No sig.	No sig.
2 ab. ¹ por derecha	0.789474	No sig.	No sig.
2 ab. ² por izquierda	0.615385	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.296296	No sig.	No sig.

pH

Figura 32

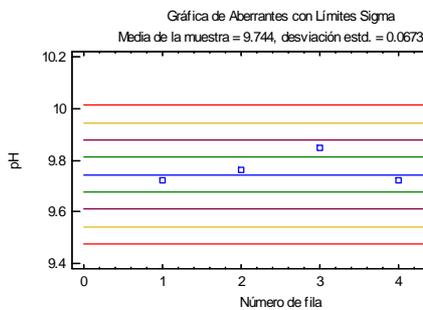


Tabla XXIX. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ² por derecha	0.692308	No sig.	No sig.
1 ab. ¹ por izquierda	0.555556	No sig.	No sig.
2 ab. ¹ por derecha	1.0	Significativo	Significativo
2 ab. ² por izquierda	0.555556	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.5	No sig.	No sig.

Muestra con 50% de concentración tratada con 0.5 Amperios

Turbiedad

Figura 33

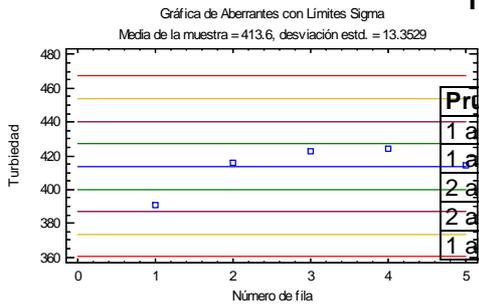


Tabla XXX. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ² por derecha	0.1	No sig.	No sig.
1 ab. ¹ por izquierda	0.71875	No sig.	No sig.
2 ab. ² por derecha	0.8	No sig.	No sig.
2 ab. ¹ por izquierda	0.78125	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.69697	No sig.	No sig.

Color

Figura 34

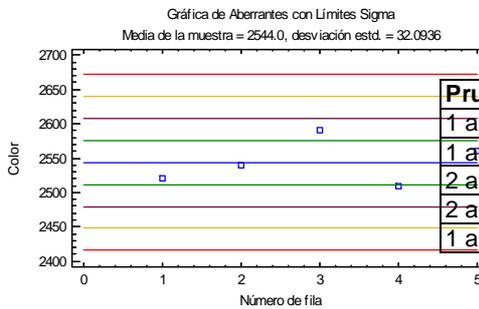


Tabla No. XXXI

Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ² por derecha	0.428571	No sig.	No sig.
1 ab. ¹ por izquierda	0.2	No sig.	No sig.
2 ab. ² por derecha	0.714286	No sig.	No sig.
2 ab. ¹ por izquierda	0.6	No sig.	No sig.
1 ab. ³ en cada lado	0.375	No sig.	No sig.

pH

Figura 35

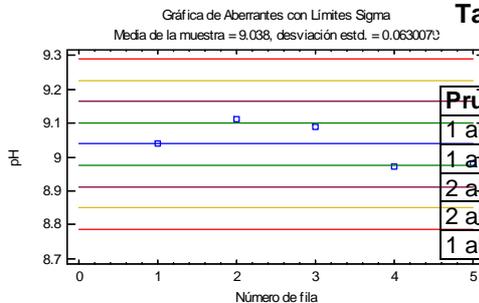


Tabla XXXII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. ¹ por derecha	0.153846	No sig.	No sig.
1 ab. ⁰ por izquierda	0.0833333	No sig.	No sig.
2 ab. ² por derecha	0.538462	No sig.	No sig.
2 ab. ³ por izquierda	0.583333	No sig.	No sig.
1 ab. ⁴ en cada lado	0.142857	No sig.	No sig.

Muestra con 50% de concentración tratada con 1 Amperios

Turbiedad

Figura 36

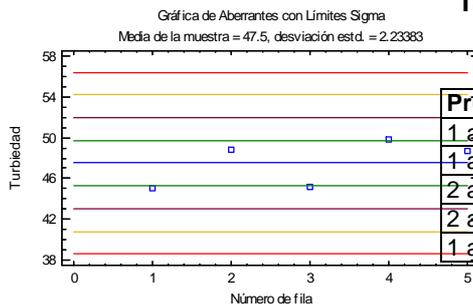


Tabla XXXIII. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.217391	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.0526316	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.23913	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.973684	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.208333	No sig.	No sig.

Color

Figura 37

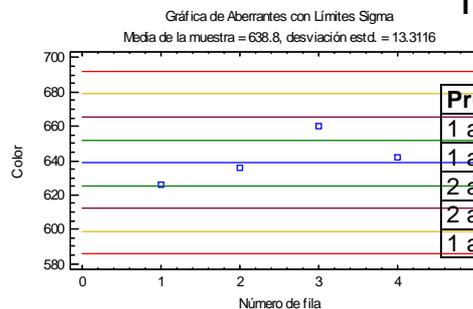


Tabla XXXIV. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.6	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.25	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.8	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.625	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.529412	No sig.	No sig.

pH

Figura 38

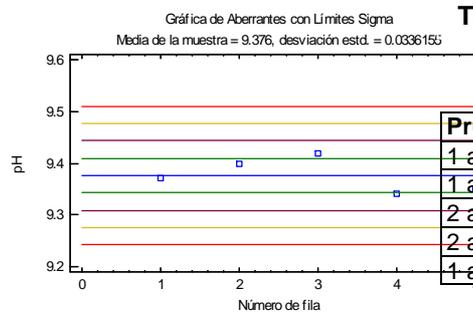


Tabla XXXV. Prueba Q de Dixon para los datos obtenidos

Prueba de Dixon	Estadístico	Prueba al 5%	Prueba al 1%
1 ab. por derecha	0.285714	No sig.	No sig.
1 ab. por izquierda	0.166667	No sig.	No sig.
2 ab. por derecha	0.714286	No sig.	No sig.
2 ab. por izquierda	0.5	No sig.	No sig.
1 ab. en cada lado	0.25	No sig.	No sig.

3.8.3. Análisis de varianza (ANOVA)

El procedimiento ANOVA Multifactorial está diseñado para construir un modelo estadístico que describe el impacto de dos o más factores categóricos X_j en una variable dependiente Y . Se corren pruebas para determinar si hay diferencias significativas entre las medias de Y a diferentes niveles de los factores y para determinar si hay interacciones entre los factores.

3.8.3.1. Tabla ANOVA

Para determinar si los factores tienen o no un efecto significativo en la variable dependiente, se realiza un análisis de varianza. Los resultados son desplegados en la Tabla ANOVA:

La tabla divide la variabilidad total entre las n mediciones en varios componentes:

- Un componente atribuible al **Efecto Principal** de cada factor, que mide la variabilidad entre las respuestas medias a cada nivel del factor.
- Un componente atribuible a la **Interacción** entre diferentes factores. Ocurre una interacción si el efecto de un factor depende del nivel de otro factor.

- Si hay **Covariación** presenta un componente atribuible a cada covariación.
- Un componente **Residual**, que mide la variabilidad entre sujetos a niveles idénticos de los factores.

Los F-radios son de particular importancia así como sus P-Valores asociados. P-Valores pequeños (menores que 0.05 si se opera a un nivel de significancia del 5%) corresponden a efectos significativos.

