

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA
AGROINDUSTRIAL**



**DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE AGENTES
COAGULANTES Y FLOCULANTES EN RELACIÓN CON
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA
DE SANGUAZA DE UNA EMPRESA PESQUERA EN CHIMBOTE**

PRESENTADO POR

Bach. DE LA CRUZ JARA OSCAR

Bach. MOYA CHAUCA GLEICER DELILACH

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AGROINDUSTRIAL**

NVO. CHIMBOTE - PERU

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL



HOJA DE AVAL DEL JURADO EVALUADOR

El presente trabajo de tesis titulado “DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES EN RELACIÓN CON PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE SANGUAZA DE UNA EMPRESA PESQUERA EN CHIMBOTE”, para obtener el título profesional de ingeniería agroindustrial presentado por Bach. DE LA CRUZ JARA OSCAR y Bach. MOYA CHAUCA GLEICER DELILACH, que tienen como asesor al docente Ms. Saúl Eusebio Lara, designado por resolución decanal N° 226-2016-UNS-FI. Ha sido revisado y aprobado el día 05 de enero del 2018 por el siguiente jurado evaluador, designado mediante resolución N° 232 – 2017 – UNS – CFI.

M.Sc. Saúl Eusebio Lara
Presidente (Asesor)

Dr. Daniel Sánchez Vaca
Secretario

Ms. Williams Castillo Martínez
Integrante



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA



FACULTAD DE INGENIERÍA E.A.P. DE INGENIERÍA DE AGROINDUSTRIAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 12:00 m. del 05 de Enero del dos mil dieciocho se instaló en el Auditorio de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Agroindustrial, el Jurado Evaluador, designado mediante resolución N° 232-2017-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **M. Sc. Saúl Eusebio Lara** (Presidente)
- **Dr. Daniel Sánchez Vaca** (Secretario)
- **Ms. Williams Castillo Martínez** (Integrante); para inicio a la Sustentación y Evaluación de Tesis, titulada: **“DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES EN RELACIÓN CON PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE SANGUAZA DE UNA EMPRESA PESQUERA EN CHIMBOTE”**, elaborada por el (os) bachilleres en Ingeniería Agroindustrial.

- **DE LA CRUZ JARA OSCAR**
- **MOYA CHAUCA GLEICER DELILACH**

Asimismo, tienen como Asesor al docente: **M.Sc.Saúl Eusebio Lara**

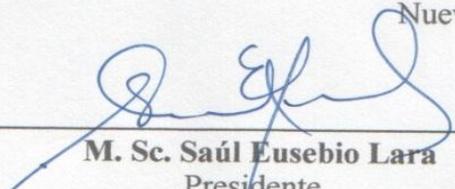
Finalizada la sustentación, el (os) Tesisistas respondió (eron) las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y el Público presente.

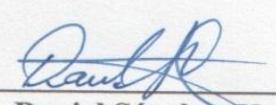
El Jurado después de deliberar sobre aspecto relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes y en concordancia con el Artículo 39° y 40° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

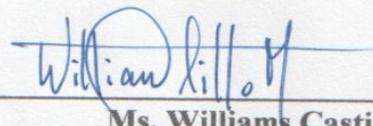
BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
DE LA CRUZ JARA OSCAR	19	Excelente

Siendo las 12:50 pm. del mismo día, se dio por terminado dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el presente jurado.

Nuevo Chimbote, 05 de Enero del 2018


 M. Sc. Saúl Eusebio Lara
 Presidente


 Dr. Daniel Sánchez Vaca
 Secretario


 Ms. Williams Castillo Martínez
 Integrante



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA



FACULTAD DE INGENIERÍA
E.A.P. DE INGENIERÍA DE AGROINDUSTRIAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 12:00 m. del 05 de Enero del dos mil dieciocho se instaló en el Auditorio de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Agroindustrial, el Jurado Evaluador, designado mediante resolución N° 232-2017-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **M. Sc. Saúl Eusebio Lara** (Presidente)
- **Dr. Daniel Sánchez Vaca** (Secretario)
- **Ms. Williams Castillo Martínez** (Integrante); para dar inicio a la Sustentación y Evaluación de Tesis, titulada: **“DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES EN RELACIÓN CON PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE SANGUAZA DE UNA EMPRESA PESQUERA EN CHIMBOTE”**, elaborada por el (os) bachilleres en Ingeniería Agroindustrial.
- **DE LA CRUZ JARA OSCAR**
- **MOYA CHAUCA GLEICER DELILACH**

Asimismo, tienen como Asesor al docente: **M.Sc.Saúl Eusebio Lara**

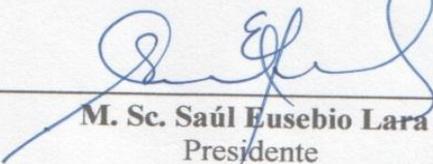
Finalizada la sustentación, el (os) Tesistas respondió (eron) las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y el Público presente.

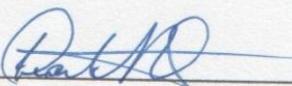
El Jurado después de deliberar sobre aspecto relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes y en concordancia con el Artículo 39° y 40° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

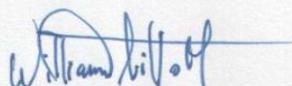
BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
MOYA CHAUCA GLEICER DELILACH	19	Excelente

Siendo las 12:50 pm del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el presente jurado.

Nuevo Chimbote, 05 de Enero del 2018


 M. Sc. Saúl Eusebio Lara
 Presidente


 Dr. Daniel Sánchez Vaca
 Secretario


 Ms. Williams Castillo Martínez
 Integrante

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar hasta este punto y haberme dado la fortaleza para poder seguir adelante en cada momento de dificultad que se me presenta en el transcurso del logro de este objetivo, además por darme salud y entendimiento para afrontar las diversas adversidades que se me presentan a lo largo de mi vida así como su infinita misericordia.

A mis padres y mi hermana, por brindarme su apoyo incondicional en el logro de mis objetivos, además por ser mi motivación constante en cada momento de mi vida.

GLEICER DELILACH MOYA CHAUCA

DEDICATORIA

A mis padres, hermana; por su apoyo incondicional y sus críticas, siempre acertadas. Por brindarme todas las facilidades para desarrollar los proyectos que me he planteado y como fruto de ello voy cumpliendo paso a paso lo que me propuse en un inicio.

A mis profesores, porque con sus enseñanzas y motivación ayudaron a emplear adecuadamente los conocimientos adquiridos en la universidad, y en especial Ms. Saúl Eusebio Lara por su asesoría, confianza, amistad y apoyo desinteresado al guiarme a desarrollar este informe.

A Dios; por darme una oportunidad cada día, en compañía de mi familia y amigos, permitiéndome adquirir nuevas experiencias. Y dando gracias por dichas oportunidades.

OSCAR DE LA CRUZ JARA

AGRADECIMIENTO

Ante todo nuestro profundo agradecimiento a Dios por brindarnos la sabiduría para poder lograr este objetivo, por habernos dado la fortaleza de creer en nosotros además de darnos la fuerza que necesitábamos para poder salir a delante ante cualquier dificultad que se nos haya interpuesto en el trayecto de nuestra carrera universitaria.

Un especial agradecimiento a nuestros docentes por los conocimientos y asesorías brindadas a lo largo de nuestra carrera universitaria. En especial agradecimiento a nuestro asesor M. Sc. Saúl Eusebio Lara por su apoyo y orientación en el desarrollo de la presente tesis así como al docente Dr. Daniel Sánchez Vaca por su cooperación y ayuda en cada momento necesitado; de manera desinteresada para el desarrollo de esta investigación.

A la universidad Nacional del Santa que nos acogió en sus aulas y nos dio la oportunidad de desarrollar nuestra carrera universitaria, formándonos como personas competitivas y motivándonos día a día para seguir desarrollando como personas de bien y buenos profesionales.

Oscar De La Cruz Jara y Gleicer Delilach Moya Chauca

ÍNDICE

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	22
1.1. PROBLEMA	23
1.2. OBJETIVOS	23
1.2.1. GENERAL	23
1.2.2. ESPECÍFICOS	23
1.3. HIPÓTESIS	25
1.4. PLAN EXPERIMENTAL DE ESTUDIO	25
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	30
2.1. ANTECEDENTES	30
2.2. DEFINICIÓN DE AGUA DE SANGUAZA	33
2.3. DEFINICIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN	34
2.3.1. COAGULANTES QUÍMICOS.	34
2.3.2. COAGULANTES NATURALES.	37
2.3.3. ETAPAS DE LA COAGULACIÓN.	39
2.3.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN.	40
2.4. DEFINICIÓN DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN	42
2.4.1. FLOCULANTES QUÍMICOS.	42
2.4.2. FLOCULANTES NATURALES.	43

2.4.3.	MECANISMO DE FLOCULACIÓN.	45
2.5.	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	46
2.5.1.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.	46
2.5.2.	DUREZA TOTAL.....	46
2.5.3.	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.	47
2.6.	TEST DE PRUEBA DE JARRAS	48
2.7.	NORMAS PERUANAS DE CONTROL DE EFLUENTES INDUSTRIALES	49
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	51
3.1.	LUGAR DE EJECUCIÓN.....	51
3.2.	MATERIAL DE ESTUDIO.....	51
3.3.	REACTIVOS Y MATERIALES	51
3.3.1.	REACTIVOS.	51
3.3.2.	MATERIALES.	53
3.3.3.	EQUIPOS.	54
3.4.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO	54
3.4.1.	VARIABLES.....	56
3.4.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL.	57
3.4.3.	RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE AGUA DE SANGUAZA.	59

3.4.4. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE SANGUAZA EN TÉRMINOS DE PARÁMETROS FÍSICO – QUÍMICOS. (SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES, DUREZA TOTAL Y DBO ₅).	59
3.4.5. OBTENCIÓN DE LOS AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES QUÍMICOS.	60
3.4.6. OBTENCIÓN DE LOS AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES NATURALES.	60
3.4.7. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO.	64
3.4.8. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA.	64
3.4.9. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DEL MUCILAGO DE TUNA OPUNTIA FICUS-INDICA.	65
3.4.10. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE POLIACRILAMIDA.	65
3.4.11. TEST DE JARRAS.	66
3.4.12. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).	67
3.4.13. DETERMINACIÓN DE DUREZA TOTAL: MÉTODO VOLUMÉTRICO CON EDTA.	68
3.4.14. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.	70
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	73
4.1. OBTENCIÓN DE LOS AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES NATURALES	73
4.1.1. OBTENCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA.	73

4.1.2.	OBTENCIÓN DE MUCÍLAGO DE LA TUNA; NOMBRE CIENTÍFICO (OPUNTIA FICUS-INDICA).	74
4.2.	OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE SANGUAZA.	76
4.3.	COMBINACIÓN 1	77
4.3.1.	ANÁLISIS DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.	80
4.3.2.	ANÁLISIS DE DUREZA TOTAL.	89
4.3.3.	ANÁLISIS DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.	98
4.3.4.	OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES RESPUESTAS - PRIMERA COMBINACIÓN.	106
4.3.5.	REMOCIÓN DE SST Y DBO₅ EN FUNCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LA PRIMERA COMBINACIÓN.	110
4.3.6.	REMOCIÓN DE DUREZA TOTAL EN FUNCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LA PRIMERA COMBINACIÓN.	111
4.4.	COMBINACIÓN 2	112
4.4.1.	ANÁLISIS DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.	115
4.4.2.	ANÁLISIS DE DUREZA TOTAL.	123
4.4.3.	ANÁLISIS DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO-COMBINACION 2.	131
4.4.4.	OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES RESPUESTAS-COMBINACIÓN 2.	139
4.4.5.	REMOCIÓN DE SST Y DBO₅ EN FUNCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LA COMBINACIÓN 2.	143

4.4.6. REMOCIÓN DE DUREZA TOTAL EN FUNCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LA COMBINACION 2.....	144
4.5. SELECCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA.....	145
V. CONCLUSIONES.....	146
VI. RECOMENDACIONES.....	148
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	149
VIII. ANEXOS.....	156
ANEXO 1. RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA DE SANGUAZA.....	156
ANEXO 2. AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES QUÍMICOS.....	157
ANEXO 3. OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA.....	158
ANEXO 4. OBTENCIÓN DEL MUCILAGO DE OPUNTIA FICUS INDICA.....	159
ANEXO 5. TEST DE JARRAS.....	160
ANEXO 6. DETERMINACIÓN DE SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.....	161
ANEXO 6. DETERMINACIÓN DE LA DUREZA TOTAL.....	162
ANEXO 7. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO..	163
ANEXO 8. NIVELES RECOMENDADOS DE AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES.....	164

INDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Resumen del diseño experimental.....	28
Tabla 2: Matriz de experimentos	29
Tabla 3: Análisis proximal del agua de sanguaza (P/P).....	33
Tabla 4: Límites Máximos Permisibles (LMP) para la Industria de harina y aceite de pescado .	49
Tabla 5: Variables del diseño experimental.....	56
Tabla 6: Niveles del diseño experimental	58
Tabla 7: Diseño experimental-Box - Behken.	58
Tabla 8: Alícuotas de muestra para determinación de BDO ₅	72
Tabla 9: Composición química proximal (P/P)	73
Tabla 10: Composición proximal – mucilago de tuna opuntia ficus en polvo (P/P)	75
Tabla 11: Características efluente - sanguaza.....	76
Tabla 12: Resultados de la primera combinación.	78
Tabla 13: pH iniciales y finales de los ensayos-primera combinación.	79
Tabla 14: Análisis de varianza para SST- primera combinación.....	80
Tabla 15: Análisis de varianza ajustado para SST-primera combinación.....	81
Tabla 16: Coeficientes de regresión – SST- primera combinación.....	84
Tabla 17: Resultados Estimados para SST- primera combinación.	85
Tabla 18: Optimización de respuesta – primera combinación.....	87
Tabla 19: Análisis de varianza para dureza total –primera combinación.....	89
Tabla 20: Análisis de varianza ajustado para dureza total – primera combinación.	90
Tabla 21: Coeficientes de regresión – dureza total-primera combinación.	93
Tabla 22: Resultados Estimados para Dureza total – primera combinación.	94

Tabla 23: Optimización de respuesta – Dureza Total- primera combinación.	96
Tabla 24: Análisis de varianza para DBO ₅ -primera combinación.	98
Tabla 25: Análisis de varianza para DBO ₅	99
Tabla 26: Coeficiente de Regresión – DBO ₅ -primera combinación.	102
Tabla 27: Resultados Estimados para DBO ₅ -primera combinación.	103
Tabla 28: Optimización de respuesta –DBO ₅ - Primera combinación.	105
Tabla 29: Valores observados de múltiples respuestas- primera combinación.	106
Tabla 30: Deseabilidad – Variables-primera combinación.	106
Tabla 31 Deseabilidad prevista – observada-primera combinación.	107
Tabla 32. Factores Óptimos-Primera combinación.....	109
Tabla 33. Respuesta Óptima-primera combinación.	109
Tabla 34: Resultados de la segunda combinación.	113
Tabla 35: pH iniciales y finales de los ensayos-segunda combinación.	114
Tabla 36: Análisis de varianza para SST-segunda combinación.	115
Tabla 37. Análisis de varianza ajustado para SST-segunda combinación.	116
Tabla 38. Coeficientes de regresión – SST-Segunda combinación.	119
Tabla 39. Resultados estimados para SST-segunda combinación.	120
Tabla 40. Optimización de respuesta – segunda combinación.	122
Tabla 41. Análisis de varianza para la dureza total - combinación 2.....	123
Tabla 42. Análisis de varianza ajustado - dureza total – combinación 2	124
Tabla 43. Coeficientes de regresión – dureza total- combinación 2	127
Tabla 44. Resultados estimados para la dureza total-combinación 2.....	128
Tabla 45. Optimización de respuesta – Combinación 2.....	130

Tabla 46. Análisis de varianza para DBO ₅ -combinacion 2	131
Tabla 47. Análisis de varianza ajustado para DBO ₅ – combinación 2.....	132
Tabla 48. Coefficientes de regresión – DBO ₅ -combinación 2.....	135
Tabla 49. Resultados Estimados para DBO ₅ -combinación 2	136
Tabla 50. Optimización de respuesta –DBO ₅ - Combinación 2	138
Tabla 51. Valores observados de múltiples respuestas-combinación 2	139
Tabla 52. Deseabilidad – Variables - Combinación 2.....	139
Tabla 53. Deseabilidad óptima de la combinación 2	140
Tabla 54. Factores Óptimos-combinación 2.....	142
Tabla 55. Respuesta Óptima-combinación 2	142
Tabla 56. Respuesta Óptima general del estudio	145

INDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Fases de la coagulación	39
Figura 2. Etapas del proceso de tratamiento de efluentes industriales.....	50
Figura 3. Diagrama para la obtención de almidón de yuca.	61
Figura 4. Obtención del mucilago tuna opuntia ficus	62
Figura 5. Diagrama de Pareto – SST – primera combinación.	82
Figura 6. Efectos principales - SST- Primera combinación.	83
Figura 7. Superficie de respuesta estimados – SST	86
Figura 8. Grafica de residuos – SST- primera combinación.	88
Figura 9. Diagrama de Pareto – Dureza Total – Primera combinación.	91
Figura 10. Grafica de efectos principales – Dureza total – Primera combinación.	92
Figura 11. Superficie de Respuesta Estimada-Dureza total-primera combinación.	95
Figura 12. Gráfica de residuos – dureza total – primera combinación.	97
Figura 13. Diagrama de Pareto – DBO5 – Primera combinación.	100
Figura 14. Grafica de Efectos Principales – DBO ₅ – Primera combinación.....	101
Figura 15. Superficie de Respuesta Estimada-DBO ₅ -primera combinación.....	104
Figura 16. Grafica de residuos – DBO ₅ – Primera combinación.....	105
Figura 17. Superficie de respuesta estimada-primera combinación.	108
Figura 18. Remoción de SST y DBO5 en función de la dosis óptima de la primera combinación.	110
Figura 19. Remoción de dureza total en función de la dosis óptima de la primera combinación.	111
Figura 20. Diagrama de Pareto – SST – Segunda combinación.....	117

Figura 21. Efectos principales – SST – Segunda combinación.....	118
Figura 22. Superficie de respuesta estimada – SST-segunda combinación.....	121
Figura 23. Grafica de residuos – SST-segunda combinación.....	122
Figura 24. Diagrama de Pareto – Dureza Total – Combinación 2.....	125
Figura 25. Gráfico de Efectos principales – Dureza Total – Combinación 2	126
Figura 26. Superficie de Respuesta Estimada-dureza total-combinación 2	129
Figura 27. Gráfico de residuos – Dureza total – Combinación 2	130
Figura 28. Diagrama de Pareto – DBO ₅ – Combinación 2.....	133
Figura 29. Gráfica de efectos principales – DBO ₅ – Combinación 2	134
Figura 30. Superficie de Respuesta Estimada-DBO ₅ -Combinación 2	137
Figura 31. Gráfico de residuos – DBO ₅ - Combinación 2.....	138
Figura 32. Superficie de respuesta estimada-combinación 2	141
Figura 33. Remoción de SST y DBO ₅ en función de la dosis óptima de la combinación 2.....	143
Figura 34. Remoción de dureza total en función de la dosis óptima de la combinación 2	144

RESUMEN

El objetivo del siguiente trabajo de investigación fue determinar la dosis óptima del efecto producido por la adición de dos agentes (químico y natural), para ello realizamos dos combinaciones, en la primera combinación empleamos un agente coagulante químico y un agente floculante natural; en la segunda combinación empleamos un agente coagulante natural y un agente floculante químico, el medio a tratar fue el agua de sanguaza, adaptándolo en un pH entre 8-9 para su tratamiento; con la finalidad de clarificar y obtener resultados bajo los Límites Máximos Permisibles (LMP) que establece el Ministerio de Producción de Perú (PRODUCE). Posteriormente se efectuaron ensayos a escala de laboratorio, mediante una adaptación del método de Prueba de Jarras, en el laboratorio de química general e inorgánica de la Universidad Nacional del Santa (UNS) y los análisis realizados fueron: Sólidos Suspendidos Totales (SST), Dureza Total y Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO_5), para comprobar la efectividad de los agentes empleados.

Los resultados obtenidos permitieron definir la dosis óptima en ambas combinaciones, en la primera combinación (agente coagulante: Sulfato de Aluminio - agente floculante: Almidón de yuca), con una concentración de agente coagulante al 4% (dosificado a 10 ppm), concentración de agente floculante de 0.5% (dosificado a 10 ppm) y un pH de valor 9, se obtuvieron porcentajes de remoción de SST (46.26%; desde 214 mg/L hasta 115 mg/L), dureza total (37.80%; desde 15 mgCaCO₃/L hasta 9.33 mgCaCO₃/L) y DBO_5 (50.68%, desde 146 mgO₂/L hasta 72 mgO₂/L), y en la segunda combinación (agente coagulante: Mucílago de Tuna *Opuntia Ficus -Indica* - agente floculante: poliacrilamida), con una concentración de agente coagulante al 4% (dosificado a 10 ppm), concentración de agente floculante de 0.5% (dosificado a 10 ppm) y un pH de valor 8, se obtuvieron porcentajes de remoción de SST (43.93 %; desde 214 mg/L

hasta 120 mg/L), dureza total (38.81%; desde 15 mgCaCO₃/L hasta 9.52 mgCaCO₃/L) y DBO₅ (49.32 %; desde 146 mgO₂/L hasta 74 mgO₂/L). Todos los resultados fueron reportados a una dosis suministrada al efluente a 10 ppm (agente coagulante y agente floculante), una velocidad de agitación rápida de 200 rpm por 5 minutos, seguida de una velocidad de agitación lenta de 40 rpm por 20 minutos y un tiempo de sedimentación de 1 hora. Finalmente la primera combinación fue el que registro los valores más cercanos a los límites máximos permisibles.

Palabras claves: Dosis óptima, Sólidos Suspendidos Totales, Demanda bioquímica de Oxígeno, Dureza Total

ABSTRACT

The objective of the following research was to determine the optimum dose of the effect produced by the addition of two agents (chemical and natural), for this we made two designs, in the first design we used a chemical coagulant agent and a natural flocculating agent; In the second design we used a natural coagulating agent and a chemical flocculating agent, the medium to be treated was the fish leech, adapting it at a pH between 8-9 for its treatment; With the purpose of clarifying and obtaining results under the Maximum Permissible Limits (MPL) established by the Ministry of Production in Peru (PRODUCE). Subsequently laboratory tests were carried out, by means of an adaptation of the Jar Test method, in the laboratory of general and inorganic chemistry in National Santa University (UNS) and the analyzes were: Total Suspended Solids (TSS), Total Hardness and Biochemical Oxygen Demand (DBO₅), to verify the effectiveness of the agents used.

The results obtained allowed to define the best dose in both designs, in the first design (coagulating agent: Aluminum Sulfate - flocculating agent: Cassava starch), with a coagulant agent concentration of 4%, flocculating agent of 0.5% and a pH of 9, Percentages of SST removal were obtained (46.26%, from 214 mg/L up to 115 mg/L), total hardness (37.80%, from 15 mgCaCO₃ / L up to 9.33 mgCaCO₃ / L), and DBO₅ (50.68%, from 146 mgO₂ / L to 72 mgO₂ / L), and in the second design (coagulating agent: Cactus pear mucilage *Opuntia Ficus Indica* - flocculating agent: anionic polyacrylamide), with a coagulant agent concentration 4%, flocculating agent of 0.5% and in PH of 8, SST removal percentages (43.93%, from 214 mg/L to 120 mg/L), total hardness (36.53%, from 15 mgCaCO₃ / L to 9.52 mgCaCO₃ / L), and DBO₅ (49.32%; 146 mg O₂ / L to 74 mg O₂ / L). All results were reported at a dose delivered to the effluent at 10 ppm (coagulant and flocculating agent), a rapid stirring speed rate of 200 rpm for 5

minutes, followed by a slow stirring speed at 40 rpm for 20 minutes and a settling time of 1 hour. Finally the first design was the one that registered the values closest to the maximum permissible limits.

Keywords: Optimal dose, Total Suspended Solids, Biochemical Oxygen Demand, Total Hardness.

I. INTRODUCCIÓN

Gran parte de las empresas pesqueras que realizan un tratamiento (primario o secundario) a sus efluentes en Chimbote, por lo general emplean agentes coagulantes y floculantes de origen químico, posiblemente asociados a enfermedades neurodegenerativas, por tal motivo diversos investigadores estudian como alternativa la aplicación de los agentes coagulantes y floculantes naturales, los cuales se consideran seguros, libres de tóxicos y ecológicos. Así mismo la dosis de agentes químicos empleados en el tratamiento de aguas residuales no son las adecuadas. Por el motivo que aún no se estandariza la dosificación adecuada de los agentes mencionados para un tratamiento específico, además de la falta de tiempo, escasez de productos químicos en las empresas, entre otros.

El presente proyecto se justifica en determinar la dosis óptima de las combinaciones planteadas, encontrando la dosificación ideal luego del tratamiento y análisis de los parámetros físico-químicos (SST, Dureza total, DBO₅).

El estudio se dividió en dos fases, la primera consistió en la obtención de los agentes naturales y químicos tanto como la muestra a tratar (agua de sanguaza); seguido del desarrollo del test de jarras, y evaluación de los parámetros fisicoquímicos como: SST, dureza total y DBO₅, iniciales de la muestra; la segunda fase consistió en la preparación y realización de los ensayos establecidos en el plan experimental con el fin de determinar la dosis optima del estudio.

1.1. PROBLEMA

¿Cuál será la dosificación óptima de las combinaciones planteadas empleando agentes coagulantes (sulfato de aluminio – mucilago de tuna *opuntia ficus indica*) y floculantes (polímero de acrilamida – almidón de yuca), y cómo influye sobre los parámetros fisicoquímicos (sólidos suspendidos totales, dureza total y DBO₅) en el tratamiento del agua de sanguaza en una empresa pesquera?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. GENERAL

- Determinar la dosificación óptima del estudio empleando agentes coagulantes (sulfato de aluminio - mucílago del *Opuntia ficus-indica*) y floculantes (poliacrilamida - almidón de yuca), en relación con parámetros físico-químicos de sólidos suspendidos totales, dureza total y DBO₅ en el tratamiento del agua de sanguaza en una empresa pesquera.

1.2.2. ESPECÍFICOS

- Obtener agentes coagulantes y floculantes naturales (mucílago del *Opuntia ficus-indica* y almidón de yuca) y químicos (sulfato de aluminio, poliacrilamida).
- Estandarizar métodos y técnicas analíticas.
- Obtener muestras del agua de sanguaza de una empresa pesquera, para su evaluación según el diseño planteado.
- Caracterizar el agua de sanguaza en términos de parámetros físico – químicos. (sólidos suspendidos totales, dureza total y DBO₅).

- Preparar dosis de las combinaciones planteadas: agentes coagulantes (sulfato de aluminio - mucílago del *Opuntia ficus-indica* – Rango de solución estándar: 2; 4; 6 %) y floculantes (poliacrilamida-almidón de yuca- Rango de solución estándar: 0.1; 0.3; 0.5 %), de acuerdo a los parámetros de sólidos suspendidos totales, dureza total y DBO_5 en el tratamiento de agua de sanguaza, mediante la realización de ensayos.
- Evaluar las variables independientes (agente coagulante, agente floculante y pH), y dependientes (sólidos suspendidos totales, dureza total y DBO_5), a través de herramientas estadísticas del programa Statgraphics Centurión, tales como: análisis de varianza, diagrama de Pareto, gráfica de efectos principales, coeficiente de regresión, superficie de respuesta estimada y optimización de respuesta.
- Seleccionar la dosificación óptima de las combinaciones establecidas (Combinación 1 agente coagulante químico – agente floculante natural; combinación 2 agente coagulante natural – agente floculante químico).

1.3. HIPÓTESIS

La hipótesis de este estudio sugiere que la dosificación óptima de las combinaciones planteadas: Combinación 1 (agente coagulante: Sulfato de aluminio, agente floculante: Almidón de yuca), combinación 2 (agente coagulante: Mucílago de tuna *Opuntia ficus indica*, agente floculante: poliacrilamida), para la obtención de parámetros fisicoquímicos (sólidos suspendidos totales, dureza total y DBO₅) del agua de sanguaza tratada se encontrarán dentro del rango de las normas vigentes ambientales entre los valores de 2 - 4 % (concentración de agentes coagulantes), entre los valores de 0.1 - 0.3 % (concentración de agente floculante) y un valor de pH entre 8.5 y 9.

1.4. PLAN EXPERIMENTAL DE ESTUDIO

DISEÑO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA: MÉTODO DE BOX BENHKEN

- 3 Variables Independientes
- 3 Variables Dependientes

A: VARIABLES INDEPENDIENTES

A₁: Concentración de agente coagulante Sulfato de aluminio -Mucílago de tuna *Opuntia ficus indica* (gramos de agente/100 mL de agua destilada).

- Nivel Alto (1) : 6%
- Nivel Medio (0) : 4%
- Nivel Bajo (-1) : 2%

Valores referenciales de acción de un agente coagulante promedio, es por ello que en el caso de un agente coagulante natural, se le asigna los límites indicados previamente para su evaluación en el diseño experimental (2 a 6% de concentración)

Yixing Bluwat Chemcials (2015).

A₂: Concentración de agente floculante Almidón de yuca - poliacrilamida (gramos de agente/100 mL de agua destilada).

- Nivel Alto (1) : 0.5%
- Nivel Medio (0) : 0.3%
- Nivel Bajo (-1) : 0.1%

Valores referenciales de acción de un agente floculante promedio, se le asigna los límites indicados previamente para su evaluación en el diseño experimental. (0.1 a 0.5 % de concentración) **Yixing Bluwat Chemcials (2015).**

A₃: pH del medio adaptado (muestra de agua de sanguaza).

- Nivel Alto (1) : 9
- Nivel Medio (0) : 8.5
- Nivel Bajo (-1) : 8

Valores referenciales de acción cuando se adapta el pH del efluente a tratar, se le asigna los límites indicados previamente para su evaluación en el diseño experimental. (Valores de 8 a 9) **(Bratby.2006, citado por Andía, 2010, p. 16).**

B: VARIABLES DEPENDIENTES

B ₁ : Sólidos suspendidos totales	(mg/L)
B ₂ : Dureza Total	(mg CaCO ₃ /L)
B ₃ : Demanda Bioquímica de Oxígeno	(mg O ₂ /L)

C: PARÁMETROS ESTABLES

- Temperatura de trabajo: 24 °C (ambiente)
- Velocidad de agitación rápida de 200 rpm por 5 minutos, seguida de una velocidad de agitación lenta de 40 rpm por 20 minutos y un tiempo sedimentación de 1 hora.
- Volumen de la muestra: 1 L.
- Dosis suministrada de agentes coagulantes y floculantes: 10 ppm.

El Diseño de Superficie de Respuesta que se aplicará a nuestro sistema de datos elaborado será el Diseño de Box-Behnken: El cuál constará de 15 corridas establecidas. Se realizaron dos combinaciones:

- Combinación 1: agente coagulante (Almidón de yuca) y agente floculante (Sulfato de Aluminio).
- Combinación 2: agente coagulante (Mucílago de tuna *Opuntia ficus*) y agente floculante (poliacrilamida).

Por lo que en total se plantearon 30 ensayos por realizar.

La **Tabla 1** muestra, la matriz de experimentos empleados en ambas combinaciones, además se observan las 3 variables independientes y los 15 ensayos propuestos por el

programa Estadístico Statgraphics Centurión, de acuerdo a un diseño de superficie de respuesta (Diseño de Box-Behnken).

DISEÑO BASE

- Número de factores experimentales: 3
- Número de bloques: 1
- Número de respuestas: 3
- Número de corridas: 15, incluyendo 3 puntos centrales por bloque
- Grados de libertad para el error: 5

Tabla 1: *Resumen del diseño experimental*

Corrida	Bloque	Variable independiente	Variable independiente	Variable independiente
		Concentración agente coagulante (g/100 mL agua destilada)	Concentración agente floculante (g/100 mL agua destilada)	pH
1	1	1	-1	0
2	1	-1	1	0
3	1	1	1	0
4	1	0	1	1
5	1	1	0	1
6	1	0	-1	1
7	1	0	0	0
8	1	0	1	-1
9	1	0	0	0
10	1	0	-1	-1
11	1	-1	0	-1
12	1	-1	-1	0
13	13	0	0	0
14	14	-1	0	1
15	15	1	0	-1

Nivel Alto: 1 Nivel medio: 0 Nivel bajo;-1

Tabla 2: *Matriz de experimentos*

	Variable independiente	Variable independiente	Variable independiente	Variable dependiente	Variable dependiente	Variable dependiente
Ensayos	Concentración agente coagulante (g/100 mL agua destilada)	Concentración agente floculante (g/100 mL agua destilada)	pH	Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	Dureza Total (mg CaCO₃/L)	Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O₂/L)
1	6	0.1	8.5			
2	2	0.5	8.5			
3	6	0.5	8.5			
4	4	0.5	9			
5	6	0.3	9			
6	4	0.1	9			
7	4	0.3	8.5			
8	4	0.5	8			
9	4	0.3	8.5			
10	4	0.1	8			
11	2	0.3	8			
12	2	0.1	8.5			
13	4	0.3	8.5			
14	2	0.3	9			
15	6	0.3	8			

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. ANTECEDENTES

- **Olivero (2014)**, realizaron la investigación: *Utilización de Tuna (opuntia ficus-indica) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas*. Colombia. La investigación llego a las siguientes conclusiones:

Mediante esta investigación se demostró la eficiencia que tiene el mucilago extraído de la tuna opuntia ficus indica como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. En aguas poco turbias como las del río Magdalena en Magangué, Departamento de Bolívar (Colombia), la velocidad de agitación tiene incidencia en la acción del coagulante ya que este logra llegar hasta las partículas más dispersas aumentando la eficiencia del proceso de clarificación.

Las mejores remociones de turbidez con ambos coagulantes se obtuvieron a una velocidad de agitación de 200 rpm. Sin embargo, el alumbre siempre fue más eficiente. Los valores obtenidos de este parámetro físico-químico después de llevar a cabo el proceso de clarificación del agua con el coagulante natural, no cumplieron con el requerimiento estipulado en la norma técnica colombiana para agua potable. Sin embargo, el agua tratada puede ser empleada en otras actividades. Se sugiere investigar mucho más sobre el tema.

Este antecedente es de importancia para esta investigación, ya que demuestra la eficiencia del mucilago extraído de la tuna opuntia ficus indica como coagulante natural, siendo el mucilago de la tuna uno de los agentes naturales utilizados en nuestra investigación.

- **Ramírez & Jaramillo, (2015)**, realizaron la investigación: *Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua*, Universidad Militar Nueva Granada.

Colombia. Se muestran las principales conclusiones:

El empleo de los agentes naturales para el tratamiento del agua cruda, es una técnica muy antigua, sin embargo, en las últimas décadas su estudio ha profundizado generando nuevas alternativas mediante el uso de agentes origen vegetal o animal.

Todos los extractos, de origen natural, ensayados y reportados por en esta revisión son eficientes en la remoción de turbidez del agua, comparados en algunos casos con el sulfato de férrico o aluminio. La adición de coagulantes naturales, como ayudas de coagulación, reduce significativamente la dosis de productos químicos.

El empleo de materiales naturales puede minimizar el impacto de los coagulantes químicos, reduciendo de manera significativa los costos de tratamiento si se dispone de ellos a nivel local.

Esta investigación es de importancia para este estudio, ya que da a conocer la importancia y la eficiencia del empleo de agentes naturales con respecto a los agentes químicos para el tratamiento de aguas.

- **Solís, (2012)**, realizaron la investigación: *Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales*, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México. La

investigación llegó a las siguientes conclusiones:

Los resultados obtenidos en el presente trabajo lograron comprobar que las mezclas de sulfato de aluminio con almidón de yuca tienen un potencial de coagulación-floculación y podrían ayudar al tratamiento de las aguas superficiales. El empleo de almidón como agente coadyuvante en la remoción de color, mezclado con sulfato de aluminio (agente

coagulante), permitiría reducir el costo económico, el impacto ambiental y los efectos a la salud pública.

Como resultado de esta investigación, se abre una posibilidad de experimentar con otros tipos de aguas tales como las residuales industriales o municipales. Es importante realizar futuras investigaciones con almidones estructuralmente modificados empleando técnicas de copolimerización por injerto con el propósito de aumentar la efectividad en la remoción de color y turbiedad en procesos de tratamiento de aguas superficiales y eliminar el uso de coagulantes metálicos.

Este antecedente es de importancia para esta investigación, ya que emplea el almidón de yuca como agente coagulante, obteniendo resultados favorables para la remoción de turbidez, siendo este el agente natural empleado para nuestro estudio.

– **Martínez & González. (2012)**, realizaron la investigación: *Evaluación del poder coagulante de la tuna (opuntia ficus indica) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas*, Universidad de Cartagena. Colombia. La investigación llegó a las siguientes principales conclusiones:

El análisis de los resultados obtenidos permitió establecer, que en las condiciones manejadas durante las pruebas de jarra, el coagulante natural alcanzó una eficiencia satisfactoria (84.52%), además logró remover un gran porcentaje de turbidez (85.76%) y de color (57.14%) presente en el agua cruda, utilizando dosis similares a la de los coagulantes metálicos con mayor uso en la actualidad para los procesos de tratamiento de agua potable. Este antecedente es de importancia para esta investigación ya que registra valores favorables de remoción de turbidez empleando la tuna como agente coagulante natural para el tratamiento de agua cruda.