La tabla ANOVA, para exponer sus resultados, se basa en:

Suma de Cuadrados: el tipo de descomposición usada para calcular las sumas de cuadrados en la tabla ANOVA. La selección por defecto es Tipo III, que cuantifica el incremento del error en la suma de cuadrados que ocurriría si cada efecto se removiese del análisis, dado que todos los otros efectos permanecen. En contraste, la suma de cuadrados Tipo I representa la reducción en el error de suma de cuadrados que ocurre cuando cada variable es añadida al modelo, en el orden mostrado en la tabla ANOVA. En un experimento balanceado (un experimento con igual número de observaciones de todas las combinaciones de factores) tal como en este ejemplo, ambos tipos de sumas de cuadrados arrojan resultados idénticos. En casos no balanceados, habrá diferencia. Tipo III es por defecto pues cuantifica la contribución marginal de cada efecto dado que todos los demás efectos han sido computados.

Término de Error: la media cuadrática a usarse como denominador de la F-prueba al probar la importancia de cada efecto. En un diseño en el que todos los factores se cruzan y no son aleatorios, la selección de Residual es correcta. Para tipos de diseños más complicados, el analista tal vez deseé especificar otro denominador para ciertos efectos. Nota: el procedimiento Modelos Lineales Generales determina automáticamente del denominador propio de muchos tipos de modelos involucrando factores aleatorios y anidados y normalmente deben usarse para analizar esos tipos de diseños experimentales.

3.8.3.2. Tabla de medias

Esta tabla despliega las medias de mínimos cuadrados para cada nivel de los factores y para pares de niveles de cualquier interacción bifactorial incluida. Cada media se muestra junto a su error estimado estándar y un intervalo de confianza

3.8.3.3. Pruebas de rangos múltiples

Para factores que muestran P-Valores significativos en la tabla ANOVA y que no interactúan con otros factores, se puede realizar un análisis posterior seleccionando las Pruebas de Rangos Múltiples.

La mitad de arriba de la tabla despliega cada uno de los estimadores medios de mínimos cuadrados en orden creciente de magnitud. Muestra:

- **Conteo**, el número de observaciones al nivel especificado del factor.
- **LS Media**, la media estimada por mínimos cuadrados. En el caso de un diseño balanceado, la media de mínimos cuadrados es equivalente al promedio de todas las observaciones al nivel indicado. En diseños no balanceados, la media de mínimos cuadrados es el valor predicho de la variable dependiente cuando el factor especificado se fija a un nivel particular mientras los demás factores se fijan a sus niveles medios. Las medias de mínimos cuadrados ajusta cualquier desbalanceo en los datos, haciendo predicciones a un nivel común para todos los factores.
- **LS Sigma**, el error estándar estimado de la media de mínimos cuadrados.
- **Grupos homogéneos**, una ilustración gráfica de cuáles medias son significativamente diferentes de cuáles, basada en los contrastes desplegados en la segunda mitad de la tabla. Cada columna de X's indica un grupo de medias entre las que no hay diferencias estadísticamente significativas.

La segunda mitad de la tabla despliega una comparación entre cada par de medias de nivel.

- **Diferencia** la diferencia entre las dos medias de mínimos cuadrados.
- **Límites** un estimador de intervalo de esa diferencia, usando el procedimiento seleccionado de múltiples comparaciones.
- **Sig.** Se pone un asterisco junto a cualquier diferencia que sea estadísticamente significativamente diferente de 0 al nivel de significancia seleccionado, i.e., cualquier intervalo que no contenga al 0.

3.8.3.4. Gráfica ANOVA

La Gráfica ANOVA, desarrollada por Hunter (2005), es una técnica para desplegar gráficamente la importancia de cada factor en el análisis. Es una gráfica de efectos escalados de cada factor, donde el “efecto” de un factor es igual a la diferencia entre la media de mínimos cuadrados para el nivel del factor y la media total estimada. Cada uno de los efectos es multiplicado por un factor escalador.

$$\sqrt{\frac{v_R n_i}{v_E n}}$$

donde v_R es los grados de libertad residuales, v_E es los grados de libertad del efecto principal del factor, n_i es igual al número de observaciones en el i-ésimo nivel del factor, y n es el número promedio de observaciones a todos los niveles

del factor. Esto escala los efectos de tal forma que la varianza natural de los puntos en el diagrama es comparable a la de los residuales, los cuales son desplegados debajo de la gráfica.

Comparando la variabilidad entre los efectos del tratamiento en la gráfica anova y los residuales, es fácil ver que todos los factores muestran diferencias de una magnitud mayor que la que podría atribuirse solamente a error experimental. Dependiendo de la localización relativa de los efectos, podría ser posible en algunos casos identificar visualmente qué niveles son diferentes significativamente de qué otros, lo cual se hace formalmente con las Pruebas de Rangos Múltiples descrita a continuación.

3.8.3.5. Gráficas de Residuales

Como en todo modelo estadístico, es una buena costumbre examinar los residuales. Los residuales son iguales a los datos observados menos los valores predichos por el modelo estadístico subyacente. Residuales contra Nivel de Factor, esta gráfica es de ayuda para visualizar cualquier diferencia en la variabilidad de varios niveles de un factor.

3.8.4. ANOVA de turbiedad

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para Turbiedad. Realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Turbiedad. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, si es que hay suficientes datos. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples dirán cuales medias son significativamente diferentes de otras.

Tabla XXXVI. Análisis de Varianza para Turbiedad - Suma de Cuadrados

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentracion	107684.	4	26920.9	215.52	0.0000
B:Amperaje	809908.	1	809908.	6484.01	0.0000
INTERACCIONES					
AB	62988.3	4	15747.1	126.07	0.0000
RESIDUOS	4996.34	40	124.909		
TOTAL (CORREGIDO)	985576.	49			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Turbiedad en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 3 valores-P son menores que 0.05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Turbiedad con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla XXXVII. Tabla de Medias por Mínimos Cuadrados para Turbiedad con intervalos de confianza del 95.0%

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est.</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
MEDIA GLOBAL	50	153.848			
Concentración					
10	10	101.21	3.53424	94.067	108.353
20	10	112.5	3.53424	105.357	119.643
30	10	151.19	3.53424	144.047	158.333
40	10	173.79	3.53424	166.647	180.933
50	10	230.55	3.53424	223.407	237.693
Amperaje					
0.5	25	281.12	2.23525	276.602	285.638
1	25	26.576	2.23525	22.0584	31.0936
Concentración por Amperaje					
10,0.5	5	188.6	4.99817	178.498	198.702
10,1	5	13.82	4.99817	3.7183	23.9217
20,0.5	5	204.8	4.99817	194.698	214.902
20,1	5	20.2	4.99817	10.0983	30.3017
30,0.5	5	278.2	4.99817	268.098	288.302
30,1	5	24.18	4.99817	14.0783	34.2817
40,0.5	5	320.4	4.99817	310.298	330.502
40,1	5	27.18	4.99817	17.0783	37.2817
50,0.5	5	413.6	4.99817	403.498	423.702
50,1	5	47.5	4.99817	37.3983	57.6017

Esta tabla muestra la media de Turbiedad para cada uno de los niveles de los factores. También muestra los errores estándar de cada media, los cuales son una medida de la variabilidad en su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95.0% para cada una de las medias.