2.2. DEFINICIÓN DE AGUA DE SANGUAZA

Es la parte líquida orgánica del pescado, especialmente de la sangre y vísceras ocurrido por la presión del pescado en las pozas de recepción y bodegas de las embarcaciones. **(Pesca Perú, 2015).**

Consiste en una mezcla de agua, sólidos solubles, sólidos insolubles y aceite, que se produce por la pérdida de frescura del pescado en la embarcación y en las pozas. Su generación es potenciada por el trabajo inadecuado del equipo de descarga del pescado, la altura de las pozas, el tamaño de la anchoveta, y el tiempo y temperatura de almacenamiento. Su producción se debe evitar en lo posible, y si ocurre debe ser procesada rápidamente para evitar su descomposición y permitir el aprovechamiento de los sólidos y el aceite que contiene. **(Landeo & Ruiz, 2006, p. 153).**

Según estudios realizados en Chile, la producción de sanguaza en las plantas de harina de pescado puede alcanzar un 2 a 10% del pescado almacenado. **(Parin et al., 2000, citados por Del Valle et al., 2008, p.125).**

La **Tabla 3** muestra, el análisis proximal del agua de sanguaza, luego del proceso de cribado y separación de aceites y grasas del efluente.

Tabla 3: *Análisis proximal del agua de sanguaza (P/P)*

Componente	Porcentaje (%)
Proteína	6.0
Grasa	4.0
Humedad	90.03
Ceniza	3.2
Sólidos totales	13.2

2.3. DEFINICIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos. El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas. Por lo tanto que se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante está mal ajustada. **(Andía, 2010)**

2.3.1. COAGULANTES QUÍMICOS.

Los coagulantes más comunes que se usan en el tratamiento de aguas son compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico. Cada coagulante tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación dependiendo, también, de las características químicas del agua cruda. Con excepción del aluminato de sodio, estos coagulantes son sales ácidas que disminuyen el pH del agua. Por esta razón y dependiendo del agua a tratar, es necesario agregar un álcali como cal, o soda cáustica. **(Cogollo, 2011, p.21).**

En la actualidad, el uso de coagulantes de origen sintético para la potabilización, tales como el Sulfato de Aluminio o el Cloruro Férrico son cuestionadas debido a estos motivos:

- Los problemas medioambientales, lodos tóxicos que no pueden ser utilizados en la agricultura. **(Christopher et al., 2005, p.121).**
- Experimentalmente, el aluminio induce la degeneración neurofibrilar en neuronas de mamíferos superiores. **(Crapper et al., 2001, p. 512).**
- Empeoramiento de enfermedades neurodegenerativas. **(Miller, 2010, p. 86).**
- Relación con el cáncer. **(Dearfield et al., 2012, 265).**

Principalmente existen dos tipos de coagulantes químicos:

2.3.1.1. SALES DE ALUMINIO.

Estas forman un floculo ligeramente pesado. Entre las más comunes están el sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal y sulfato de sodio. El sulfato de aluminio o alumbre es el más utilizado en las plantas de tratamiento de agua potable, debido a su fácil manejo y bajo costo, se utiliza en estado sólido o líquido, “es un polvo de color marfil, ordinariamente hidratado, que con el almacenaje suele convertirse en terrones relativamente duros”. Y está constituido por la sal de una base débil (hidróxido de aluminio) y un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por ello sus soluciones acuosas son muy acidas.

Este compuesto al disociarse en agua, sufre una serie de reacciones con los iones alcalinos presentes en el agua, formando iones complejos, polímeros e hidróxido de aluminio insoluble, que pueden ser adsorbidos por las partículas coloidales suspendidas en el agua produciendo la desestabilización de las cargas y favoreciendo la sedimentación de las mismas. **(Martínez et al.2010, p 499.)**. Sus desventajas radican en:

- Problemas con agua de alta turbiedad, es más difícil su remoción y no tienen efectividad.
- También existe evidencia que relaciona a los coagulantes, a base de aluminio, con el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer en los seres humanos, debido a la presencia de aluminio residual en el agua tratada. **(Flaten, T.P. 2001., p. 189)**.

2.3.1.2. SALES DE HIERRO.

Forman un floculo más pesado y de mayor velocidad de sedimentación. Las más conocidas son: cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato ferroso. **(Ojeda. 2012, p.27)**.

2.3.2. COAGULANTES NATURALES.

El creciente desarrollo y uso de coagulantes naturales, extraídos a partir de microorganismos, tejidos de plantas o animales; son biodegradables y seguros para la salud humana, mucho menores a las generadas por el empleo de agentes coagulantes metálicos, como el alumbre (**Sciban et al, 2009**).

Los agentes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal que actúan de modo similar a los coagulantes y desinfectantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbidez inicial de esta. Algunos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades (**García, 2007**).

Son coagulantes alternativos que pueden tener rendimientos iguales o incluso superiores a los de origen sintético, además tienen un valor agregado relacionado con las características de biodegradabilidad que lo convierten en una alternativa viable desde el punto de vista ambiental.

Algunos de los coagulantes de origen natural son almidones y polisacáridos naturales, tales como la celulosa, y el quitosano (**Nieto & Orellana, 2011**).

2.3.2.1. MUCÍLAGO EXTRAÍDO DE LA TUNA OPUNTIA FICUS-ÍNDICA.

En la tuna existen valiosos y atractivos compuestos funcionales que pueden ser extraídos y utilizados para formular y enriquecer nuevos alimentos, para formar parte de la cada vez más cotizada gama de aditivos naturales (gomas y colorantes) tanto para la industria alimentaria como farmacéutica y cosmética, para formular suplementos alimenticios, ricos en fibra o con fines de control de la diabetes o la obesidad, entre otros.

Relación con el cáncer. **(Sáenz, C. et al. 2006).**

Los polímeros orgánicos de origen natural presentan por lo general una mínima o nula toxicidad, dado como lo presentan muchos investigadores acerca de la tuna, esto aumenta las alternativas de tratamiento de aguas basadas en la utilización de coagulantes naturales en los procesos de clarificación. **(Rodríguez, J. et al. 2007, citados por Olivero, R. et al., 2014, p. 72).**

2.3.3. ETAPAS DE LA COAGULACIÓN.

El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas (Crapper et al, 2011, p 511)

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- Formación de Compuestos químicos poliméricos.
- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- Adsorción mutua de coloides.

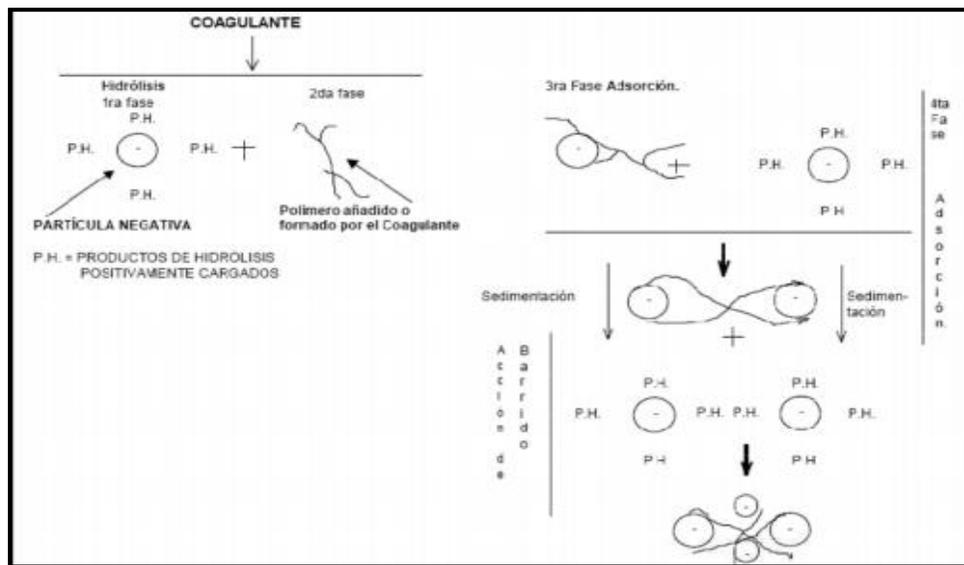


Figura 1. Fases de la coagulación
Fuente: Arboleda (2000).

2.3.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN.

Según (Arboleda.2000). La coagulación es un fenómeno complejo donde intervienen diferentes factores que pueden modificarlo, entre los cuales tenemos:

2.3.4.1. INFLUENCIA DEL PH.

El pH es una variable importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. Si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta. (Bratby.2006, citado por Andía, 2010, p. 16). El rango de pH empleado en este estudio abarcara un rango de 8; 8.5 y 9; tres puntos establecidos, en los que por lo general se trabaja con dos productos químicos (agente coagulante y floculante).

Por lo tanto al emplear un agente natural como coagulante, se pretende que la dosis óptima que se obtiene en el estudio no necesite de valores altos de pH para contrarrestar la acidificación del efluente luego del uso de un producto químico en el tratamiento del agua de sanguaza.

2.3.4.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AGUA.

La variación de la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación.

Una disminución de la temperatura del agua conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un floculo **(Ojeda, 2012)**. En nuestro estudio consideramos una temperatura ambiente, por lo tanto este valor permanecerá constante en los ensayos establecidos.

2.3.4.3. INFLUENCIA DE LA DOSIS DEL COAGULANTE.

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así: Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflóculos es muy escasa, por lo tanto la turbiedad residual es elevada. Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada. **(Bratby.2006, citado por Andía, 2010, p. 17)**.

2.4. DEFINICIÓN DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN

El proceso de floculación logra desestabilizar partículas coloidales, precipitar y agrupar sólidos suspendidos, facilitando la extracción por medio de la formación de flóculos **(Inchausti, et al., 2000, citado por Ramírez, 2011, p.34)**. Este método puede utilizarse en el tratamiento de aguas crudas y residuales. Para la separación de contaminantes es común utilizar el tratamiento químico con coagulantes y floculantes. **(García, 2005, citado por Ramírez, 2011, p.34)**.

2.4.1. FLOCULANTES QUÍMICOS.

Se conoce la eficiencia de los floculantes químicos en el tratamiento de aguas residuales, pero no se ha estudiado exhaustivamente su impacto ambiental ni el riesgo para la salud humana y animal, tampoco se conoce la posible exposición de los monómeros químicos sin reaccionar y los subproductos de estos floculantes en el agua después de su tratamiento. Estos se clasifican de acuerdo a la ionicidad de los polímeros:

- Aniónicos (generalmente copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico).
 - Neutros o no iónicos (poliacrilamidas).
 - Catiónicos (copolímero de acrilamidas + un monómero catiónico).
- (Degremont, 1991).**

2.4.1.1. ACRILAMIDA Y COPOLÍMEROS.

La poliacrilamida es un homopolímero de acrilamida. Puede ser sintetizado en forma de cadena lineal o entrecruzado, e incluso se emplea junto con otros monómeros como el acrilato de sodio para formar distintos copolímeros. La poliacrilamida no es tóxica. Sin embargo, la acrilamida que no ha polimerizado, que es una neurotoxina, puede estar presente en muy pequeñas cantidades en la acrilamida polimerizada, de ahí que sea recomendable su manipulación con precaución. En la forma entrecruzada, la probabilidad de que haya monómero libre es incluso mayor. Absorbe agua fácilmente. **(Daughlon & Christian G, 2010).**

2.4.2. FLOCULANTES NATURALES.

En contraste con los floculantes químicos, los floculantes naturales generalmente se consideran seguros, libres de tóxicos, ecológicos, no corrosivos (lo que reduce la preocupación por desgaste de las tuberías), ahorran dinero en las plantas de tratamiento, ya que generan menor cantidad de lodos metálicos que deban ser tratado y no son necesarios los ajustes de pH post-tratamiento. Son de fácil extracción y no necesitan ser purificados, lo cual ahorra tiempo y dinero. Los taninos son polisacáridos de alto peso molecular, los cuales se han usado extensivamente como floculantes en el tratamiento de aguas residuales industriales y se reporta que son útiles en todos los tipos de aguas residuales. Además, la presencia de alcaloides y flavonoides asociados, pueden tener actividad antimicrobiana. **(Choy et al.2014 & Subramonian et al. 2014 citados por Delgado, 2016, p.18).**

2.4.2.1. ALMIDÓN.

Los almidones presentan una amplia gama de posibilidades, se han realizado varios estudios en los almidones de yuca, maíz y papa, obteniendo grandes porcentajes de remoción de color y turbiedad, mejorando la calidad del efluente e incrementando la velocidad de sedimentación. **(Delgado, 2016, p.21).**

Los polímeros naturales tales como almidón, y celulosa han sido investigados como una alternativa atractiva en los procesos de coagulación-floculación para la remoción de partículas suspendidas y coloidales, y una de las ventajas que presentan es que dichos polímeros naturales y sus derivados son biodegradables; asimismo, su degradación intermedia es inofensiva para el ser humano y el ambiente. Entre los más utilizados se encuentran los polisacáridos extraídos de los almidones de la papa, yuca y maíz. **(Shogren.2009, p.641).**

2.4.3. MECANISMO DE FLOCULACIÓN.

Normalmente, se pueden presentar dos modelos dependiendo del tamaño de las partículas desestabilizadas:

2.4.3.1. *MODELO ORTOCINÉTICO.*

Es inducido por una energía exterior a la masa de agua y puede ser de origen mecánico o hidráulico. Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua. Influyen partículas de tamaño mayor al micrón y tiene relación con el gradiente de velocidad del líquido, el cual se da entre dos partículas separadas que se encuentran en el seno del fluido. **(Quispe, H. 2012).**

2.4.3.2. *MODELO PERICINÉTICO.*

Cuando se dispersa el coagulante en el agua, se necesita de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño inferior a una micra comiencen aglutinarse. Así el movimiento browniano actúa formando el floculo inicial. Y cuando este alcanza el tamaño de una micra, actúa la floculación ortocinética promoviendo su mayor desarrollo. Por lo tanto los dos modelos son complementarios, ya que no se podría tener una buena eficiencia si los dos no interactúan. **(Quispe, H. 2012).**

2.5. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

2.5.1. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.

Se entiende por Sólidos suspendidos totales en suspensión a un parámetro utilizado en la calificación de la calidad del agua y en el tratamiento de aguas residuales. Indica la cantidad de sólidos (medidos habitualmente en miligramos por litro) presentes, en suspensión y que pueden ser separados por medios mecánicos, como por ejemplo la filtración en vacío, o la centrifugación del líquido. Algunas veces se asocia a la turbidez del agua.

La materia en suspensión está compuesta por partículas orgánicas e inorgánicas inmiscibles que se encuentran en el agua. Dentro de las partículas orgánicas tenemos; fibras de plantas, células de algas, bacterias, protozoarios y sólidos biológicos. Por otra parte, arcilla, arena y sales son elementos considerados como partículas inorgánicas. (APHA, 2012).

2.5.2. DUREZA TOTAL.

El término dureza del agua se refiere a la cantidad de sales de calcio y magnesios disueltos en el agua. La dureza del agua se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, expresadas como CaCO_3 en mg/L. El rango de dureza varía entre 0 y cientos de mg/L, dependiendo de la fuente de agua y el tratamiento a que haya sido sometida. (APHA, 2012).

2.5.3. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida. La DBO_5 es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y en general aguas residuales; su aplicación permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores. **(United States Environmental Protection Agency, 2015).**

Las muestras de agua residual o una dilución conveniente de las mismas, se incuban por cinco días a $20^{\circ}C$ en la oscuridad. La disminución de la concentración de oxígeno disuelto (OD), medida por el método Winkler o una modificación del mismo, durante el periodo de incubación, produce una medida de la DBO_5 . **(APHA, 2012).**

2.6. TEST DE PRUEBA DE JARRAS

La coagulación química y la dosificación apropiada de reactivos deben ser seleccionadas por la simulación del paso de clarificación en un laboratorio a escala. La Prueba de Jarras es la que mejor simula la química de la clarificación y la operación llevada a cabo. Un arreglo simple de vasos de precipitado y paletas permite comparar varias combinaciones químicas, las cuales todas están sujetas a condiciones hidráulicas similares. (**American Public Health Association International, 2008**).

Para determinar la dosis óptima de los agentes químicos empleados en el proceso de coagulación-floculación se utiliza un procedimiento de laboratorio conocido como la prueba de jarras, con esta se determina la dosis de agente más efectiva y económica para una intensidad y duración de mezclado particular, y en ella se utiliza una serie de mezcladores rotacionales de escala laboratorio a fin de conseguir el mezclado uniforme de varias muestras simultáneamente, para que sea posible ajustar hasta igualar los gradientes de velocidad a escala de planta para floculación y mezclado rápido. Debido a que la disociación del agente coagulante produce una serie de reacciones en equilibrio químico, su desempeño depende del pH. (**Schulz & Okun, 2000, citados por Solís et al. 2012, p.230**).

2.7. NORMAS PERUANAS DE CONTROL DE EFLUENTES INDUSTRIALES

La **Tabla 4** presenta los límites máximos permisibles para la industria de harina y aceite de pescado emitida por el ministerio de producción (PRODUCE).

Tabla 4: *Límites Máximos Permisibles (LMP) para la Industria de harina y aceite de pescado*

PÁMETROS CONTAMINANT ES	I	II	III	MÈTODO DE ANALISIS	FORMATO
	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE LOS EFLUENTES QUE SERÁN VERTIDOS DENTRO DE LA ZONA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL LITORAL	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE LOS EFLUENTES QUE SERÁN VERTIDOS FUERA DE LA ZONA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL LITORAL	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE LOS EFLUENTES QUE SERÁN VERTIDOS FUERA DE LA ZONA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL LITORAL		
Sólidos suspendidos Totales (SST)	100 mg/l	2.5X10 ³ mg/l	0.70x10 ³ mg/l	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20°. Ed. Part. 25400 Washington	Los valores consisten en el promedio diario de un mínimo de tres muestras de un compuesto según se establece en la Resolución Ministerial N° 003-2002-PE
pH	6 - 9	5 - 9	5 - 9	Protocolo de Monitoreo aprobado por Resolución Ministerial N°003 - 2002 - PE	Los valores consisten en el promedio diario de un mínimo de tres muestras de un compuesto según se establece la Resolución Ministerial N° 003-2002. PE
Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO ₅)	< =60 mg/l			Resolución Ministerial N°003 - 2002 - PE (d)	

FUENTE. Decreto supremo n° 010-2008-PRODUCE.

Un factor determinante que ha permitido al sector Pesquero el adecuado cumplimiento de los LMP de Efluentes es el procesamiento de materia prima de mayor frescura gracias, en gran parte, a la implementación de los Límites Máximos de Captura por Embarcación, aprobados en el 2008 mediante Decreto Legislativo N° 1084, que eliminó la carrera olímpica, y por tanto permite una pesca más planificada, evitando una sobre explotación de los recursos marinos.

Para cumplir los LMP de efluentes las plantas de ingredientes marinos han implementado y plantas de tratamiento, conforme al esquema típico mostrado a continuación:

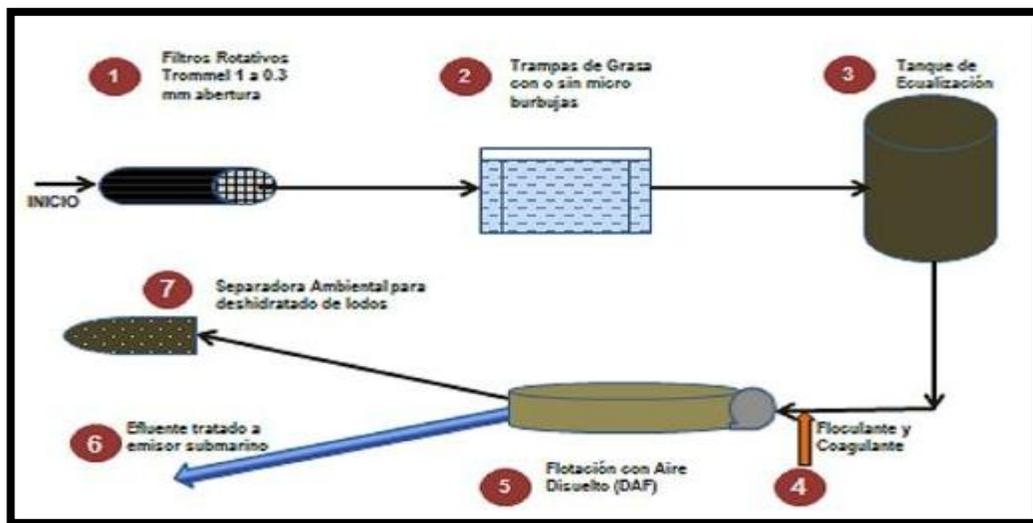


Figura 2. Etapas del proceso de tratamiento de efluentes industriales

Fuente: Seguridad Nacional de Pesquería, 2016

La autoridad competente que fiscaliza los ECA (Estándares de calidad del agua) es la Autoridad Nacional del Agua (ANA), adscrita al sector Agricultura. Las plantas pesqueras gestionan regularmente ante la ANA su Autorización de Vertimientos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

La parte experimental del presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de química inorgánica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional del Santa.

3.2. MATERIAL DE ESTUDIO

Se utilizó agua de sanguaza de una Empresa Pesquera, habiendo pasado por el proceso de remoción de Sólidos (malla 0.5mm) y remoción de aceites y grasas (trampa de grasa).

Empresa Pesquera: Quiaza S.A.C.

3.3. REACTIVOS Y MATERIALES

3.3.1. REACTIVOS.

- Agentes coagulantes: agente coagulante químico (Sulfato de Aluminio)- agente coagulante natural (Mucílago de Opuntia Ficus-Indica).
- Agentes floculantes: agente floculante químico (Poliacrilamida) - agente floculante natural (Almidón de Yuca).
- Ácido sulfúrico (98%).
- Carbonato de calcio al 0.01% en relación peso/volumen.
- Amoníaco (25%).
- Hidróxido de sodio (1M).
- Solución Buffer: pesar 6.8g de cloruro de amonio y agregar a una fiola de 100 ml, agregar 57ml de amoníaco y 5 ml de hidróxido de sodio y aforar.
- Indicador Negro de Eriocromo-T (NET).

- Solución titulante de EDTA 0.01 M: preparación de 1000 ml de solución EDTA a 0.01 M.
- Cloruro de magnesio al 1%.
- Sulfato de manganeso 4M.
- Iodo en solución de ioduro de potasio (I₂/KI).
- Almidón.
- Agua destilada.
- Solución tampón fosfato: pesar 8.5g K₂HPO₄ + 33.4g Na₂HPO₄·7H₂O + 1.7g NH₄Cl; diluir con 1 L de agua destilada. Verificar pH 7.2 +/- 0.1.
- Solución de cloruro de calcio: pesar 27.5g CaCl₂ y diluir con 1 L de agua destilada.
- Sulfato de manganeso: pesar 22.5g MgSO₄·7H₂O y diluir con 1 L de agua destilada.
- Solución de cloruro de hierro: pesar 0.25g de FeCl₂·6H₂O y diluir con 1 L de agua destilada.

3.3.2. MATERIALES.

- Botellas de plástico de 1 L.
- Embudo de membrana filtrante.
- Probetas.
- Papel filtro.
- Soporte de porcelana.
- Guantes.
- Embudos de filtración.
- Espátula de metal.
- Matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- Matraz aforado de 1000 mL.
- Buretas de 25 mL.
- Pipetas aforadas de 10 mL.
- Pipetas graduadas de 1 mL.
- Frascos ámbar de vidrio.
- Vasos winkler de 300ml.
- Varillas de vidrio.
- Cooler.
- 2 Ralladoras de plástico.
- Cuchillos de acero.

3.3.3. EQUIPOS.

- Balanza analítica de precisión 0.1 mg.
- Estufa de secado con convección de aire natural-POL-EKO- SLN 15- acero inoxidable.
- Crónometro.
- Oxímetro (sensor que realiza mediciones de oxígeno disuelto en solución acuosa).
- Reactores adaptado para test de jarras (**anexo 5**)
- Agitador mecánico (**Anexo 5**)

3.4. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron las muestras de agua de sanguaza luego de los procesos de tamizado (mediante un tamiz rotativo giratorio) y remoción de aceites y grasas en una trampa de grasa de una planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa pesquera (Quiaza S.A.C); luego fueron llevadas al laboratorio de química inorgánica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional del Santa para realizar los análisis fisicoquímicos iniciales en términos de Sólidos Suspendidos Totales, Dureza Total y DBO₅; además la obtención de los agentes coagulantes y floculantes (químicos - naturales). Los agentes químicos (Sulfato de aluminio, Poliacrilamida) fueron adquiridos de una distribuidora de productos destinados a este rubro denominado HIDROTECH S.A.C., mientras que los agentes naturales (Mucilago de Tuna Opuntia Ficus Indica y Almidón de yuca) fueron obtenidos siguiendo un procedimiento específico descrito en la metodología de obtención agentes naturales.

Luego para determinar la dosis óptima del diseño; se desarrolló el plan experimental con las combinaciones propuestas y se compararon los resultados obtenidos con los Límites Máximos Permisibles; considerando como variables independientes la concentración de los agentes y el pH, a una velocidad de agitación rápida de 200 rpm por 5 minutos, seguida de una velocidad de agitación lenta de 40 rpm por 20 minutos y un tiempo sedimentación de 1 hora.

Finalmente se seleccionó la dosis óptima del diseño propuesto mediante los análisis de varianza, diagrama de Pareto, gráfica de efectos principales, coeficiente de regresión, superficie de respuesta estimada, optimización de respuesta, gráfico de residuos; por cada variable dependiente, y además se empleó la optimización de múltiples respuestas con las tres variables dependientes integradas para obtener la dosis óptima mediante el programa estadístico Statgraphics Centurión.

3.4.1. VARIABLES.

Tabla 5: Variables del diseño experimental

TIPO DE VARIABLES	VARIABLE	DEFINICIÓN	UNIDADES
Dependientes	Sólidos suspendidos totales	Indica la cantidad de sólidos presentes en suspensión.	mg/L
	Dureza total	Se refiere a la cantidad de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua.	mg CaCO ₃ /L
	Demanda bioquímica de oxígeno	Mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida.	mg O ₂ /L
Independientes	Concentración de agente coagulante	Relación de la masa del agente activo (Sulfato de Aluminio - Mucilago de Tuna Opuntia Ficus Indica) por volumen de solución	g/ml
	Concentración de agente floculante	Relación de la masa del agente activo (Almidón de Yuca Poliacrilamida) por volumen de solución	g/ml
	pH del medio	Coefficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.	

3.4.2. **DISEÑO EXPERIMENTAL.**

Diseño de superficie de respuesta: Un diseño de superficie de respuesta es un conjunto de técnicas avanzadas de diseño de experimentos (DOE) que le ayudan a entender mejor y optimizar la respuesta. La metodología del diseño de superficie de respuesta se utiliza con frecuencia para refinar los modelos después de haber determinado los factores importantes utilizando diseños de cribado o diseños factoriales, esto se realiza cuando no se conocen las variables independientes determinantes que se emplearán en el diseño; para este estudio, estas variables independientes ya han sido definidas de acuerdo a las especificaciones observadas en una planta de tratamiento de efluentes industriales, donde las variables más importantes que se consideraron fueron: la concentración de agente coagulante natural (mucilago de tuna opuntia ficus indica), concentración de agente floculante químico (poliacrilamida) y el pH del agua de sanguaza adaptado, con el fin de evaluar su interacción en una optimización de múltiples respuestas, de esta forma se encontró la dosis óptima del diseño planteado.

Diseños de Box-Behnken: El diseño Box-Behnken consiste de un conjunto de corridas donde cada par de factores es variado entre sus niveles bajo y alto, mientras los demás factores experimentales se fijan en el Diseño de Superficie de Respuesta. Por otra parte los diseños factoriales no permite el análisis de dos o más grupos (niveles) ingresados, por lo que este diseño es ideal para comparar sus interacciones. Son 12 corridas experimentales y 3 puntos centrales repetidos (3 corridas) para un total de 15 ensayos, que permitirán generar la gráfica que relaciona las variables independientes y variables dependientes.

Se emplearon 3 factores (Variables independientes): Concentración de agente coagulante, Concentración de agente floculante y pH del agua de sangüaza adaptado; además 3 variables de respuesta (variables dependientes): Sólidos Suspendidos Totales (mg/L), Dureza Total (mg CaCO₃/L) y DBO₅ (mg O₂/L).

Tabla 6: *Niveles del diseño experimental*

Variable	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
Concentración de agente coagulante	2	4	6
Concentración de agente floculante	0.1	0.3	0.5
pH	8	8.5	9

Tabla 7: *Diseño experimental-Box - Behken.*

Concentración agente coagulante g/100 mL agua destilada	Concentración agente floculante g/100 mL agua destilada	pH
1	-1	0
-1	1	0
1	1	0
0	1	1
1	0	1
0	-1	1
0	0	0
0	1	-1
0	0	0
0	-1	-1
-1	0	-1
-1	-1	0
0	0	0
-1	0	1
1	0	-1

Nota: *1=nivel alto; 0=nivel medio; -1=nivel bajo.*

3.4.3. RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE AGUA DE SANGUAZA.

El primer paso fue la recolección de muestras de agua de sanguaza de una empresa pesquera (Quiaza S.A.C.), estas muestras pasaron previamente por un proceso de cribado en un tamiz rotativo giratorio, denominado también tromel (tamiz de 0.5 mm), posteriormente paso a una trampa de grasa donde mediante discos difusores de aire ubicadas en el fondo del contenedor, eyectaban burbujas de aire contribuyendo a la separación de aceites y grasas del efluente, generando espuma en la superficie de la trampa de grasa que fue removida por paletas giratorias hacia un nuevo contenedor, luego el efluente es destinado a un tanque ecualizador (tanque contenedor donde se regula el pH del agua de sanguaza adicionando hidróxido de sodio), de donde tomamos la muestra. Posteriormente estas muestras de agua de sanguaza fueron refrigeradas, con un Icepack dentro del cooler, en el que se colocaron las muestras, y se trasladaron al Laboratorio de Química Inorgánica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional del Santa. (Anexo 1).

3.4.4. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE SANGUAZA EN TÉRMINOS DE PARÁMETROS FÍSICO – QUÍMICOS. (SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES, DUREZA TOTAL Y DBO₅).

Una vez tomada la muestra se conservó en refrigeración a 4 °C. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis fue de 2 días. Se realizó la caracterización con el fin de obtener datos iniciales que permitan comparar el efecto de ambos agentes sobre el tratamiento químico del agua de sanguaza en términos de sólidos suspendidos totales, dureza total y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

3.4.5. OBTENCIÓN DE LOS AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES QUÍMICOS.

Los productos químicos fueron obtenidos de una distribuidora comercial HIDROTECH.

- Agente coagulante (CHEMIFLOX-600.) Formulado a base de sulfato de aluminio, estabilizados y potenciado con agentes reguladores de pH). Malla N° 16, abertura 1.18mm.
- Agente floculante (HIDROFLOX-900). Producto solido floculante, es un polímero aniónico de acrilamida. Malla N° 16, abertura 1.18mm. (Anexo 2)

3.4.6. OBTENCIÓN DE LOS AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES NATURALES.

Los productos naturales:

- Agente coagulantes (mucilago de Tuna Opuntia ficus-Indica). Malla N° 15, abertura 1.30mm.
- Agente floculante (Almidón de yuca). Malla N° 15, abertura 1.30mm.

Fueron obtenidos siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

3.4.6.1. OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA.

La metodología utilizada para la extracción del almidón de yuca fue la aplicada por **Hernández – Medina, (2008)**.

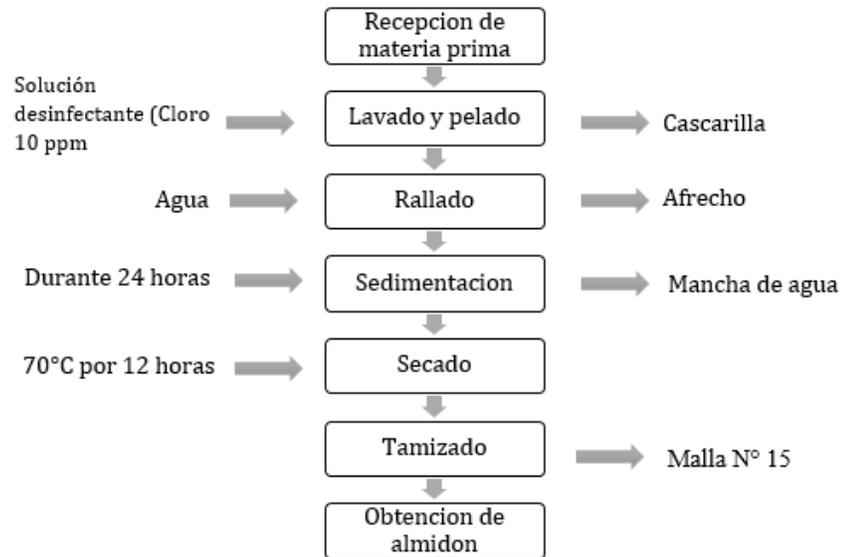


Figura 3. Diagrama para la obtención de almidón de yuca.

La yuca de variedad Motelo rumo, fue obtenida del mercado “La perla”, localizado en la ciudad de Chimbote.

Luego se realizó el lavado y pelado de las yucas, en esta etapa se eliminó la tierra y las impurezas adheridas a las raíces. Se lavó con agua potable y luego se hizo una inmersión en una solución desinfectante de cloro activo a 10 ppm, durante 5 a 10 min. Después se realizó el rallado el cual fue de forma manual mediante el uso de rayadoras de acero inoxidable, en esta etapa se liberaron los gránulos de almidón contenidos en las células de las raíces de la yuca. Seguidamente se realizó la sedimentación con el fin de separar los gránulos de almidón de su suspensión en agua durante un día. Posteriormente se realizó el secado el cual fue en un secador de bandejas

(70°C por 12 horas), con convección de aire natural-POL-EKO- SLN 15- acero inoxidable para remover la humedad del almidón hasta un 12-13%. Finalmente se realizó el tamizado en una malla N°15 con una abertura de 1.30 mm. (Anexo 3).

3.4.6.2. OBTENCIÓN DEL MUCILAGO DE LA TUNA (OPUNTIA FICUS INDICA).

La metodología utilizada para la extracción del almidón de yuca fue la aplicada por **Rodríguez-Gonzales, (2010)**.

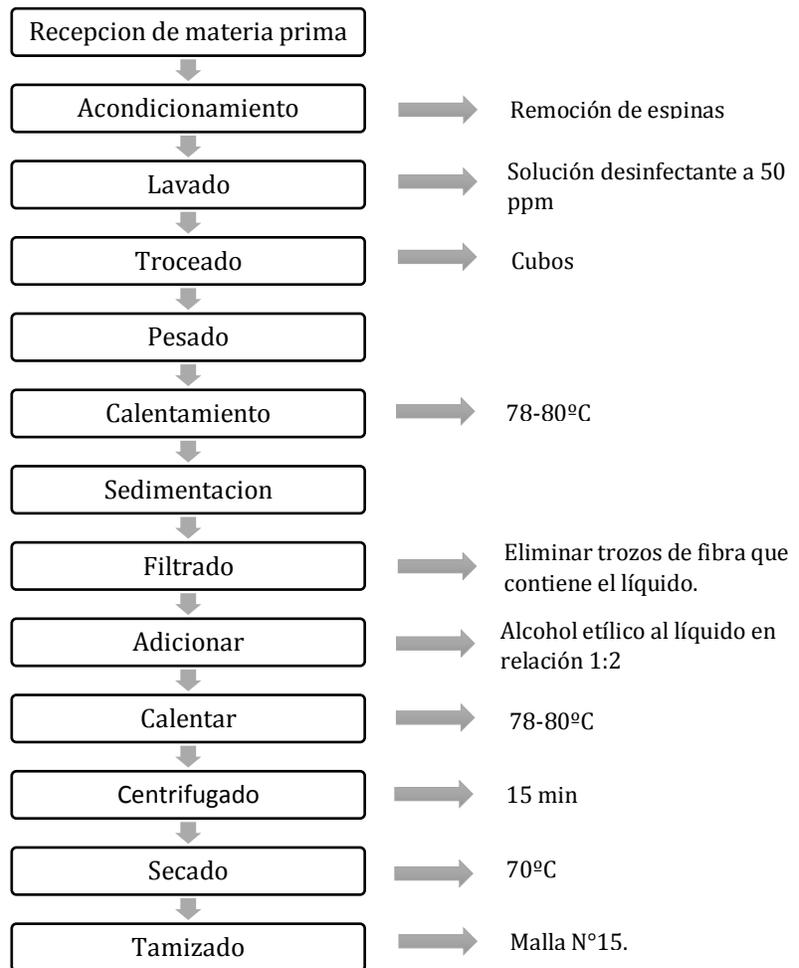


Figura 4. Obtención del mucilago tuna opuntia ficus

Se retiraron las espinas del nopal seguido de un lavado, luego se procedió a trocearlo con cuchillos de acero inoxidable para tener una mayor superficie de contacto y llegar a obtener más mucilago; después se pesó el nopal triturado para poder añadir la cantidad adecuada de agua en relación 1:2, luego fue sometido a un calentamiento con agua caliente a 78-80°C por alrededor de 1 hora, una vez pasada la hora, se dejó reposar para que los sólidos se sedimenten luego se decantó el líquido que contiene el mucilago; posteriormente se filtró para poder eliminar los trozos de fibra más pequeños que contiene el líquido, se obtuvieron las fibras del nopal y un líquido turbio que contiene el mucilago, al líquido se le agregó alcohol etílico en relación 1:2, para separar el mucilago ya que este no es soluble en agua y se concentra a 78-80°C, una vez que se concentró el líquido con el mucilago, se colocó en tubos de ensayo, con el fin de acelerar el proceso, se centrifugo el líquido (15min), después de centrifugar se decantó el líquido y se secó el mucilago en una estufa a 70°C. Finalmente se realizó el tamizado en una malla N°15 con una abertura de 1.30 mm (Anexo 4).

3.4.7. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO.

Se disolvió la concentración propuesta para cada ensayo (2%,4%, y 6%), según la matriz de experimentos (Tabla 1), es decir 2g de sulfato de aluminio/100 ml de agua destilada, 4g de sulfato de aluminio/100 ml de agua destilada y 6g de sulfato de aluminio/100 ml de agua destilada.

La disolución se hizo lentamente en un vaso de precipitado para evitar la formación de grumos, ayudados de una bagueta hasta obtener una solución homogénea.

3.4.8. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA.

Se disolvió la concentración propuesta para cada ensayo (0.1%,0.3%, y 0.5%), según la matriz de experimentos (Tabla 1), es decir 0.1g de almidón de yuca/100 ml de agua destilada, 0.3g de almidón de yuca/100 ml de agua destilada y 0.5g de almidón de yuca/100 ml de agua destilada.