Tabla XXXVIII. Pruebas de Múltiple Rangos para Turbiedad

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Concentración</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
10	10	101.21	3.53424	X
20	10	112.5	3.53424	X
30	10	151.19	3.53424	X
40	10	173.79	3.53424	X
50	10	230.55	3.53424	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	-11.29	10.1017
10 - 30	*	-49.98	10.1017
10 - 40	*	-72.58	10.1017
10 - 50	*	-129.34	10.1017
20 - 30	*	-38.69	10.1017
20 - 40	*	-61.29	10.1017
20 - 50	*	-118.05	10.1017
30 - 40	*	-22.6	10.1017
30 - 50	*	-79.36	10.1017
40 - 50	*	-56.76	10.1017

* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 10 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 5 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Figura 39

ANOVA Gráfico para Turbiedad

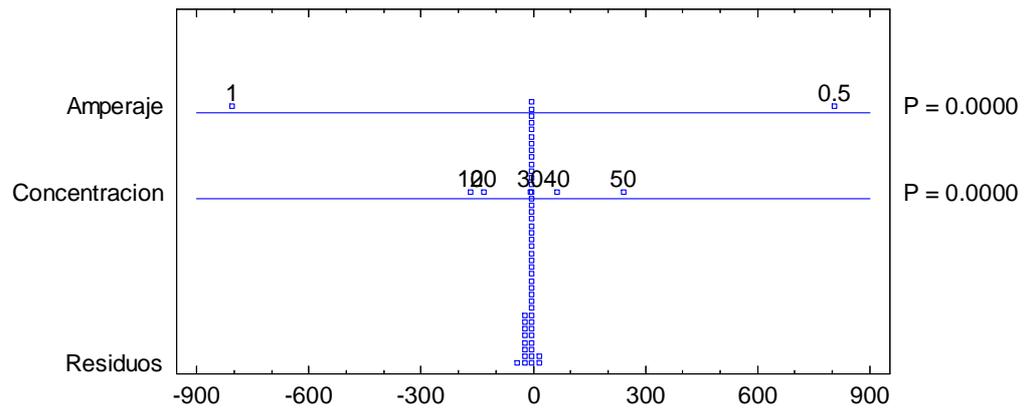


Figura 40

Gráfico de Residuos para Turbiedad

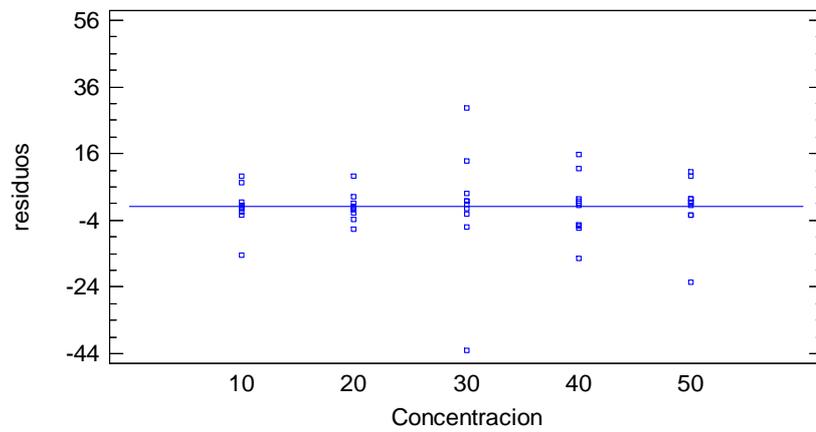
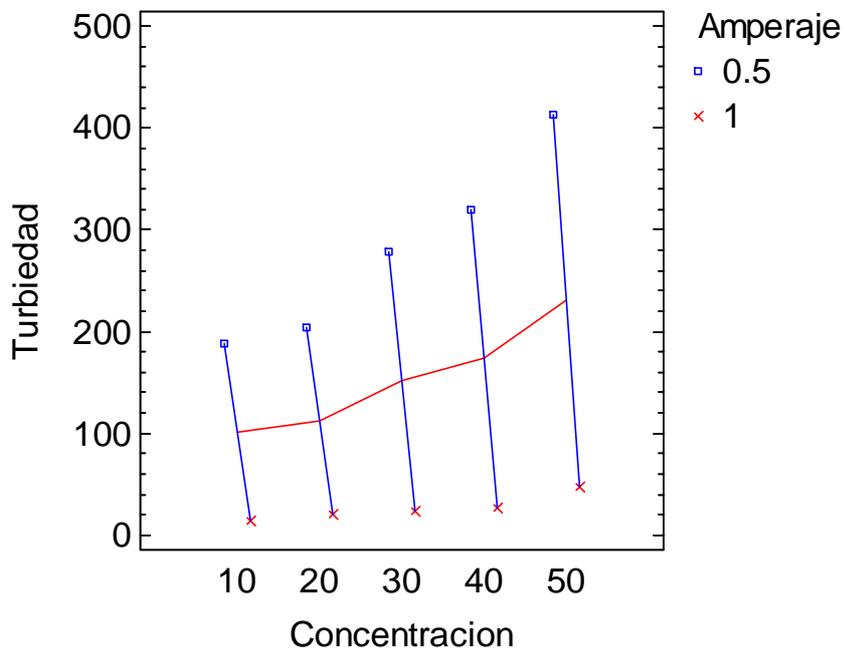


Figura 41

Gráfica Multi-Vari para Turbiedad



Esta gráfica muestra el promedio de Turbiedad en diferentes combinaciones de los 2 factores. Puede usarse para ayudar a visualizar la contribución de cada factor a la variabilidad total.

3.8.5. ANOVA de color

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para Color. Realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Color. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, si es que hay suficientes datos. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples dirán cuales medias son significativamente diferentes de otras.

Tabla XXXIX. Análisis de Varianza para Color - Suma de Cuadrados

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentracion	3.8575E6	4	964374.	1023.62	0.0000
B:Amperaje	3.73525E7	1	3.73525E7	39647.24	0.0000
INTERACCIONES					
AB	464567.	4	116142.	123.28	0.0000
RESIDUOS	37684.8	40	942.12		
TOTAL (CORREGIDO)	4.17122E7	49			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Color en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 3 valores-P son menores que 0.05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Color con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla XL. Tabla de Medias por Mínimos Cuadrados para Color con intervalos de confianza del 95.0%

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est.</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
MEDIA GLOBAL	50	1148.88			
Concentración					
10	10	799.4	9.70629	779.783	819.017
20	10	972.2	9.70629	952.583	991.817
30	10	1062.1	9.70629	1042.48	1081.72
40	10	1319.3	9.70629	1299.68	1338.92
50	10	1591.4	9.70629	1571.78	1611.02
Amperaje					
0.5	25	2013.2	6.13879	2000.79	2025.61
1	25	284.56	6.13879	272.153	296.967
Concentración por Amperaje					
10,0.5	5	1526.0	13.7268	1498.26	1553.74
10,1	5	72.8	13.7268	45.0571	100.543
20,0.5	5	1790.0	13.7268	1762.26	1817.74
20,1	5	154.4	13.7268	126.657	182.143
30,0.5	5	1894.0	13.7268	1866.26	1921.74
30,1	5	230.2	13.7268	202.457	257.943
40,0.5	5	2312.0	13.7268	2284.26	2339.74
40,1	5	326.6	13.7268	298.857	354.343
50,0.5	5	2544.0	13.7268	2516.26	2571.74
50,1	5	638.8	13.7268	611.057	666.543

Esta tabla muestra la media de Color para cada uno de los niveles de los factores. También muestra los errores estándar de cada media, los cuales son una medida de la variabilidad en su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95.0% para cada una de las medias.