La disolución se hizo lentamente en un vaso de precipitado para evitar la formación de grumos, ayudados de una bagueta hasta obtener una solución homogénea.

**3.4.9. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DEL MUCÍLAGO DE TUNA
OPUNTIA FICUS-INDICA.**

Se disolvió la concentración propuesta para cada ensayo (2%,4%, y 6%), según la matriz de experimentos (Tabla 1), es decir 2g de mucílago/100 ml de agua destilada, 4g de mucílago/100 ml de agua destilada y 6g de mucilago/100 ml de agua destilada.

La disolución se hizo lentamente en un vaso de precipitado para evitar la formación de grumos, ayudados de una bagueta hasta obtener una solución homogénea.

3.4.10. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE POLIACRILAMIDA.

Se disolvió la concentración propuesta para cada ensayo (0.1%,0.3%, y 0.5%), según la matriz de experimentos (Tabla 1), es decir 0.1g de poliacrilamida/100 ml de agua destilada, 0.3g de poliacrilamida/100 ml de agua destilada y 0.5g de poliacrilamida/100 ml de agua destilada.

La disolución se hizo lentamente en un vaso de precipitado para evitar la formación de grumos, ayudados de una bagueta hasta obtener una solución homogénea.

3.4.11. TEST DE JARRAS.

Los ensayos de coagulación y floculación se realizaron en un agitador mecánico adaptado, para simular el procedimiento estándar de la prueba de jarras, de acuerdo con el procedimiento establecido por **American Society for Testing and Materials (2008)**. Se realizó una adaptación a la prueba de jarras debido a que el laboratorio no cuenta con el equipo (Ver anexo 5). En la muestra de agua de sanguaza, se determinó SST, dureza total, DBO₅. El pH debe estar comprendido entre 8 y 9; para ello se ajustó con NaOH al 0.1N.

- Se adiciono 1L de agua residual de sanguaza al equipo reactor adaptado.
- Regulamos el pH del medio, según el ensayo del diseño experimental.
- Se adiciono 10 mL de la concentración del agente coagulante (según el ensayo del diseño experimental).
- Se encendió el agitador y se ajustó a velocidades de agitación rápida de 200 rpm por un tiempo de 5 minutos.
- Luego se adiciono 10 ml de la concentración del agente floculante (según el ensayo del diseño experimental). E inmediatamente se redujo la velocidad de agitación a 40 rpm por un periodo de un tiempo de 20 minutos, para mantener uniformemente suspendidas las partículas del floculo durante el periodo de agitación lenta.
- Una vez transcurrido el periodo de agitación, se apagó el agitador y se dejó sedimentar por 1 hora, haciendo las observaciones visuales necesarias como son la sedimentación completa de los flóculos, cabe mencionar que la norma ASTM D2035-08 sugiere 1 hora de sedimentación.

3.4.12. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).

Los sólidos suspendidos totales son los materiales retenidos por un filtro estándar de fibra de vidrio y secado a 115 °C.

La muestra se recolecto en botellas de plástico de 1 L de capacidad. Y se refrigero a 4°C. Se analizó antes de 24 horas, como máximo 2 días de realizado el muestreo. A continuación de muestra el procedimiento. (Anexo 5).

a) ANÁLISIS DE SOLIDOS TOTALES

Se empleó 50 ml de muestra (agua residual de sanguaza); previamente agitada luego se adiciono el volumen medido a un vaso de precipitación de 50 ml. Después lo colocamos a una estufa a 115°C hasta sequedad luego se realiza el pesado del vaso de precipitado y finalmente se reportó el valor en ppm de solidos totales (mg/L).

b) SÓLIDOS DISUELTOS

Se filtró la muestra y del filtrado se midió 50 ml y se colocó en el vaso de precipitado de 50 ml. Hallamos los sólidos disueltos reemplazando los valores obtenidos en la **Ecuación 1**.

$$ppm \text{ Solidos Totales} = \frac{(W_2 - W_1)}{50ml} \times \frac{1000ml}{1g} \times \frac{1000ml}{1L}$$

Ecuación 1: Determinación de solidos disueltos

Donde:

$$W_1 = \text{peso del vaso seco}$$

$$W_2 = \text{peso vaso + muestra seca}$$

$$V = 50ml.$$

c) SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Finalmente para hallar los sólidos suspendidos totales, reemplazamos los valores obtenidos en la **Ecuación 2**.

$$\text{Solidos Suspendidos Totales} = \text{Solidos totales} - \text{Solidos disueltos}$$

Ecuación 2: Determinación de SST

Dónde:

SST = sólidos suspendidos totales en mg/L.

FUENTE: APHA, 1992.

3.4.13. DETERMINACIÓN DE DUREZA TOTAL: MÉTODO VOLUMÉTRICO CON EDTA.

La dureza total se define como la suma de concentración de iones de calcio y magnesio, expresados como carbonato de calcio, en mg/L. A continuación de muestra el procedimiento de la determinación de la dureza total. (Anexo 6)

a) PREPARACIÓN DEL EDTA

El siguiente procedimiento fue para la preparación de 250 ml de solución EDTA 0.01 M.

El cálculo del peso del EDTA se realizó de la siguiente manera:

$$W = M * PM * V$$

Ecuación 3: Determinación del peso del EDTA

Luego se realizó el reemplazo de la formula y obtuvimos lo siguiente:

$$W = 0.01 * 372.24 * 1$$

$$W = 3.72 \text{ g de EDTA}$$

Entonces se disolvió 3.72 g de EDTA en agua destilada. Y luego se aforo a 1000 ml en una fiola.

b) VALORACIÓN DEL EDTA

Se midió 25 ml de agua de sanguaza en un matraz Erlenmeyer.

Se midió 25 ml de patrón primario (carbonato de calcio) al 0.01% en relación peso/volumen). Se agregó esta mezcla al matraz Erlenmeyer que contiene el agua de sanguaza.

c) Luego se agregó al 2 gotas de cloruro de magnesio (MgCl_2 , 1%).

d) Después se adiciono 10 ml de buffer (pH=10), al mismo matraz Erlenmeyer.

Preparación del buffer: Se pesó 6.8 g de cloruro de amonio + 57 ml de amoniac + 2 pellets de hidróxido de sodio, esta mezcla se llevó a una fiola de 100 ml y se aforo.

e) Se adiciono indicador NeT (Negro de eriocromo T), en el matraz que contiene al agua residual de sanguaza.

f) Se tituló con el EDTA, de un color granate hasta un color azul vino.

g) Finalmente se anotó el gasto y se reemplazó en la formula.

$$Dureza(ppm) = \frac{1000 \times M \times G}{V_1}$$

Ecuación 4: Determinación de mg CaCO₃

Dónde:

M: molaridad del EDTA utilizado como titulante (0.0167 mol/L).

V₁: volumen de muestra (agua residual de sanguaza).

G: gasto de la solución de EDTA consumidos en su titulación.

FUENTE: APHA, 1992.

3.4.14. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) corresponde a la cantidad de oxígeno consumido para la degradación bioquímica de la materia orgánica contenida en la muestra, durante un intervalo de tiempo específico y a una temperatura determinada. La muestra fue incubada por 5 días a 20°C en la oscuridad. Se midió la concentración de oxígeno disuelto antes y después de la incubación, y el consumo de oxígeno corresponde a la demanda bioquímica de oxígeno. El procedimiento fue el siguiente:

a) PREPARACIÓN DEL AGUA DE DILUCIÓN:

Se preparó a partir de agua destilada agregando en una fiola de 1 L, las siguientes sustancias: 1 ml de solución tampón fosfato, 1 ml de solución de sulfato de manganeso, 1 ml de solución de cloruro de calcio y un 1 ml de solución de cloruro de hierro.

Esta solución se mantuvo a 20 °C y fue aireada (utilizando una bomba de acuario) para evitar toda contaminación por metales, materias orgánicas, oxidantes o reductoras. Se dejó en reposo durante 12 horas manteniendo el recipiente destapado.

b) DILUCIÓN DE LAS MUESTRAS:

Se agregó la muestra de agua de sanguaza en el vaso winkler y se enjuago con la muestra 3 veces (previo almacenamiento por 24 horas a 4°C); luego se agregó 20 ml de agua residual de sanguaza (se tomó una alícuota de 20 ml) y se completó totalmente el vaso winkler con el agua de dilución, verificando que no haya burbujas en el contenedor. Luego se agregó 1 ml de sulfato de manganeso 4% (se realizó una espera de 5 minutos para que se homogenice). Después se agregó 1 ml de iodo en solución de ioduro de potasio I₂/KI (se realizó una espera de 5 minutos para que se homogenice). Posteriormente se agregó 1 ml de H₂SO₄. Luego se cerró el frasco y se homogenizo y se guardó el frasco en un lugar oscuro por 30 minutos, para evitar la alteración de la muestra por la luz solar (producción de O₂ por la fotosíntesis de micro algas). Pasado los 30 minutos se tomó 50 ml del frasco almacenado y se adiciono a un matraz Erlenmeyer de 250 ml. Al cual se le agrego 1 ml de indicador (almidón).

Posteriormente se realizó la lectura de oxígeno disuelto con el oxhmetro (sensor que efectúa mediciones de oxígeno en solución acuosa). Finalmente se llevó el frasco (vaso winkler previamente titulado), OD₅ a una incubación durante 5 días.

Al pasado de los 5 días se hizo la lectura de la muestra. Y se reemplazaron los resultados en la siguiente formula:

$$DBO_{5\text{mg/L}} = \frac{(OD_i - OD_f)}{Fd}$$

Ecuación 5: Determinación de DBO₅ (Demanda Bioquímica de oxígeno)

Dónde:

ODi = Concentración de oxígeno disuelto inicial (medido luego de la dilución).

ODf = Concentración de oxígeno disuelto final (luego de 5 días).

Fd = Factor de dilución.

Fd = alícuota (20ml)/volumen total (300ml).

FUENTE: APHA, 1992.

Tabla 8: Alícuotas de muestra para determinación de BDO₅

Alícuota de muestra para botella de 300 ml (ml)	Intervalos de valores de DBO ₅ (mg/L)
0.05	12 000 – 42 000
0.1	6 000 – 21 000
0.2	3 000 – 10 500
0.5	1 200 – 4 200
1	600 – 2 100
2	300 - 1 050
5	120 - 420
10	60 - 210
20	30 -105

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. OBTENCIÓN DE LOS AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES NATURALES

En contraste con los agentes químicos, los agentes naturales se consideran seguros, libres de tóxicos, ecológicos, no corrosivos (lo que reduce la preocupación por desgaste de las tuberías), ya que generan menor cantidad de lodos metálicos que deban ser tratado y no son necesarios los ajustes de pH post-tratamiento.

Existen muchas ventajas al utilizar coagulantes naturales para el proceso de clarificación del agua. Estas sustancias son consumibles (**Esquivel, 2004, p.217**); por tal razón su presencia en el efluente no genera un riesgo tóxico para el ser humano.

4.1.1. OBTENCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA.

Según (**Reina C.et al, 1996, p .120**), “se deduce que de 1 kg de yuca se debe obtener 146 g de almidón como mínimo, ya que la yuca tiene más contenido de este carbohidrato en comparación de otros tubérculos así como la papa”, a comparación de lo realizado en este trabajo, se obtuvo un promedio de 164 g por 1 kg de yuca.

Tabla 9: *Composición química proximal (P/P)*

Composición proximal	
Humedad %	9.48
Proteínas %	0.06
Grasas %	0.20
Cenizas %	0.29
Carbohidratos %	89.55

FUENTE. Hernández – Medina (2008).

En la tabla 9, se observa la composición química proximal del almidón de yuca obtenido.

El almidón de yuca, cumple la función de floculante natural, haciendo que los sólidos en suspensión decanten además contribuyen a la sedimentación de los minerales pesados. El porcentaje de carbohidratos (almidón) elevado permite generar a través de cadenas integradas por sus componentes como la amilosa y la amilopectina, sirviendo como puentes entre las partículas coloidales, provocando que aumenten el diámetro de los flóculos y con ello su densidad para acelerar su proceso de sedimentación.

4.1.2. OBTENCIÓN DE MUCÍLAGO DE LA TUNA; NOMBRE CIENTÍFICO (OPUNTIA FICUS-INDICA).

Las condiciones óptimas para la extracción del mucílago fueron: relación de pencas/agua de 1:2 (w/v) con un tiempo de calentamiento de 1 h a $80\pm 2^{\circ}\text{C}$, una relación de mucílago/etanol de 1:2 (v/v). El método para la extracción de mucílago considerando su mayor rendimiento; consistió en: limpieza inicial del nopal, pelado y eliminado de espinas, cortado en cuadros de 2 cm, para posteriormente ser molido con agua 1:2 (w/v), y calentado a $80\pm 2^{\circ}\text{C}/1$ h, y finalmente se precipitó con etanol al 96%, realizando un movimiento circular con un contenedor que recolectaba el mucílago separado. Obteniéndose 95 gr por 1kg de pencas.

Tabla 10: *Composición proximal – mucilago de tuna opuntia ficus en polvo (P/P)*

Composición proximal	
Humedad %	9.31
Proteínas %	6.48
Grasas %	0.025
Cenizas %	10.88
Carbohidratos %	14
Fibra %	59.305

FUENTE. Rodríguez-Gonzales et al. (2010).

En la tabla 10, se observa la composición química proximal del mucilago de tuna opuntia ficus indica en polvo obtenido.

Es el elevado contenido de carbohidratos lo que contribuye en la coagulación. Esto es señalado por (**Chun-Yang 2010, p.46**) y se le atribuye el poder coagulante a los compuestos alginicos derivados del almidón presente en la planta. Además de sus propiedades de viscosidad. (**Arboleda, 1992, p.72**).

Los taninos presentes en la tuna son polisacáridos de alto peso molecular, los cuales se han usado extensivamente como floculantes en el tratamiento de aguas residuales industriales. Además, la presencia de alcaloides y flavonoides asociados, pueden tener actividad antimicrobiana, además de diversas actividades biológicas (**Guzmán, 2013, p.255**).

Además posee la capacidad de generar redes moleculares y retener fuertemente grandes cantidades de agua, (**Ruiz & Guerrero, 2009, p 22**), así como de modificar propiedades como viscosidad, elasticidad, textura, retención de agua.

4.2. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE SANGUAZA

La muestra se obtuvo luego del paso del agua residual por el proceso de remoción de sólidos (tromel), y remoción de espuma (aceites y grasas) mediante la trampa de grasa del tratamiento de efluentes.

Tabla 11: *Características efluente - sanguaza*

TEST	Agua residual (sanguaza)
SST (mg/L)	214 ± 1.4
Dureza Total (mg CaCO ₃ /L)	15 ± 0.8
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	146 ± 2.6
pH	6.52 ± 0.3

La tabla 11 muestra los resultados iniciales de la caracterización del agua de sanguaza, se observan valores registrados del efluente antes de ingresar al tanque equalizador donde se adapta el pH del medio para realizar un mejor tratamiento y luego continua con el proceso de coagulación y floculación, procesos que hemos simulado en el laboratorio. Por lo expuesto la dosificación de los agentes mencionados conformó una parte del tratamiento de efluentes.

4.3. COMBINACIÓN 1

- Agente Coagulante: Sulfato de aluminio.
- Agente Floculante: Almidón de yuca.

A: VARIABLES INDEPENDIENTES

A₁: Concentración de agente coagulante (gramos de agente/100 mL de agua destilada).

A₂: Concentración de agente floculante (gramos de agente/100 mL de agua destilada).

A₃: pH ajustado (muestra de agua de sanguaza).

B: VARIABLES DEPENDIENTES

B₁: Sólidos suspendidos totales (mg/L)

B₂: Dureza Total (mg CaCO₃/L)

B₃: Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O₂ /L)

C: PARÁMETROS ESTABLES

Temperatura de trabajo: 24 °C (ambiente).

Velocidad de agitación rápida de 200 rpm por 5 minutos, seguida de una velocidad de agitación lenta de 40 rpm por 20 minutos y un tiempo sedimentación de 1 hora.

Volumen de la muestra: 1 L.

Tabla 12: Resultados de la primera combinación.

	Variable independiente	Variable independiente	Variable independiente	Variable dependiente	Variable dependiente	Variable dependiente
Ensayos	Concentración agente coagulante (g/100 mL agua destilada)	Concentración agente floculante (g/100 mL agua destilada)	pH	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Dureza total mg (CaCO ₃ /L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)
1	6	0.1	8.5	125 ± 2.88	9.96 ± 0.03	78 ± 2.12
2	2	0.5	8.5	135 ± 3.53	10.32 ± 0.01	81 ± 1.73
3	6	0.5	8.5	145 ± 2.88	9.80 ± 0.02	75 ± 1.73
4	4	0.5	9	115 ± 2.88	9.36 ± 0.02	72 ± 1.73
5	6	0.3	9	130 ± 3.53	9.96 ± 0.01	78 ± 2.12
6	4	0.1	9	125 ± 3.53	9.64 ± 0.03	75 ± 1.73
7	4	0.3	8.5	120 ± 3.53	9.52 ± 0.02	72 ± 2.12
8	4	0.5	8	115 ± 2.88	9.32 ± 0.01	72 ± 2.12
9	4	0.3	8.5	120 ± 2.88	9.47 ± 0.04	75 ± 2.12
10	4	0.1	8	125 ± 2.88	9.64 ± 0.02	78 ± 1.73
11	2	0.3	8	150 ± 3.53	11.36 ± 0.03	90 ± 1.73
12	2	0.1	8.5	155 ± 3.53	11.68 ± 0.01	102 ± 2.12
13	4	0.3	8.5	120 ± 2.88	9.48 ± 0.02	75 ± 1.73
14	2	0.3	9	145 ± 3.53	10.76 ± 0.03	87 ± 2.12
15	6	0.3	8	125 ± 3.53	9.32 ± 0.02	78 ± 1.73

La **Tabla 13** presenta los resultados de los pH iniciales y finales de los ensayos de la primera combinación.

Tabla 13: *pH iniciales y finales de los ensayos-primera combinación.*

Ensayos	pH inicial (Efluente a tratar)	pH final (Efluente tratado)
1	8.5	8.35
2	8.5	8.38
3	8.5	8.34
4	9	8.92
5	9	8.89
6	9	8.94
7	8.5	8.39
8	8	7.90
9	8.5	8.42
10	8	7.89
11	8	7.92
12	8.5	8.44
13	8.5	8.45
14	9	8.90
15	8	7.89

El almidón tiene carga negativa, y el pH bajo implica carga positiva de los sitios superficiales, favoreciendo la adsorción del almidón. (Dogu & Arol, 2004, p.260). A altos pH, los sitios superficiales tienen carga negativa, degradando la adsorción del almidón. Sin embargo, el almidón puede presentar afinidad específica hacia ciertos minerales, en cuyo caso el efecto del pH es despreciable y se puede considerar un pH alto. Una concentración muy alta de almidón puede degradar la efectividad de la floculación. Esto se debe a que en este caso el almidón cubre completamente las superficies de las partículas previniendo la formación de puentes entre ellas, por lo que es importante el encontrar la dosis óptima que evite los problemas descritos por aplicación de concentraciones muy altas de un agente.

El sulfato de aluminio es un coagulante metálico, muy sensible al pH y a la alcalinidad; si el pH no está en un rango adecuado es posible que se solubilice el aluminio, esto incrementa la conductividad eléctrica y la reducción del pH en la muestra (**Hernández et al., 2013, 2**).

4.3.1. ANÁLISIS DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.

Para el desarrollo del análisis de sólidos suspendidos totales, presentes en el agua residual de sanguaza luego del tratamiento con la primera combinación, se emplearon los siguientes análisis

4.3.1.1. ANÁLISIS DE VARIANZA.

El análisis de varianza permite determinar si la media de la variable respuesta varía en diferentes niveles de cada factor experimental. El programa Statgraphics, nos permite realizar el análisis de los datos de un experimento con un factor. A continuación en la **Tabla 14**, se muestra al análisis de varianza para SST de la primera combinación.

Tabla 14: *Análisis de varianza para SST- primera combinación.*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	450.0	1	450.0	22.50	0.0051
B:Concentración agente floculante	50.0	1	50.0	2.50	0.1747
C:pH	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AA	1298.08	1	1298.08	64.90	0.0005
AB	400.0	1	400.0	20.00	0.0066
AC	25.0	1	25.0	1.25	0.3144
BB	5.76923	1	5.76923	0.29	0.6142
BC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CC	5.76923	1	5.76923	0.29	0.6142
Error total	100.0	5	20.0		
Total (corr.)	2350.0	14			

R-cuadrada = **95.75** %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = **88.09** %

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Sólidos suspendidos totales en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

En este caso, 3 efectos (concentración del agente coagulante, grupo AA y grupo AB), tienen una valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

Se realiza un ajuste a la tabla 14 para mostrar los tres factores significantes para este análisis, obteniendo así la Tabla 15.

Tabla 15: *Análisis de varianza ajustado para SST-primera combinación.*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón -F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	450.0	1	450.0	26.40	0.0003
AA	1312.5	1	1312.5	77.00	0.0000
AB	400.0	1	400.0	23.47	0.0005
Error total	187.5	11	17.0455		
Total (corr.)	2350.0	14			

R-cuadrada = 92.02 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 89.85 %

Interpretación: La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Sólidos suspendidos totales en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

4.3.1.2. DIAGRAMA DE PARETO-SST-PRIMERA COMBINACIÓN.

La Figura 5, muestra el diagrama de Pareto de los sólidos suspendidos totales para la primera combinación.

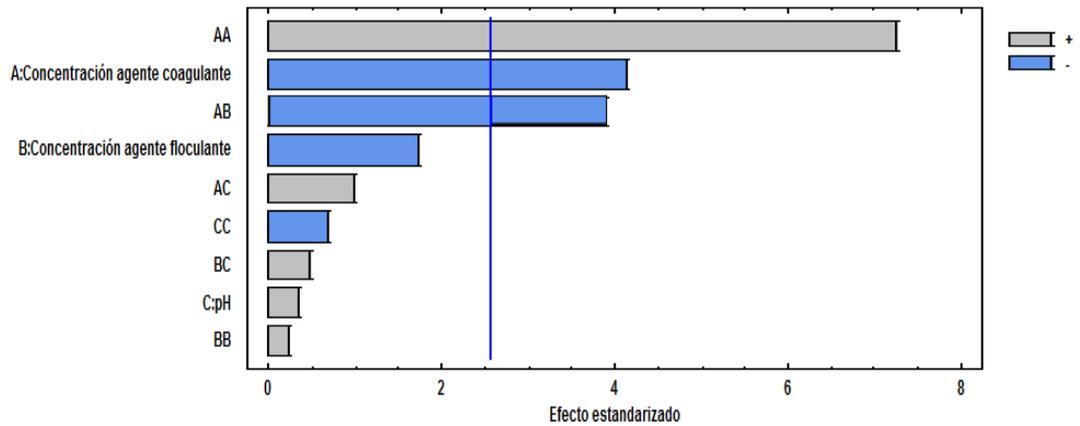


Figura 5. Diagrama de Pareto – SST – primera combinación.

INTERPRETACIÓN: Se observan las variables y grupos significativos, son aquellas que pasan la línea que separa el grado de significancia, los que la superan en este caso es la concentración del agente coagulante, el grupo AA y el grupo AB.

4.3.1.3. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES-SST-PRIMERA COMBINACIÓN.

La **Figura 6** muestra la gráfica de efectos principales de los sólidos suspendidos totales para la primera combinación.

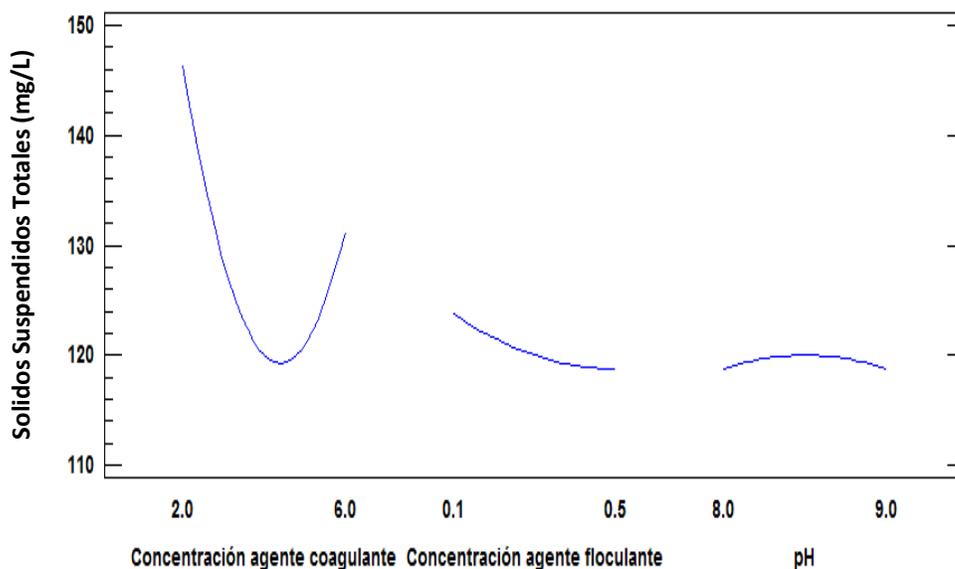


Figura 6. Efectos principales - SST- Primera combinación.

INTERPRETACIÓN: Se observa una mejor respuesta de remoción de SST respecto al aumento de la concentración del agente coagulante, no obstante en concentraciones altas del agente coagulante, se observa un descenso de la acción removedora de turbidez debido al exceso de los agentes preparadas en la solución estándar, provocando que en el efluente se generen flóculos de menor diámetro, , debido a que los flóculos generados no alcanzan el diámetro esperado (comprendida entre $0,4 \mu\text{m}$ y $2 \mu\text{m}$), para que sedimenten en un periodo de tiempo asignado.

La efectividad de la floculación mejora con el peso molecular del polímero, ya que esto implica la formación de flóculos más largos. Sin embargo, una concentración muy alta de polímero puede degradar la floculación porque en este caso cada molécula de polímero se pega sobre una sola partícula, de modo que no se forman los puentes. (Ebeling et.al. 2005, p.235).

4.3.1.4. COEFICIENTE DE REGRESIÓN-SST-PRIMERA COMBINACIÓN.

La **Tabla 16**, muestra los coeficientes de regresión de los sólidos suspendidos totales para la primera combinación.

Tabla 16: *Coefficientes de regresión – SST- primera combinación.*

<i>Coefficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	240.0
A:Concentración agente coagulante	-48.75
B:Concentración agente floculante	-100.0
AA	4.6875
AB	25

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. Según los resultados presentados en la tabla 15, la ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Sólidos suspendidos totales} = 240.0 - 48.75 * \text{Concentración agente coagulante} - 100.0 * \text{Concentración agente floculante} + 4.6875 * \text{Concentración agente coagulante}^2 + 25.0 * \text{Concentración agente coagulante} * \text{Concentración agente floculante}$$

4.3.1.5. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA-SST-PRIMERA COMBINACIÓN.

La **Tabla 17**, muestra la superficie de respuesta estimada de los sólidos suspendidos totales para la primera combinación.

Tabla 17: *Resultados Estimados para SST- primera combinación.*

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95.0% para Media</i>	<i>Superior 95.0% para Media</i>
1	125.0	121.25	114.824	127.676
2	135.0	136.25	129.824	142.676
3	145.0	141.25	134.824	147.676
4	115.0	120.0	116.565	123.435
5	130.0	131.25	126.706	135.794
6	125.0	120.0	116.565	123.435
7	120.0	120.0	116.565	123.435
8	115.0	120.0	116.565	123.435
9	120.0	120.0	116.565	123.435
10	125.0	120.0	116.565	123.435
11	150.0	146.25	141.706	150.794
12	155.0	156.25	149.824	162.676
13	120.0	120.0	116.565	123.435
14	145.0	146.25	141.706	150.794
15	125.0	131.25	126.706	135.794

INTERPRETACION: En la tabla 17, se observan los valores obtenidos experimentalmente en la columna de valores observados y en la siguiente se observa los valores calculados por la ecuación de regresión descrita con los valores significativos obtenidos en el análisis de varianza , además de calcular los límites superior e inferior del mismo.

La **Figura 7**, muestra la superficie de respuesta estimados de los sólidos suspendidos totales para la primera combinación.

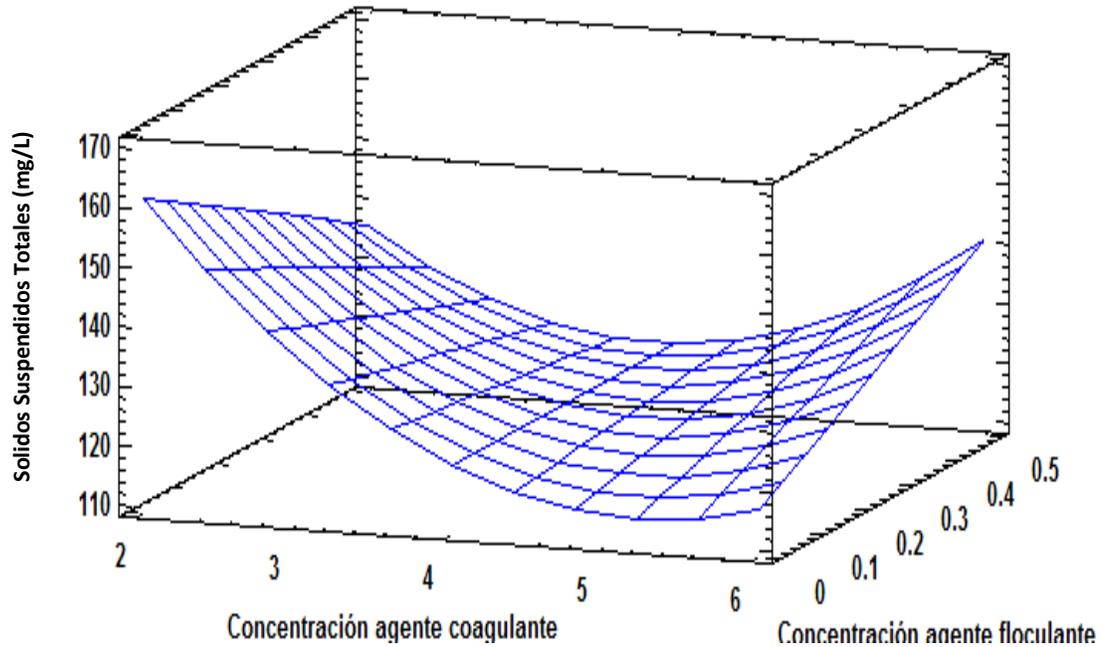


Figura 7.Superficie de respuesta estimados – SST

INTERPRETACIÓN: Se observa una mayor remoción de los SST empleando como límite concentraciones de agente coagulante de 4.93% y floculante de 0.1%, ya que al aumentar dichas concentraciones se produce un descenso en la remoción de SST y en el caso del agente floculante no genera algún beneficio emplear una mayor concentración. El pH óptimo es de 8.73.

**4.3.1.6. OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA – SÓLIDOS SUSPENDIDOS
TOTALES - PRIMERA COMBINACIÓN.**

Meta: minimizar Sólidos suspendidos totales

Valor óptimo = 115.92

La **Tabla 18**, muestra la optimización de respuesta de los sólidos suspendidos totales para la primera combinación.

Tabla 18: *Optimización de respuesta – primera combinación.*

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Concentración agente coagulante	2.0	6.0	4.93
Concentración agente floculante	0.1	0.5	0.1
pH	8.0	9.0	8.73

Esta tabla, muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual minimiza SST sobre la región indicada, los valores altos y bajos planteados para cada factor y el óptimo obtenido a través de los ensayos realizados.

La **Figura 8**, muestra la gráfica de residuos de los sólidos suspendidos totales para la primera combinación.

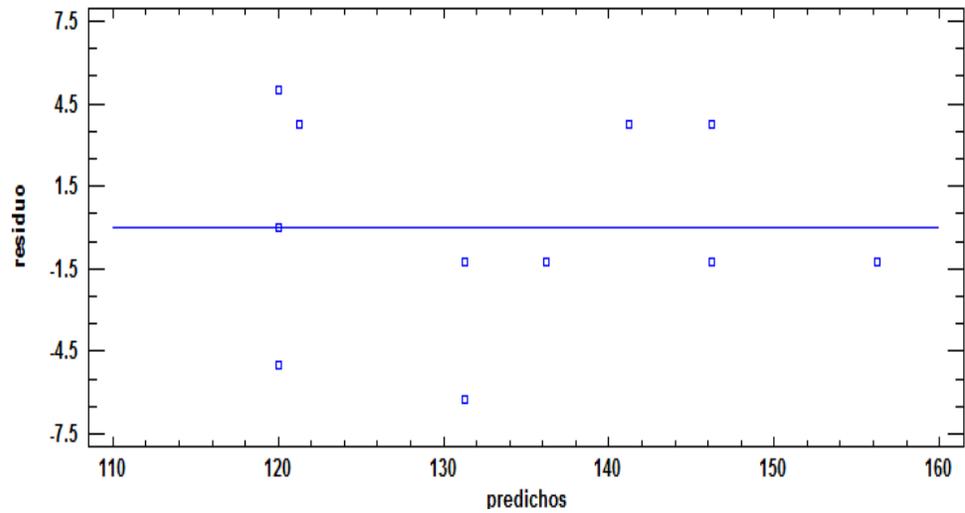


Figura 8. Grafica de residuos – SST- primera combinación.

INTERPRETACIÓN: Se muestran puntos cercados al valor de residuo ideal (0), lo cual corrobora que los datos ingresados tienen un coeficiente de correlación aceptable y que en caso que se desee mejorar estos valores, se repetirían el o los ensayos que se encuentren alejados del valor de residuo ideal.

4.3.2. ANÁLISIS DE DUREZA TOTAL.

Para el desarrollo de los análisis de la dureza total, presentes en el agua residual de sanguaza luego del tratamiento con la primera combinación, se emplearon los siguientes análisis:

4.3.2.1. ANÁLISIS DE VARIANZA.

La **Tabla 19**, muestra el análisis de varianza para la dureza total de la primera combinación.

Tabla 19: *Análisis de varianza para dureza total –primera combinación.*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	3.2258	1	3.2258	105.97	0.0001
B:Concentración agente floculante	0.5618	1	0.5618	18.46	0.0077
C:Ph	0.0008	1	0.0008	0.03	0.8776
AA	3.02409	1	3.02409	99.35	0.0002
AB	0.0036	1	0.0036	0.83	0.185
BB	0.00747692	1	0.00747692	0.25	0.6412
BC	0.0004	1	0.0004	0.01	0.9132
CC	0.00747692	1	0.00747692	0.25	0.6412
Error total	0.1522	5	0.03044		
Total (corr.)	7.75929	14			

R-cuadrada = 98.03 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94.51 %

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Dureza total en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 4 efectos (concentración de agente coagulante, concentración del agente floculante, grupo AA y grupo AB), tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%. Se realiza un ajuste a la tabla 19, para mostrar los tres factores significativos para este análisis, mostrándose en la **Tabla 19**.

Tabla 20: *Análisis de varianza ajustado para dureza total – primera combinación.*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	2.40901	1	2.40901	79.28	0.0000
B:Concentración agente floculante	0.5618	1	0.5618	18.49	0.0016
AA	3.66829	1	3.66829	120.72	0.0000
Error total	0.303875	10	0.0303875		
Total (corr.)	7.30297	14			

R-cuadrada = 90.23%

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 85.01 %

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Dureza total en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

4.3.2.2. DIAGRAMA DE PARETO – DUREZA TOTAL- PRIMERA COMBINACIÓN.

La **Figura 9**, muestra el diagrama de Pareto de la dureza total para la primera combinación.

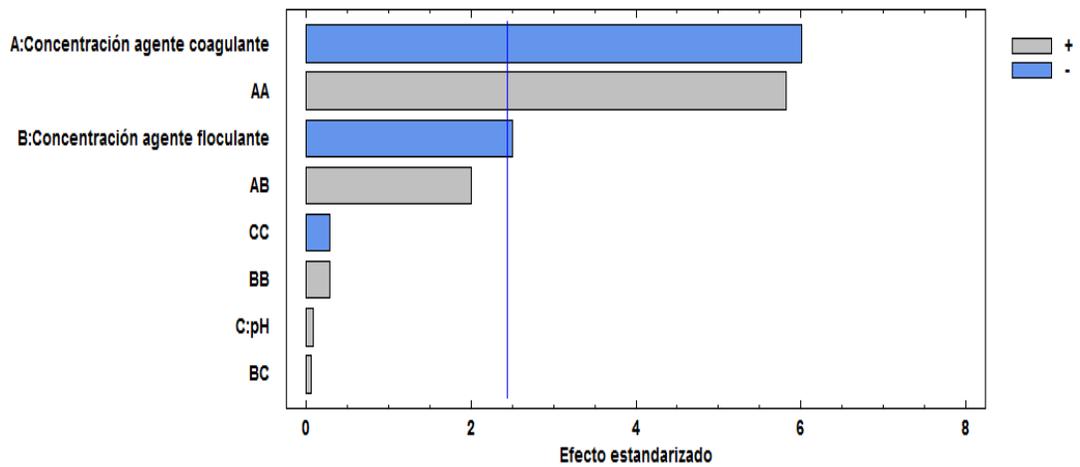


Figura 9.Diagrama de Pareto – Dureza Total – Primera combinación.

INTERPRETACIÓN: Se observan las variables que obtuvieron mayor influencia sobre este parámetro; las concentraciones del agente coagulante y floculante son determinantes, lo que deja al pH en un plano secundario, siendo benéfico debido al ahorro monetario que supone el evitar llevar al efluente hasta niveles tan altos para que sea efectivo el proceso de tratamiento de efluentes.

4.3.2.3. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES - DUREZA TOTAL - PRIMERA COMBINACIÓN.

La **figura 10**, muestra los efectos principales de la dureza total para la primera combinación.