Tabla XLI. Pruebas de Múltiple Rangos para Color

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Concentración</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
10	10	799.4	9.70629	X
20	10	972.2	9.70629	X
30	10	1062.1	9.70629	X
40	10	1319.3	9.70629	X
50	10	1591.4	9.70629	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	-172.8	27.7429
10 - 30	*	-262.7	27.7429
10 - 40	*	-519.9	27.7429
10 - 50	*	-792.0	27.7429
20 - 30	*	-89.9	27.7429
20 - 40	*	-347.1	27.7429
20 - 50	*	-619.2	27.7429
30 - 40	*	-257.2	27.7429
30 - 50	*	-529.3	27.7429
40 - 50	*	-272.1	27.7429

* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 10 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 5 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Figura 42

ANOVA Gráfico para Color

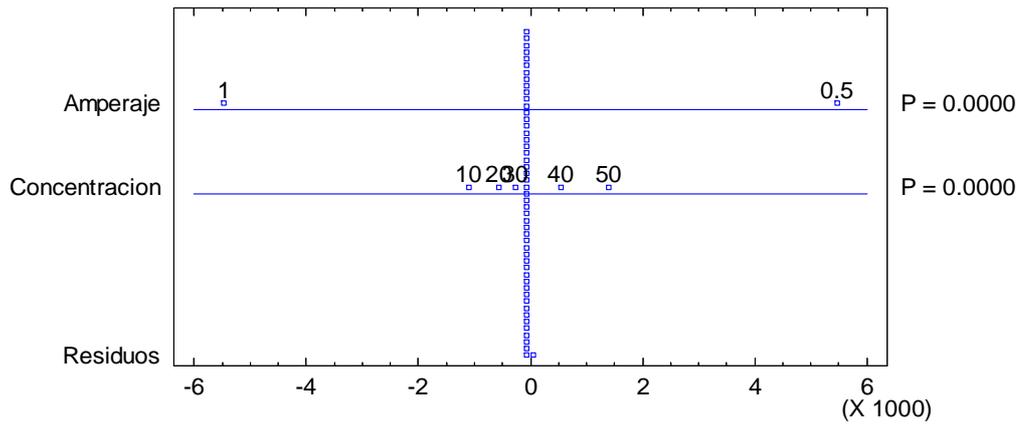


Figura 43

Gráfico de Residuos para Color

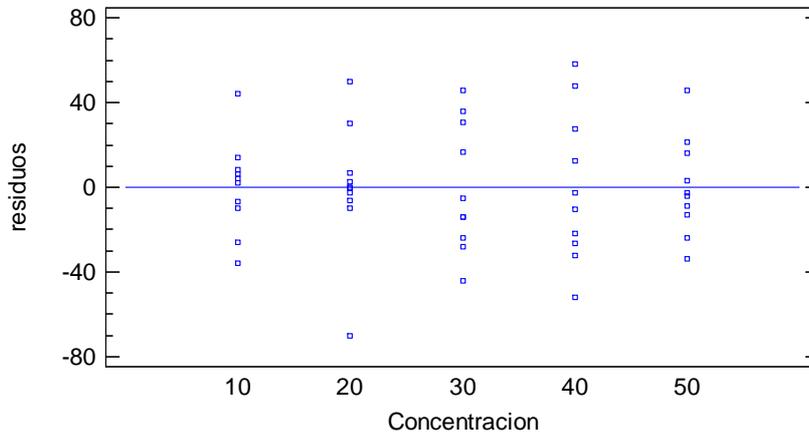
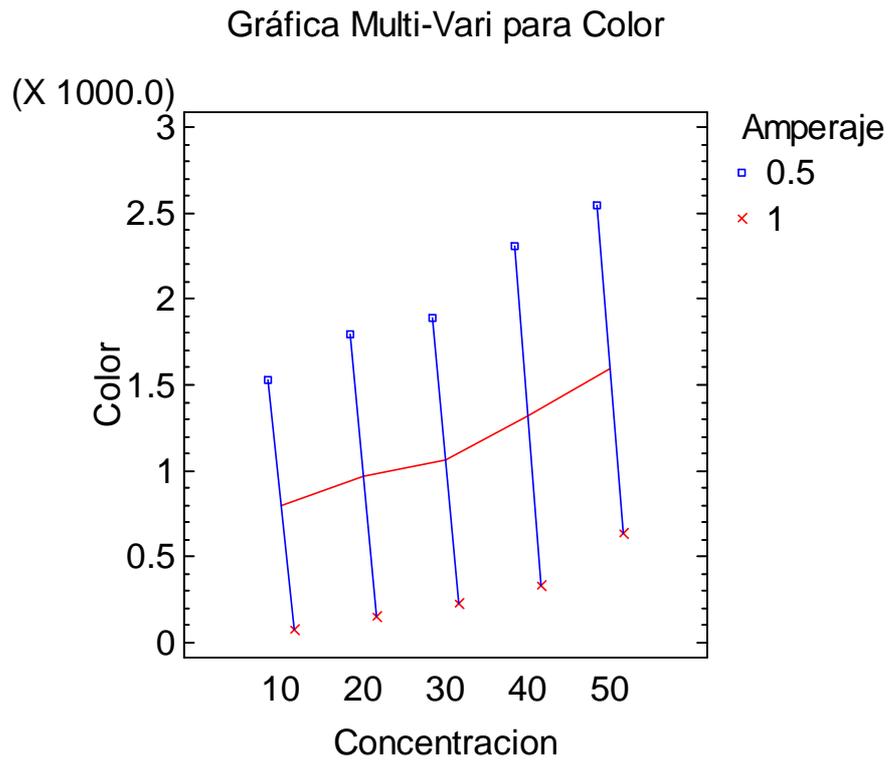


Figura 44



Esta gráfica muestra el promedio de Color en diferentes combinaciones de los 2 factores. Puede usarse para ayudar a visualizar la contribución de cada factor a la variabilidad total.

3.8.6. ANOVA de pH

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para pH. Realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre pH. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, si es que hay suficientes datos. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples dirán cuales medias son significativamente diferentes de otras.

Tabla XLII. Análisis de Varianza para pH - Suma de Cuadrados

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentracion	2.94075	4	0.735187	99.07	0.0000
B:Amperaje	3.54845	1	3.54845	478.16	0.0000
INTERACCIONES					
AB	0.134652	4	0.033663	4.54	0.0041
RESIDUOS	0.29684	40	0.007421		
TOTAL (CORREGIDO)	6.92069	49			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de pH en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 3 valores-P son menores que 0.05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre pH con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla XLIII. Tabla de Medias por Mínimos Cuadrados para pH con intervalos de confianza del 95.0%

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est.</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
MEDIA GLOBAL	50	9.0168			
Concentración					
10	10	8.69	0.0272415	8.63494	8.74506
20	10	8.856	0.0272415	8.80094	8.91106
30	10	8.987	0.0272415	8.93194	9.04206
40	10	9.16	0.0272415	9.10494	9.21506
50	10	9.391	0.0272415	9.33594	9.44606
Amperaje					
0.5	25	8.7504	0.017229	8.71558	8.78522
1	25	9.2832	0.017229	9.24838	9.31802
Concentración por Amperaje					
10,0.5	5	8.48	0.0385253	8.40214	8.55786
10,1	5	8.9	0.0385253	8.82214	8.97786
20,0.5	5	8.584	0.0385253	8.50614	8.66186
20,1	5	9.128	0.0385253	9.05014	9.20586
30,0.5	5	8.706	0.0385253	8.62814	8.78386
30,1	5	9.268	0.0385253	9.19014	9.34586
40,0.5	5	8.944	0.0385253	8.86614	9.02186
40,1	5	9.376	0.0385253	9.29814	9.45386
50,0.5	5	9.038	0.0385253	8.96014	9.11586
50,1	5	9.744	0.0385253	9.66614	9.82186

Esta tabla muestra la media de pH para cada uno de los niveles de los factores. También muestra los errores estándar de cada media, los cuales son una medida de la variabilidad en su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95.0% para cada una de las medias.