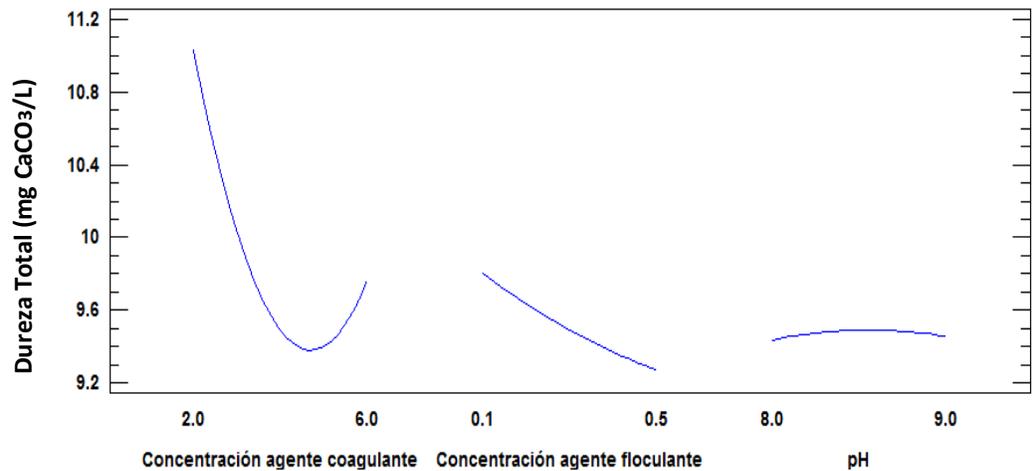


Figura 10. Grafica de efectos principales – Dureza total – Primera combinación.

INTERPRETACIÓN: En este caso ocurre un descenso leve de la Dureza total, empleando como límite un 4% de concentración de agente coagulante, no obstante cuando este valor aumenta, es posible que no se realice adecuadamente la precipitación química de los iones de calcio y magnesio como consecuencia del proceso de coagulación y floculación; ya que en concentraciones altas, la desestabilización de dichas partículas se dará en floculos pero de diámetros menores que en un caso ideal, por lo que estas no sedimentarían rápidamente. En el caso de la concentración del agente floculante el comportamiento es directamente proporcional al descenso de los valores de la Dureza Total; mientras que el pH permanece casi invariable respecto a la reducción de la Dureza total; entonces se toma el valor mínimo para este parámetro.

**4.3.2.4. COEFICIENTE DE REGRESIÓN-DUREZA TOTAL-PRIMERA
COMBINACIÓN.**

Tabla 21: *Coefficientes de regresión – dureza total-primera combinación.*

<i>Coefficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	14.7775
A:Concentración agente coagulante	-2.1275
B:Concentración agente floculante	-1.325
AA	0.22625

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. Según los resultados presentados en la tabla 21, la ecuación del modelo ajustado es:

Dureza total = 14.7775 - 2.1275*Concentración agente coagulante - 1.325*Concentración agente floculante + 0.22625*Concentración agente coagulante².

4.3.2.5. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA DUREZA TOTAL- PRIMERA COMBINACIÓN.

La **Tabla 22**, muestra la superficie de respuesta estimada de la dureza total para la primera combinación.

Tabla 22: Resultados Estimados para Dureza total – primera combinación.

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95.0% para Media</i>	<i>Superior 95.0% para Media</i>
1	9.96	10.025	9.63648	10.4135
2	10.32	10.765	10.3765	11.1535
3	9.8	9.495	9.10648	9.88352
4	9.36	9.225	8.89664	9.55336
5	9.96	9.76	9.44278	10.0772
6	9.64	9.755	9.42664	10.0834
7	9.52	9.49	9.2502	9.7298
8	9.32	9.225	8.89664	9.55336
9	9.47	9.49	9.2502	9.7298
10	9.64	9.755	9.42664	10.0834
11	11.36	11.03	10.7128	11.3472
12	11.68	11.295	10.9065	11.6835
13	9.48	9.49	9.2502	9.7298
14	10.76	11.03	10.7128	11.3472
15	9.32	9.76	9.44278	10.0772

INTERPRETACION: En la **Tabla 22**, se observan los valores obtenidos experimentalmente en la columna de valores observados y en la siguiente se observa los valores calculados por la ecuación de regresión descrita con los valores significativos obtenidos en el análisis de varianza , además de calcular los límites superior e inferior del mismo.

La **Figura 11**, muestra la superficie de respuesta estimada de la dureza total para la primera combinación.

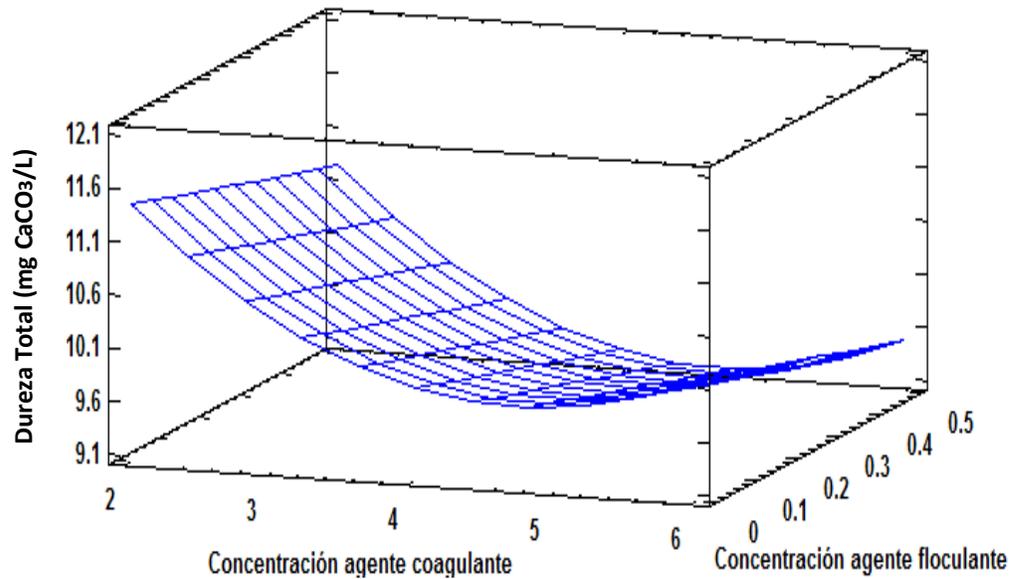


Figura 11.Superficie de Respuesta Estimada-Dureza total-primera combinación.

INTERPRETACIÓN: Se observa un leve descenso de la Dureza Total empleando como límite concentraciones de agente coagulante de 4.71% concentración de agente floculante de 0.50% y pH de 8, ya que al aumentar dichas concentraciones produce el efecto adverso en la remoción iones de calcio y magnesio. (Componentes principales de la Dureza Total).

4.3.2.6. OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA PARA DUREZA TOTAL- PRIMERA COMBINACIÓN.

Meta: minimizar Dureza total

Valor óptimo deseado = 9.11

La **Tabla 23**, muestra la optimización de respuesta de la dureza total para la primera combinación.

Tabla 23: *Optimización de respuesta – Dureza Total- primera combinación.*

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Concentración agente coagulante	2.0	6.0	4.71
Concentración agente floculante	0.1	0.5	0.5
pH	8.0	9.0	8.0

Esta tabla 23, muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual minimiza Dureza total sobre la región indicada. Se observan los valores planteados para cada factor y el óptimo obtenido según el Programa Estadístico.

La **Figura 12**, representa la gráfica de residuos de la dureza total para la primera combinación. .

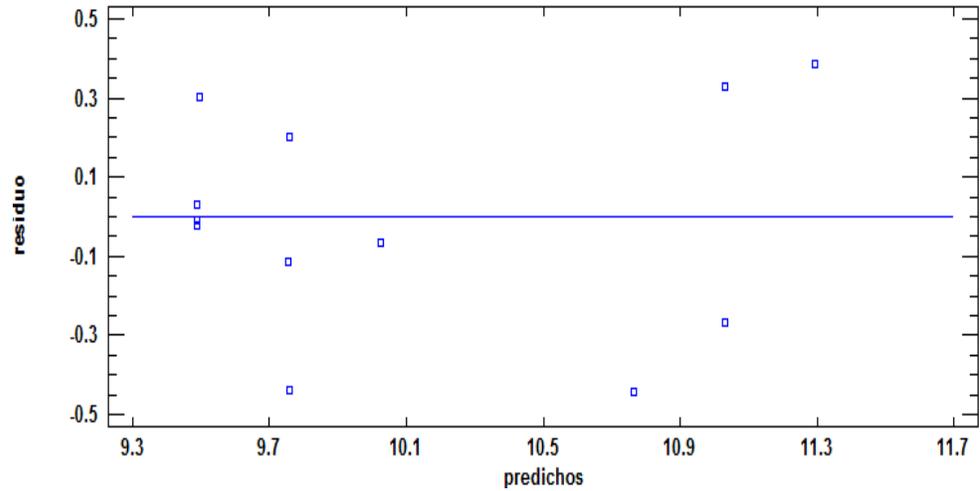


Figura 12.Gráfica de residuos – dureza total – primera combinación.

INTERPRETACIÓN: En este parámetro las respuestas han sido aceptables, ya que los puntos tienen al valor de residuo 0, es decir una variabilidad mínima que se observa también en el coeficiente de correlación.

4.3.3. ANÁLISIS DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.

Para el desarrollo de los análisis de la demanda bioquímica de oxígeno, en el agua de sanguaza luego del tratamiento con la primera combinación, se emplearon los siguientes análisis:

4.3.3.1. ANÁLISIS DE VARIANZA.

La **Tabla 24**, muestra el análisis de varianza de la demanda bioquímica de oxígeno de la primera combinación.

Tabla 24: Análisis de varianza para DBO₅-primera combinación.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	325.125	1	325.125	36.74	0.0018
B:Concentración agente floculante	136.125	1	136.125	15.38	0.0112
C:pH	4.5	1	4.5	0.51	0.5077
AA	333.231	1	333.231	37.65	0.0017
AB	81.0	1	81.0	9.15	0.0292
AC	2.25	1	2.25	0.25	0.6355
BB	0.923077	1	0.923077	0.10	0.7598
BC	2.25	1	2.25	0.25	0.6355
CC	0.230769	1	0.230769	0.03	0.8780
Error total	44.25	5	8.85		
Total (corr.)	932.4	14			

R-cuadrada = 95.25 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 86.71 %

La **Tabla (24)** ANOVA particiona la variabilidad de DBO_5 en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 4 efectos (concentración de agente coagulante, concentración de agente floculante, grupo AA y grupo AB), tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%. Se realiza un ajuste a la tabla 24 para mostrar los tres factores significativos para este análisis. Ahora tenemos la **Tabla 25**:

Tabla 25: *Análisis de varianza para DBO_5*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	325.125	1	325.125	59.68	0.0000
B:Concentración agente floculante	136.125	1	136.125	24.99	0.0005
AA	335.668	1	335.668	61.61	0.0000
AB	81.0	1	81.0	14.87	0.0032
Error total	54.4821	10	5.44821		
Total (corr.)	932.4	14			

R-cuadrada = 94.16 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 91.82 %

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de DBO_5 en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

4.3.3.2. DIAGRAMA DE PARETO- DBO_5 -PRIMERA COMBINACIÓN.

La **Figura 13**, muestra el diagrama de Pareto de la demanda bioquímica de oxígeno para la primera combinación.

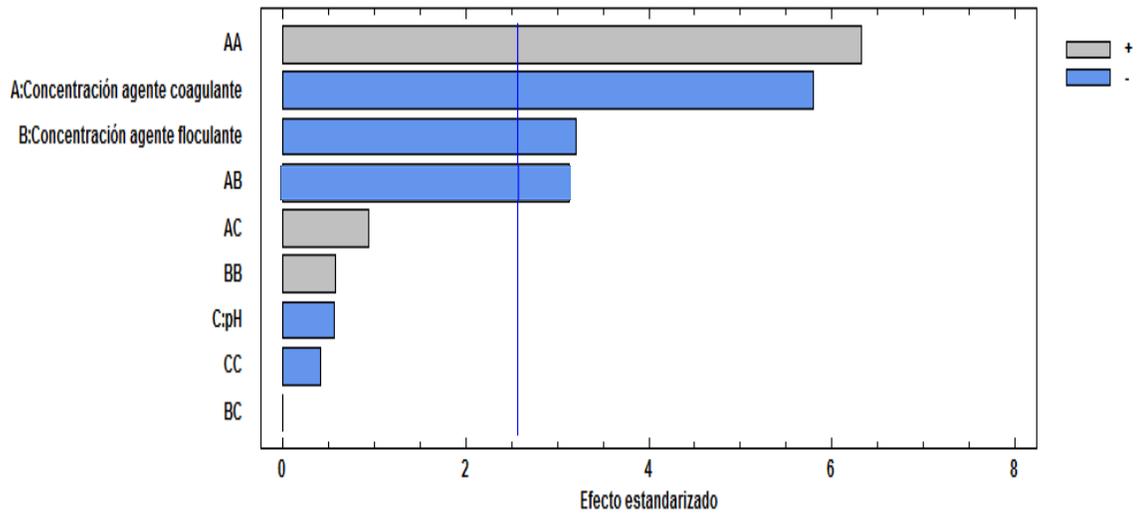


Figura 13.Diagrama de Pareto – DBO_5 – Primera combinación.

INTERPRETACIÓN: Se observan las variables significantes: concentración del agente coagulante y floculante, además el pH no fue determinante, así mismo se observa que a una doble concentración del agente coagulante produce un efecto de maximizar las respuestas obtenidas, alterando los resultados deseados, puesto que el estudio se enfoca en minimizar dichos valores.

4.3.3.3. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES.

La **figura 14**, muestra los efectos principales de la demanda bioquímica de oxígeno para la primera combinación.

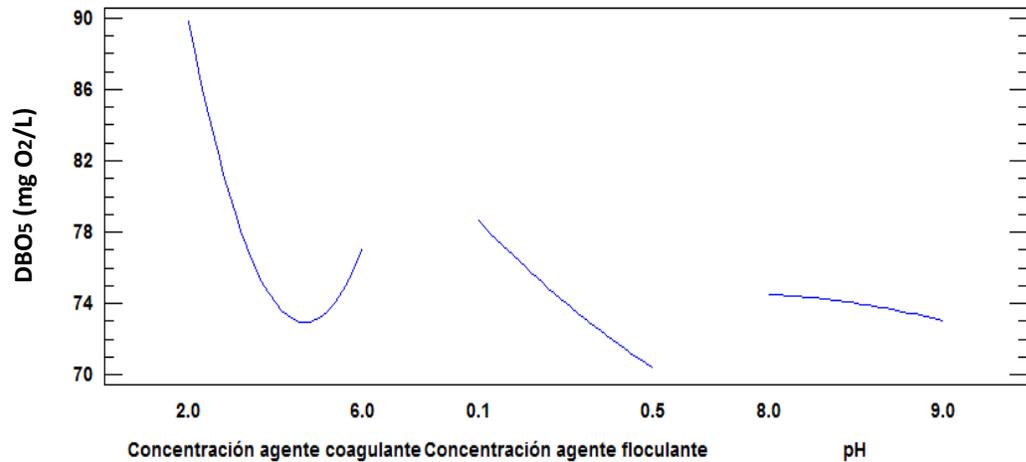


Figura 14. Grafica de Efectos Principales – DBO₅ – Primera combinación.

INTERPRETACIÓN: Se observa que a medida que aumenta la concentración del agente coagulante empleado tiene una mayor incidencia en la remoción del DBO₅, a consecuencia de la desestabilización y aglomeración de las partículas coloidales, integradas entre ellas por materia orgánica; reduciendo su presencia en el efluente; no obstante cuando este valor aumenta a partir de 4% en la concentración del agente coagulante el contenido en ppm de O₂ disuelto empieza a obtener resultados adversos, todo ello relacionado con la saturación en la preparación de los agentes empleados antes de su vertimiento en el efluente, lo que impide que se realice los procesos mencionados para la remoción de turbidez y parámetros descritos. En las variables de concentración de agente floculante y pH, siguen la tendencia de remoción de DBO₅ hasta sus máximos valores.

4.3.3.4. COEFICIENTE DE REGRESIÓN.

Tabla 26: *Coefficiente de Regresión – DBO₅-primera combinación.*

<i>Coefficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	144.509
A:Concentración agente coagulante	-25.5268
B:Concentración agente floculante	-65.625
AA	2.37054
AB	11.25

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. Según los resultados presentados en la tabla 26, la ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{DBO}_5 = 144.509 - 25.5268 * \text{Concentración agente coagulante} - 65.625 * \text{Concentración agente floculante} + 2.37054 * \text{Concentración agente coagulante}^2 + 11.25 * \text{Concentración agente coagulante} * \text{Concentración agente floculante}$$

**4.3.3.5. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA-DBO₅-PRIMERA
COMBINACIÓN.**

La **Tabla 27**, muestra la superficie de respuesta estimada de la demanda bioquímica de oxígeno para la primera combinación.

Tabla 27: Resultados Estimados para DBO₅-primera combinación.

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95.0% para Media</i>	<i>Superior 95.0% para Media</i>
1	78.0	76.875	72.7634	80.9866
2	81.0	81.375	77.2634	85.4866
3	75.0	77.625	73.5134	81.7366
4	72.0	70.0179	67.3262	72.7095
5	78.0	77.25	74.6496	79.8504
6	75.0	78.2679	75.5762	80.9595
7	72.0	74.1429	72.1771	76.1086
8	72.0	70.0179	67.3262	72.7095
9	75.0	74.1429	72.1771	76.1086
10	78.0	78.2679	75.5762	80.9595
11	90.0	90.0	87.3996	92.6004
12	102.0	98.625	94.5134	102.737
13	75.0	74.1429	72.1771	76.1086
14	87.0	90.0	87.3996	92.6004
15	78.0	77.25	74.6496	79.8504

INTERPRETACION: En la tabla 27, se observan los valores obtenidos experimentalmente en la columna de valores observados y en la siguiente se observa los valores calculados por la ecuación de regresión descrita con los valores significativos obtenidos en el análisis de varianza , además de calcular los límites superior e inferior del mismo.

La **Figura 15**, muestra la superficie de respuesta estimada de la demanda bioquímica de oxígeno para la primera combinación. .

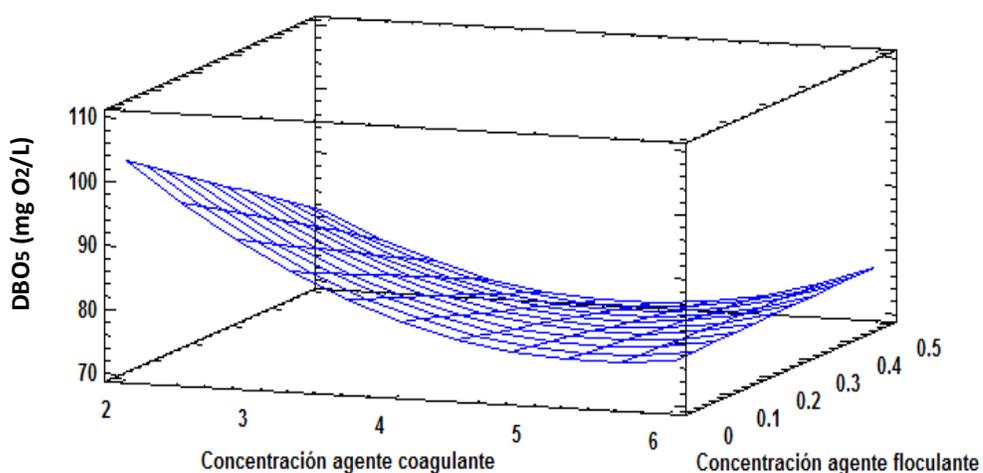


Figura 15. Superficie de Respuesta Estimada-DBO₅-primera combinación.