Tabla XLIV. Pruebas de Múltiple Rangos para pH

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Concentración</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
10	10	8.69	0.0272415	X
20	10	8.856	0.0272415	X
30	10	8.987	0.0272415	X
40	10	9.16	0.0272415	X
50	10	9.391	0.0272415	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	-0.166	0.0778627
10 - 30	*	-0.297	0.0778627
10 - 40	*	-0.47	0.0778627
10 - 50	*	-0.701	0.0778627
20 - 30	*	-0.131	0.0778627
20 - 40	*	-0.304	0.0778627
20 - 50	*	-0.535	0.0778627
30 - 40	*	-0.173	0.0778627
30 - 50	*	-0.404	0.0778627
40 - 50	*	-0.231	0.0778627

* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 10 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 5 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Figura 45

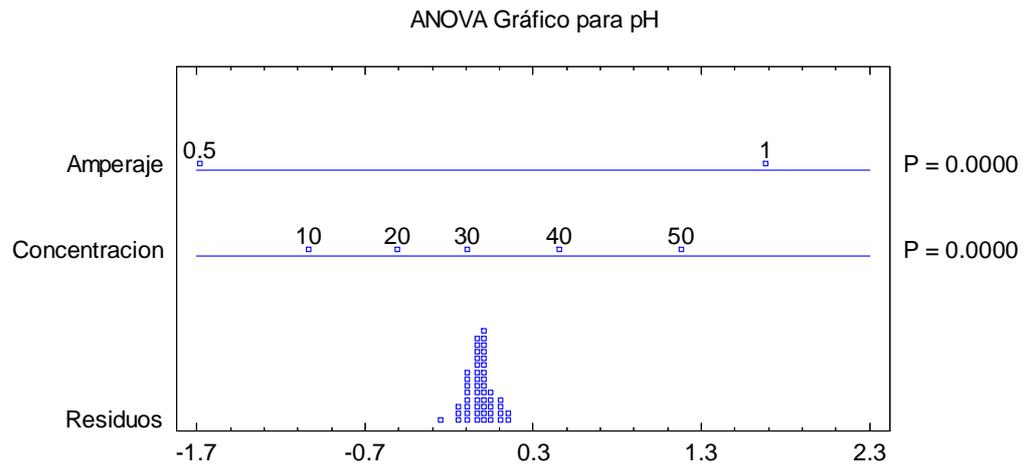


Figura 46

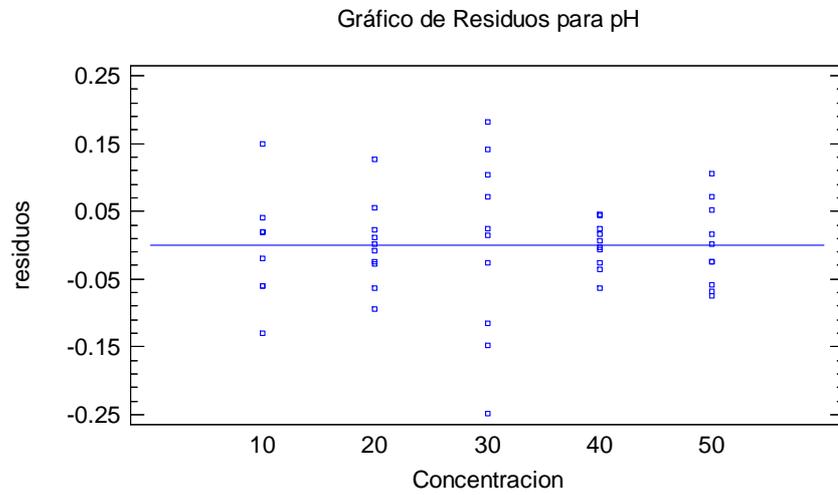
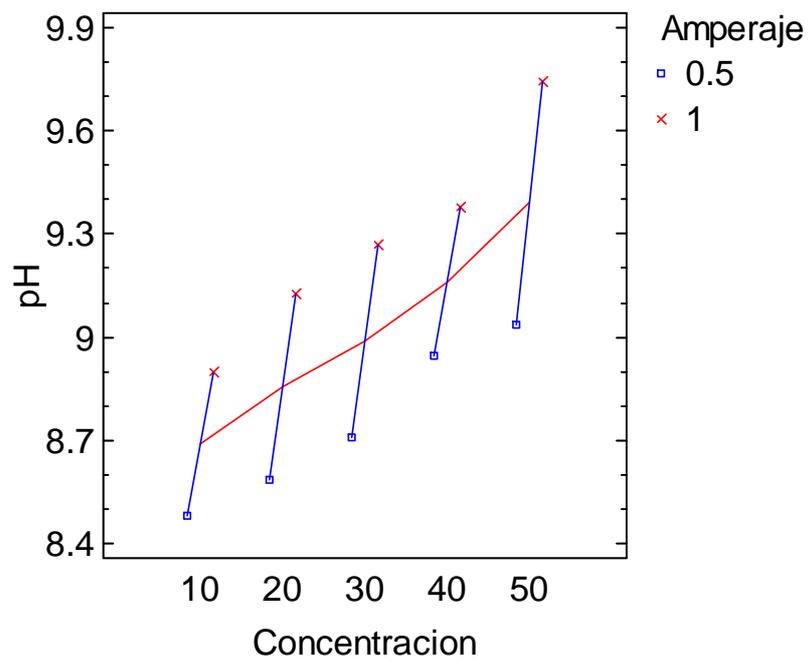


Figura 47

Gráfica Multi-Vari para pH



Esta gráfica muestra el promedio de pH en diferentes combinaciones de los 2 factores. Puede usarse para ayudar a visualizar la contribución de cada factor a la variabilidad total.

4. RESULTADOS

1. Diseño de celda de electrocoagulación.

Figura 1. Vista frontal de la celda de electrocoagulación.

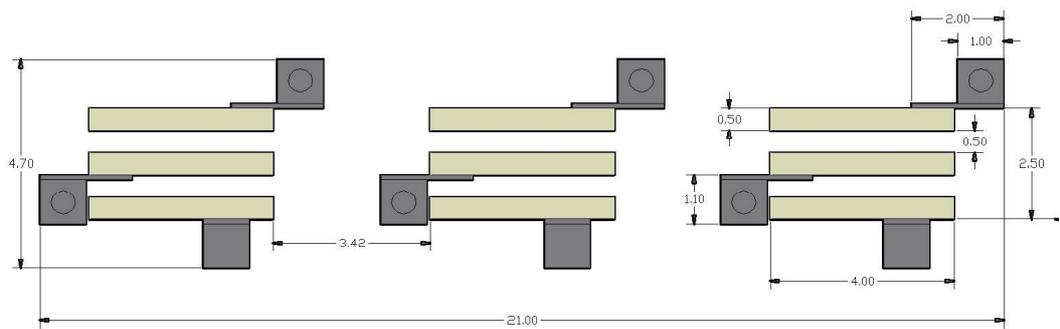


Figura 2. Vista superior de la celda de electrocoagulación.

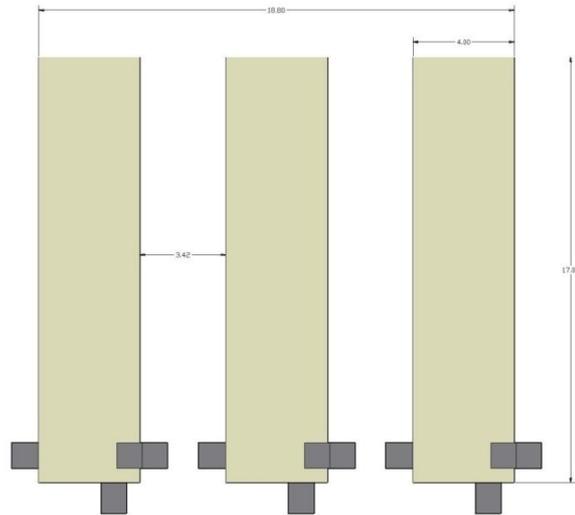


Figura 3. Vista isométrica de la celda de electrocoagulación

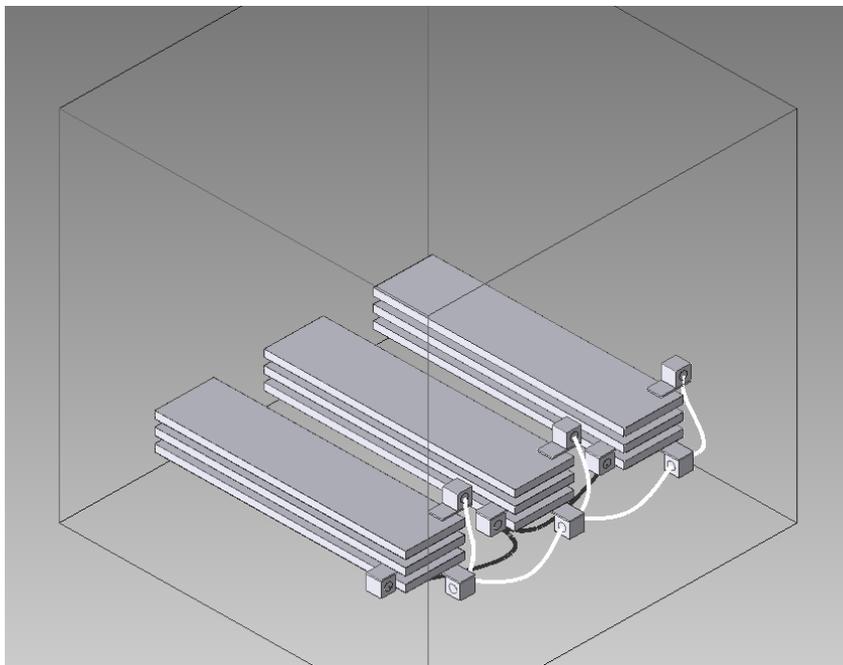
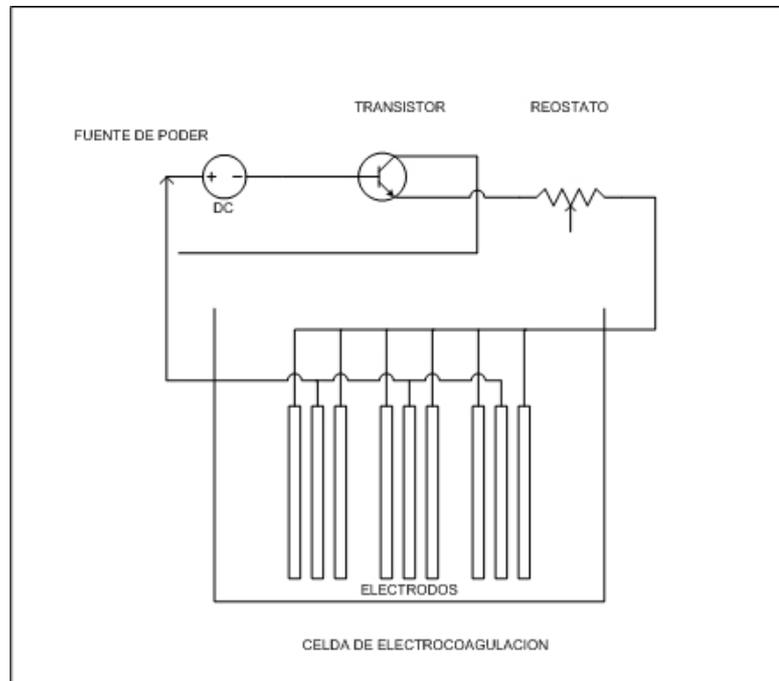


Figura 4. Circuito utilizado en la celda de electrocoagulación



2. Valores óptimos de operación para celda de electrocoagulación.

Se determinó que para los valores de amperaje que se utilizaron en esta investigación, el valor con el que mejores resultados se obtuvieron fue de 1.0 amperios durante media hora de tratamiento. Obteniendo valores de remoción de más de 95% de turbiedad y de color.

3. Porcentajes de remoción de color y turbiedad.

Tabla XLV. Porcentajes de remoción de color y turbiedad

Concentración de colorantes

10%

0.5 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
899	189	79	4100	1526	63	7.63	8.48	11
1.0 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
899	14	98	4100	73	98	7.63	8.90	17

Tabla XLVI. Porcentajes de remoción de color y turbiedad

Concentración de colorantes

20%

0.5 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
889	205	77	4470	1790	60	7.80	8.48	9
1.0 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
889	20	98	4470	154	97	7.80	9.13	17

Tabla XLVII. Porcentajes de remoción de color y turbiedad

Concentración de colorantes

30%

0.5 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
901	278	69	4640	1894	59	8.36	8.90	6
1.0 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
901	24	97	4640	230	95	8.36	9.09	9

Tabla XLVIII. Porcentajes de remoción de color y turbiedad

Concentración de colorantes

40%

0.5 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
908	320	65	5050	2312	54	8.79	8.94	2
1.0 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
908	27	97	5050	327	94	8.79	9.74	11

Tabla XLIX. Porcentajes de remoción de color y turbiedad

Concentración de colorantes

50%

0.5 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
890	414	54	5380	2544	53	8.87	9.04	2
1.0 Amperios								
Turbiedad (NTU)		Remoción Turbiedad (%)	Color (U)		Remoción Color (%)	pH		Aumento pH (%)
Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
890	48	95	5380	639	88	8.87	9.38	5

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para encontrar la manera de poder solucionar el problema causado por la coloración de origen textil presente en el cauce del río Xayá, se diseñó una celda de electrocoagulación y para encontrar el mejor diseño se hicieron varias pruebas anteriores al que se utiliza en la presente investigación.

La celda de electrocoagulación cuenta con 3 electrodos y cada uno de estos se compone de 3 placas de aluminio posicionadas de forma horizontal una sobre otra y separadas entre sí a 0.5 cm., las 2 placas exteriores conectadas al polo positivo y la placa intermedia al polo negativo de la fuente de poder. Con esta configuración se trata de aumentar el área de transferencia de electrones entre los electrodos, esto debido a que a una distancia menor de separación de las placas, se intensifica el campo electromagnético y provoca un aumento en la producción de burbujas de arrastre. Se utilizó aluminio para la fabricación de las placas con tamaño de 17 cm por 4 cm, que funcionan como electrodos, ya que el aluminio es un elemento altamente conductor.

La fuente de poder utilizada es de corriente continua de 13 voltios y 5 amperios, para poder regular la cantidad de corriente a introducir en el sistema, se utilizó un transistor TIP 41A, este componente funciona como “llave de paso”

que introduce al sistema solamente la cantidad de corriente necesaria para la electrocoagulación y lo no necesario lo devuelve a la fuente de poder. Conectado en serie al transistor se utilizaron 2 reóstatos o resistencias variables de 100 K Ω y de 20 K Ω , para poder tener variaciones de corriente con valores más pequeños de amperaje que se introdujo a los electrodos de aluminio. El amperaje pudo ser regulado en un rango de 0 a 1.2 amperios, cantidad suficiente para poder llevar a cabo la electrocoagulación con resultados exitosos.

De los resultados obtenidos en la práctica, se determinó el valor óptimo para la utilización de la celda de electrocoagulación. La remoción de coloración y turbiedad se vio afectada de una manera directamente proporcional a la cantidad de corriente aplicada a la celda y al tiempo de tratamiento al que se sometió el agua contaminada. La cantidad óptima para el manejo de la celda de electrocoagulación es de 1.0 amperios, ya que con esta cantidad de corriente se puede remover, con un 90% de confianza, más del 95% de turbiedad y de color presentes en el agua tratada.

Para esta investigación se fijó como objetivo una remoción de color y turbiedad en un mínimo del 50%, logrando porcentajes de remoción de turbiedad de un 53% y de remoción de color aparente de un 52% en la muestra con mayor cantidad de colorantes (50%), usando la menor cantidad de corriente propuesta (0.5 Amperios). Estos datos se comportaron de manera esperada, debido a que la menor remoción se da con una menor cantidad de corriente aplicada al agua más contaminada.

Ahora, caso contrario al anterior, utilizando la mayor cantidad de corriente propuesta, 1.0 Amperios, se logró una remoción máxima de un 99% de turbiedad y una remoción de 98% de color aparente en la muestra con menos presencia de colorantes (10%), esto se podría asumir fácilmente siendo poca la cantidad de agua contaminada. La eficiencia del método se corrobora observando los resultados de agua tratada con un 50% de presencia de colorantes utilizando 1.0 Amperios, logrando así una remoción de un 95% de turbiedad y un 88% de color aparente.

Esto sucede debido a que a una mayor cantidad de corriente aplicada al sistema, se produce una mayor hidrolización del agua, desestabilizando más rápidamente las cargas de los coloides y generando más burbujas de H_2 y de O_2 . Conforme estas burbujas van ascendiendo a la superficie, van creando un movimiento interno de las partículas suspendidas ya desestabilizadas, haciendo que estas se agreguen unas con otras con mayor facilidad y así poder arrastrar los flocs, llevándoselos consigo a la superficie formando así la espuma saturada de partículas en suspensión.

Para determinar si la variación de la cantidad de corriente aplicada a la celda electroquímica para poder lograr una remoción de turbiedad y de color a un agua contaminada con diferentes porcentajes de colorantes presentes tiene un

efecto significativo desde el punto de vista estadístico se utilizó un análisis de varianza (ANOVA), que analizó la variabilidad de los factores respuesta en contribuciones debidas a varios factores. La contribución de cada factor se midió eliminando los efectos de los demás factores y se analizó por medio de valores de probabilidad que cada efecto reflejó directamente a los factores respuesta.

Dado que los valores de probabilidad (Valor-P), presentados en las tablas ANOVA (ver tablas XXXVI, XXXIX, XLII) fueron menores que 0.05, se concluyó que con un 95% de confiabilidad, los factores tuvieron un efecto significativo en la remoción de turbiedad y coloración, tal y como se observó en este experimento.

Para poder cuantificar una medida de variabilidad en el muestreo se utilizó la tabla de medias, que desglosa todas las combinaciones de factores utilizados en el experimento, mostrando así sus medias y sus errores estándar, mostrando datos máximos de error de 4.99817 para la turbiedad, 13.7268 para el color y 0.0385253 para el pH, indicando así que el experimento se realizó de una buena manera, mostrando una no variabilidad en el muestreo.

La tabla de pruebas de múltiples rangos nos indicó el comportamiento de combinaciones de factores utilizados, esto mediante la diferencia de medias y

mostrando en la columna de Grupos Homogéneos y utilizando el procedimiento LSD de Fisher, muestran una serie de X's de manera escalonada, dando a conocer que ningún par de factores tienen un comportamiento parecido, indicando que diferentes pares de factores no dan respuesta parecida.

El método de electrocoagulación resultó ser muy eficiente en la remoción de turbiedad y coloración, pero se vio que genera un aumento en el pH del agua que está siendo tratada. Este aumento se ve afectado de una manera directa por la cantidad de corriente que se le aplica a la celda electroquímica, ya que con un mayor amperaje se produce una mayor cantidad de iones OH^- que hacen que se eleve el pH a valores máximos de 9.85 unidades representando un aumento del 12% en el pH de la solución original.

Adjunto a los análisis de turbiedad y color, se determinó el porcentaje en que el tratamiento por electrocoagulación aumenta el pH en el agua tratada, se realizó un análisis microbiológico a las muestras de agua sin tratar y el agua tratada con 0.5 y 1 amperio. Teniendo como resultados de estas pruebas 60,000 y 20,000 NMP para una muestra tratada con 0.5 y 1.0 amperios respectivamente. Este descenso en el nivel de bacterias coliformes presentes se debe a la oxidación de su pared celular a causa de la presencia de O_2 y a los altos niveles de pH en donde a las bacterias se les dificulta vivir.

Para finalizar se puede afirmar que la electrocoagulación es un método altamente eficiente para el tratamiento de aguas residuales, debido a que elimina turbiedad y color en porcentajes mayores al 90% y remueve bacterias que pueden ser dañinas para la salud de los consumidores.

CONCLUSIONES

1. La electrocoagulación es un método viable técnicamente para eliminación de turbiedad, color y microorganismos en aguas residuales industriales textiles.
2. Este método puede ser aplicado como pre-tratamiento para favorecer la potabilización del agua en la planta de tratamiento Lo de Coy.
3. Se determinó que el método de electrocoagulación remueve, con un 90% de confiabilidad, más del 98% de turbiedad y de color del agua contaminada con colorantes de origen textil. Estos datos corresponden a este tipo específico de diseño.
4. Con la electrocoagulación se obtienen resultados económicamente ventajosos de inversión y operación en comparación con la coagulación química que se usa actualmente en los tratamientos de agua contaminada, ya que para su operación solo necesita electricidad.

RECOMENDACIONES

A las personas interesadas en profundizar más en este sistema de tratamiento de aguas, se recomienda lo siguiente:

1. Obtener una fuente de poder con mayor potencia, así pueden realizar experimentos con un amperaje más alto.
2. Elaborar electrodos de hierro y comparar los resultados obtenidos con los electrodos de aluminio.
3. Realizar experimentos variando la distancia entre los electrodos y realizar comparaciones.
4. Obtener suficientes recursos tanto personales como monetarios para poder lograr una caracterización completa de las muestras madre de agua con colorante.
5. Diseñar un reactor a flujo continuo y comparar resultados con reactor tipo por lotes.

6. Tener mucho entusiasmo y energía en la elaboración de investigaciones de este tema, ya que es un método sencillo y eficiente para el tratamiento de aguas residuales.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias físicas

1. Alonso-Vante, Nicolás, "*ELECTROQUÍMICA Y ELECTROCATÁLISIS, MATERIALES, ASPECTOS FUNDAMENTALES Y APLICACIONES*", E-Libro Net, Buenos Aires, 2003.
2. Cosgrove, Terence, "*COLLOID SCIENCE: PRINCIPLES, METHODS AND APPLICATIONS*", Blackwell publishing Ltd.
3. Cox, Charles R, "*OPERACIÓN AND CONTROL OF WÁTER TREATMENT PROCESSES*"
4. Fernández, Carlos Mongay. "*QUIMIOMETRÍA*", Universidad de Valencia, publicado por Universitat de València, 2005.
5. Galvín, Rafael Marín, Rodríguez Mellado, José Miguel "*FISICOQUÍMICA DE AGUAS*", Ediciones Diaz de Santos S.A., España, 1999.
6. Gutiérrez Ríos, Enrique "*QUÍMICA*", Editorial Reverté, España, 1985.
7. Heinke, Gary W. Henry, L Glynn, "*INGENIERÍA AMBIENTAL*", segunda edición, Prentice Hall, México, 1999.
8. Klages, Federico , "*TRATADO DE QUÍMICA ORGÁNICA*", Editorial Reverté, España, 1968.
9. Lock Sing de Ugaz, Olga, "*COLORANTES NATURALES*", Fondo editorial de la pontificia universidad católica del Perú, Perú, 1997.
10. Metcalfe Coulson, John "*Ingeniería química*", Editorial Reverté, España, 1979.
11. Perez, Nestor, "*ELECTROCHEMISTRY AND CORROSION SCIENCE*", Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004.
12. S. Moore, David, "*ESTADÍSTICA APLICADA BÁSICA*", Antoni Bosch editor, España, 2000.

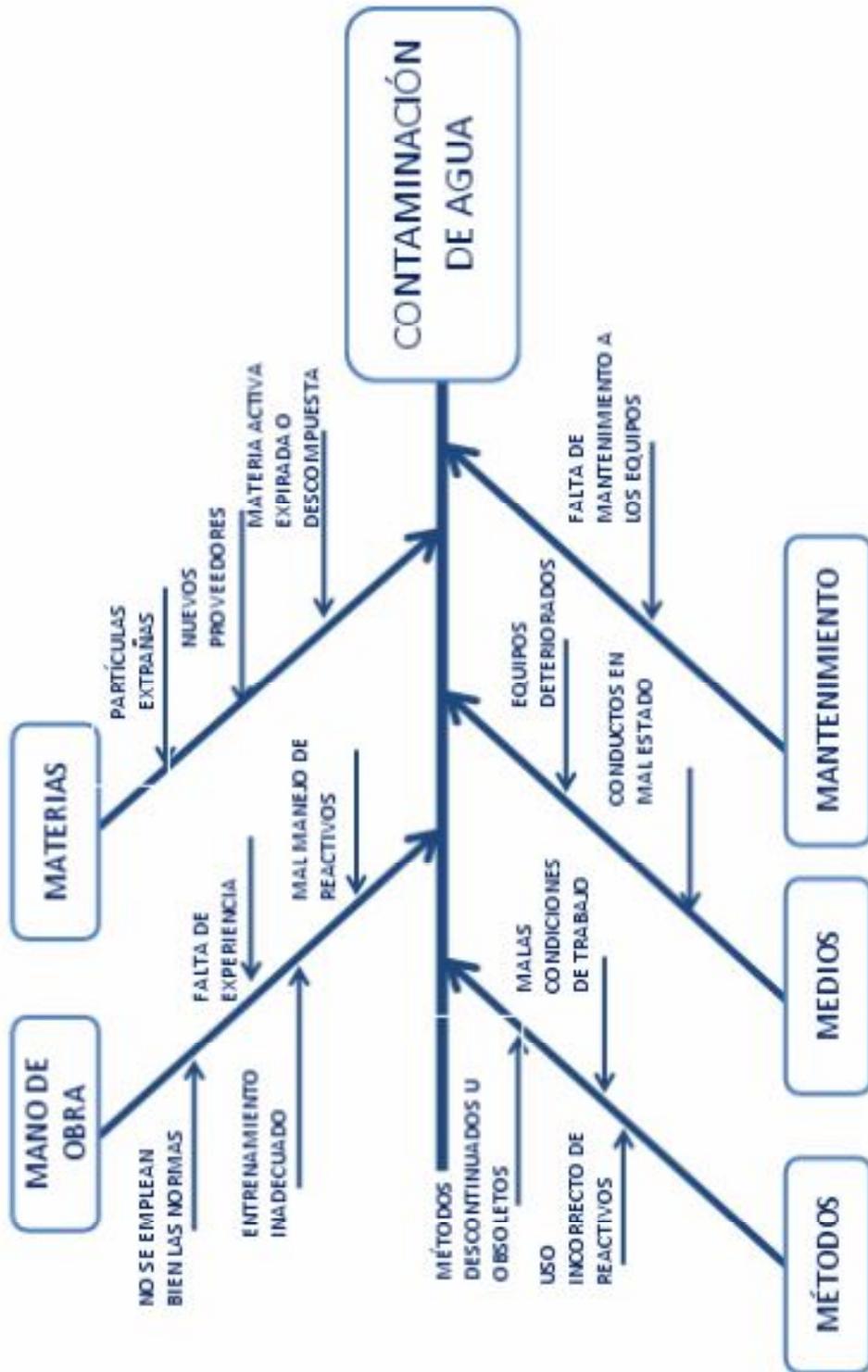
13. Walas, Stanley M, "*CHEMICAL PROCESS EQUIPMENT, SELECTION AND DESIGN*". Primera edición, Butterworth Heinemann, Estados Unidos, 1988.
14. Weber, W. J. "*CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA*", Editorial Reverté, España, 1979.

Referencias electrónicas

15. Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental, "*REVISION DE LA TEORIA DE LA COAGULACION DEL AGUA*"
<http://www.bvsde.paho.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml>
16. Aristizábal Castrillón, Adriana, Bermúdez Agudelo, María Catalina, "*ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA TRATAMIENTO DE AGUAS PROCEDENTES DE LAVANDERÍAS INDUSTRIALES CON FINES DE REUSO*"
<http://d.scribd.com/docs/15ind4542cs4lyixguze.pdf>

APÉNDICE

DIAGRAMA DE ISHIKAWA USANDO MÉTODO 5M



Propuesta técnica a escala piloto para la remoción de color de origen textil, por medio de electrocoagulación para favorecer el proceso de potabilización de agua, en una planta de tratamiento de aguas

Procedimiento para empezar la tesis en la carrera de Ingeniería Química



ANEXOS

Figura 50. Personal de EMPAGUA tomando muestras en sector de descarga



Figura 51. Descarga de agua contaminada con colorantes.



Figura 52. Agua contaminada previo a tratamiento



Figura 53. Agua contaminada en proceso de remoción de colorantes



Figura 54. Agua ya tratada con el proceso de electrocoagulación



Figura 55. Vista superior de la celda, mostrando la espuma formada por el proceso



Figura 56. Formación de las burbujas de arrastre de partículas en suspensión



Figura 57. Comparación de muestras de agua previo a tratamiento, tratamiento con 0.5 Amperio y tratamiento con 1 Amperio



Figura 58. Prueba presuntiva de presencia de coliformes fecales.

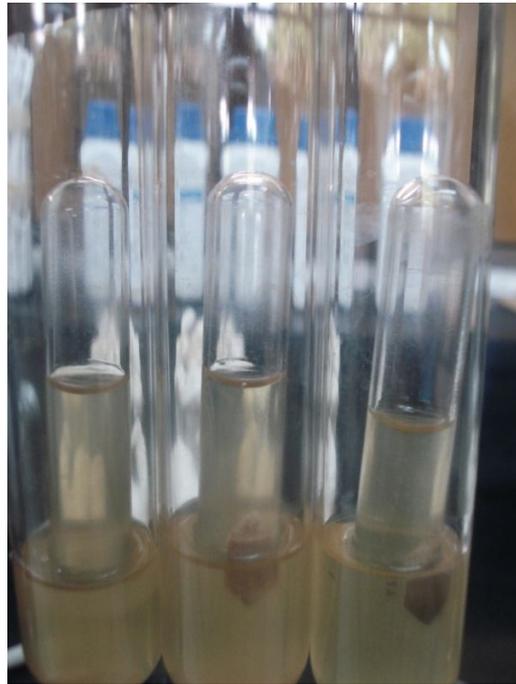


Figura 59. Comparación de formación de gas en muestra sin tratar y muestra tratada



Figura 60. Prueba confirmativa de presencia de coliformes totales.



Figura 61. Comparación de formación de gas en muestra sin tratar y muestra tratada



Figura 62. Comparación tubos con análisis presuntivo y confirmativo de muestras sin tratar y ya tratadas