INTERPRETACIÓN: Se obtiene una mejor respuesta del valor del DBO₅ empleando como límite concentraciones de agente coagulante de 4.20%, concentración de agente floculante de 0.50% y pH de 8.67, ya que al aumentar dichas concentraciones se produce un efecto adverso en el parámetro medido, por lo tanto la materia orgánica presente en este se encontrará dispersa y como consecuencia el valor del DBO₅ no se reducirá según lo esperado.

4.3.3.6. OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA – DBO₅ - PRIMERA COMBINACIÓN.

Meta: minimizar DBO₅

Valor óptimo deseado = 69.93

La **Tabla 28**, muestra la optimización de respuesta de la demanda bioquímica de oxígeno para la primera combinación.

Tabla 28: Optimización de respuesta –DBO₅- Primera combinación.

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Concentración agente coagulante	2.0	6.0	4.20
Concentración agente floculante	0.1	0.5	0.50
pH	8.0	9.0	8.67

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual minimiza DBO₅ sobre la región indicada.

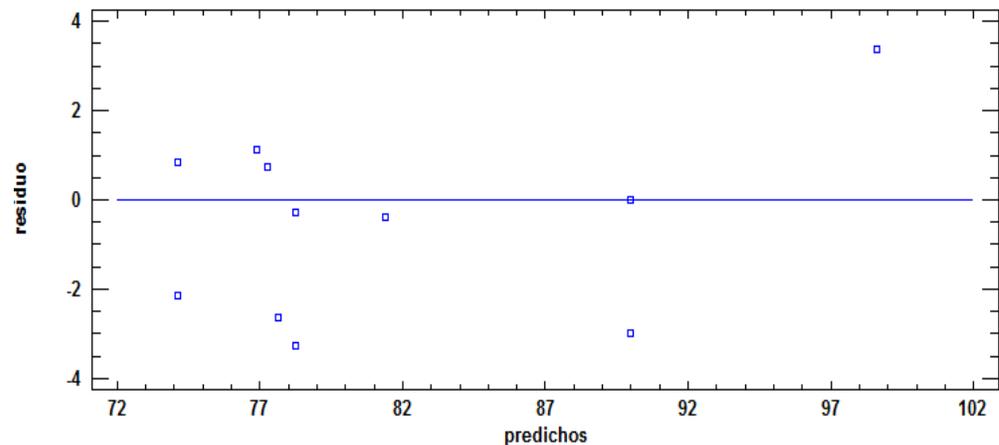


Figura 16. Grafica de residuos – DBO₅ – Primera combinación.

INTERPRETACIÓN: En este parámetro las respuestas han sido en general buenas, ya que los puntos tienen al valor de residuo 0, es decir una variabilidad mínima que se observa también en el coeficiente de correlación.

4.3.4. OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES RESPUESTAS - PRIMERA COMBINACIÓN.

Datos/Variables:

Sólidos suspendidos totales (mg/L)

Dureza total (mg CaCO₃/L)

DBO₅ (mg O₂/L)

Tabla 29: Valores observados de múltiples respuestas- primera combinación.

<i>Respuesta</i>	<i>Mínimo Observado</i>	<i>Máximo Observado</i>
Sólidos suspendidos totales	115	155
Dureza total	9.32	11.68
DBO ₅	72	102

INTERPRETACIÓN: En la tabla 29, se describen los valores mínimos y máximos observados para la primera combinación realizado en relación a los parámetros analizados: SST, Dureza total y DBO₅.

Tabla 30: Deseabilidad – Variables-primera combinación.

<i>Respuesta</i>	<i>Deseabilidad</i>		<i>Meta</i>
	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>	
Sólidos suspendidos totales	115	155	Minimizar
Dureza total	9.32	11.68	Minimizar
DBO ₅	72	102	Minimizar

INTERPRETACIÓN: Esta **Tabla 30** según el programa estadístico Statgraphics, muestra los valores deseados según la meta a realizar, para este estudio se busca minimizar dichos valores por lo que para relacionar estos parámetros en un análisis de múltiples respuestas seguirá el camino de minimizarlos con el fin de obtener la dosis óptima.

Tabla 31*Deseabilidad prevista – observada-primera combinación.*

Optimizar deseabilidad propuesta por el programa: 0.96074

<i>Fila</i>	<i>DBO₅</i>	<i>Dureza total</i>	<i>Sólidos suspendidos totales</i>	<i>Deseabilidad Prevista</i>	<i>Deseabilidad Observada</i>
1	78.0	9.96	125.0	0.791337	0.759025
2	81.0	10.32	135.0	0.499928	0.586451
3	75.0	9.8	145.0	0.637092	0.563823
4	72.0	9.36	115.0	0.956466	0.994318
5	78.0	9.96	130.0	0.735895	0.71427
6	75.0	9.64	125.0	0.826509	0.835617
7	72.0	9.52	120.0	0.910162	0.928645
8	72.0	9.32	115.0	0.956466	1.0
9	75.0	9.47	120.0	0.910162	0.903463
10	78.0	9.64	125.0	0.826509	0.803446
11	90.0	11.36	150.0	0.288848	0.189265
12	102.0	11.68	155.0	0.0	0.0
13	75.0	9.48	120.0	0.910162	0.902098
14	87.0	10.76	145.0	0.288848	0.365254
15	78.0	9.32	125.0	0.735895	0.843433

En esta **Tabla 31** según la deseabilidad observada se escogerá la dosis óptima en el estudio de los 15 ensayos, según los resultados integrados de las tres variables de respuesta experimentadas el ensayo 4 es el que el programa estadístico estableció como el ensayo óptimo de acuerdo a la tendencia experimental que se observó.

La **Figura 17**, muestra la superficie de respuesta estimada para la primera combinación.

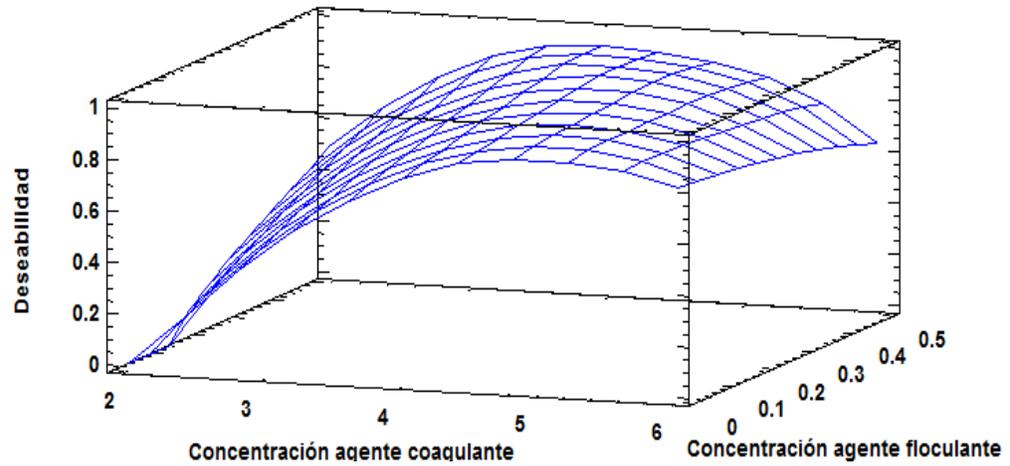


Figura 17. Superficie de respuesta estimada-primera combinación.

INTERPRETACIÓN: Se muestra la tendencia de la deseabilidad, un valor que cuando se acerca a 1 alcanza el valor óptimo encontrado según los parámetros empleados, de modo que en este caso tomando como referencia los dos parámetros de los analizados (Concentración de agente coagulante y Concentración de agente floculante) se puede determinar gráficamente los valores óptimos en la tabla de factores óptimos que se muestran a continuación.

Optimizar Deseabilidad

Valor óptimo = 0.9576

Tabla 32. Factores Óptimos-Primera combinación.

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Concentración agente coagulante	2.0	6.0	4
Concentración agente floculante	0.1	0.5	0.5
pH	8.0	9.0	9

INTERPRETACIÓN: En la **Tabla 32**, se muestran los valores de los factores planteados, y en función de la deseabilidad mostrada en tabla (32) y gráfica (17) se obtiene la dosis óptima planteada por el programa Statgraphics Centurión.

Tabla 33. Respuesta Óptima-primera combinación.

<i>Respuesta</i>	<i>Óptimo</i>
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	115
Dureza total (mg CaCO ₃)	9.36
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	72

INTERPRETACIÓN: La **Tabla 33** muestra las respuestas planteadas para la dosis óptima planteada por el programa estadístico.

4.3.5. REMOCIÓN DE SST Y DBO₅ EN FUNCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LA PRIMERA COMBINACIÓN.

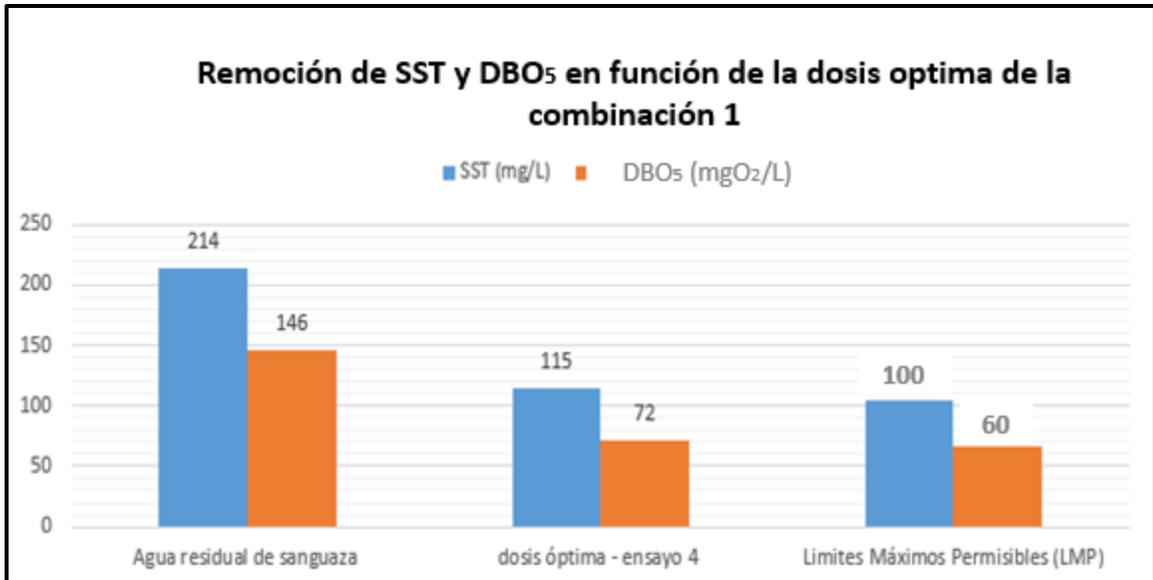


Figura 18. Remoción de SST y DBO₅ en función de la dosis óptima de la primera combinación.

Los resultados obtenidos en la primera combinación (agente coagulante: Sulfato de Aluminio - agente floculante: Almidón de yuca), permitió definir la dosis óptima (ensayo 4) : concentración de agente coagulante al 4% (dosificado a 100 ppm), concentración de agente floculante de 0.5% (dosificado a 100 ppm) y un pH de valor 9, se obtuvieron porcentajes de remoción de SST (46.26%; desde 214 mg/L hasta 115 mg/L) y DBO₅ (50.68%, desde 146 mgO₂/L hasta 72 mgO₂/L), a pesar de que se acercó a los valores de LMP, no cumplió con la premisa de encontrarse dentro del rango (SST<100mg/L; DBO₅≤60mg/L). Sin embargo cabe resaltar que industrialmente se complementa este proceso con una segunda etapa de difusión de aire a través de discos localizados en el contenedor DAF (Flotación por aire disuelto), por lo que el porcentaje de remoción de las variables estudiadas mejoraría en una industria.

4.3.6. REMOCIÓN DE DUREZA TOTAL EN FUNCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LA PRIMERA COMBINACIÓN.

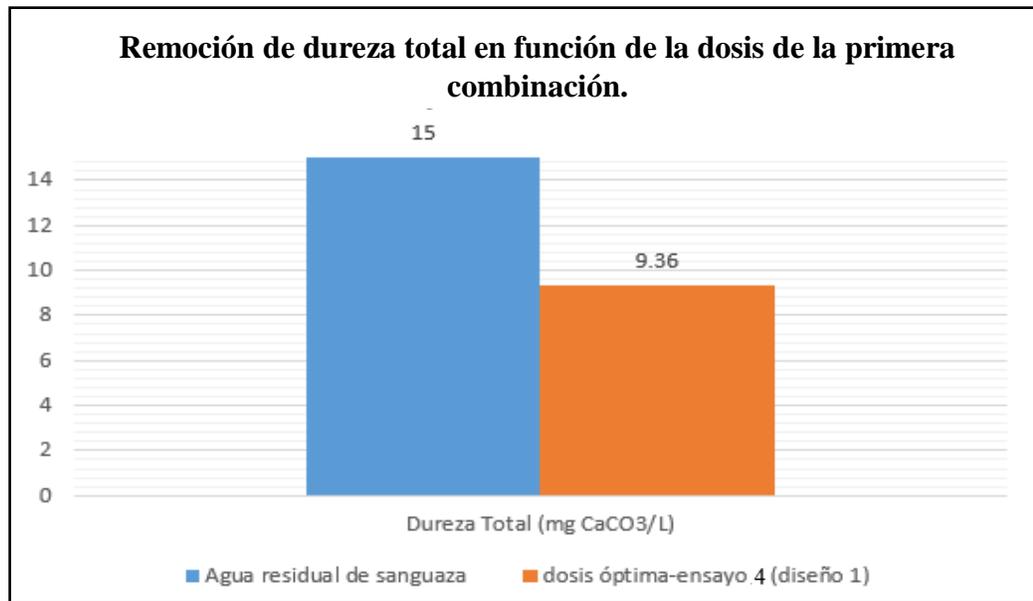


Figura 19. Remoción de dureza total en función de la dosis óptima de la primera combinación.

En el parámetro de Dureza total se observó una leve disminución de este valor: dureza total (37.80%; desde 15 mgCaCO₃/L hasta 9.33 mgCaCO₃/L), por consecuencia de la reducción de la materia inorgánica a raíz del proceso de coagulación/floculación, por lo que no es un efecto significativo el que se produce por la dosis óptima del diseño y programa estadístico planteado.

4.4.COMBINACIÓN 2

- Agente Coagulante: Mucílago de Tuna Opuntia Ficus.
- Agente Floculante: Poliacrilamida.

A: VARIABLES INDEPENDIENTES

A₁: Concentración de agente coagulante (gramos de agente/100 mL de agua destilada)

A₂: Concentración de agente floculante (gramos de agente/100 mL de agua destilada)

A₃: pH ajustado (muestra de agua de sanguaza)

B: VARIABLES DEPENDIENTES

B₁: Sólidos suspendidos totales (mg/L)

B₂: Dureza Total (mg CaCO₃/L)

B₃: Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O₂ /L)

C: PARÁMETROS ESTABLES

Temperatura de trabajo: 24 °C (ambiente)

Velocidad de agitación rápida de 200 rpm por 5 minutos, seguida de una velocidad de agitación lenta de 40 rpm por 20 minutos y un tiempo sedimentación de 1 hora.

Volumen de la muestra: 1 L

Tabla 34: *Resultados de la segunda combinación.*

	Variable independiente	Variable independiente	Variable independiente	Variable dependiente	Variable dependiente	Variable dependiente
Ensayos	Concentración agente coagulante (g/100 mL agua blanda)	Concentración agente floculante (g/100 mL agua blanda)	pH	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Dureza total (mg CaCO₃/L)	DBO₅ (mg O₂/L)
1	6	0.1	8.5	130 ± 2.88	10.08 ± 0.05	81 ± 1.73
2	2	0.5	8.5	140 ± 3.53	10.44 ± 0.01	84 ± 2.12
3	6	0.5	8.5	145 ± 2.88	9.92 ± 0.02	78 ± 1.73
4	4	0.5	9	120 ± 2.88	9.52 ± 0.05	75 ± 1.73
5	6	0.3	9	130 ± 3.53	10.08 ± 0.02	81 ± 2.12
6	4	0.1	9	125 ± 3.53	9.76 ± 0.03	78 ± 1.73
7	4	0.3	8.5	125 ± 3.53	9.60 ± 0.02	75 ± 2.12
8	4	0.5	8	120 ± 2.88	9.52 ± 0.01	74 ± 1.73
9	4	0.3	8.5	125 ± 2.88	9.60 ± 0.04	75 ± 2.12
10	4	0.1	8	130 ± 2.88	9.76 ± 0.02	78 ± 1.73
11	2	0.3	8	155 ± 3.53	11.48 ± 0.03	93 ± 2.12
12	2	0.1	8.5	155 ± 3.53	11.76 ± 0.04	96 ± 2.12
13	4	0.3	8.5	125 ± 2.88	9.60 ± 0.02	75 ± 1.73
14	2	0.3	9	150 ± 3.53	10.92 ± 0.03	87 ± 1.73
15	6	0.3	8	130 ± 3.53	10.00 ± 0.02	81 ± 2.12

La **Tabla 35** presenta los resultados de los pH iniciales y finales de los ensayos de la segunda combinación.

Tabla 35: *pH iniciales y finales de los ensayos-segunda combinación.*

Ensayos	pH inicial (Efluente a tratar)	pH final (Efluente tratado)
1	8.5	8.39
2	8.5	8.41
3	8.5	8.35
4	9	8.94
5	9	8.81
6	9	8.95
7	8.5	8.42
8	8	7.92
9	8.5	8.45
10	8	7.91
11	8	7.94
12	8.5	8.46
13	8.5	8.48
14	9	8.92
15	8	7.90

En la tabla 35 se muestran las variaciones del pH de cada ensayo realizado, donde se presentaron reducciones tenues las cuales no resultaron ser mayores a 0,19 unidades de pH.

Estos resultados son similares a los de (**Villabona et al. 2013, p.140**) que indican que el coagulante natural adicionado extraído del nopal (mucilago de opuntia ficus indica), no altera en gran medida el pH del agua tratada.

Además el leve descenso del pH se debe a la adicción del agente coagulante químico utilizado el cual fue el poliacrilamida.

4.4.1. ANÁLISIS DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.

Para el desarrollo del análisis de sólidos suspendidos totales, presentes en el agua residual de sanguaza luego del tratamiento con la segunda combinación, se emplearon los siguientes análisis:

4.4.1.1. ANÁLISIS DE VARIANZA.

El análisis de varianza permite determinar si la media de la variable respuesta varía en diferentes niveles de cada factor experimental. El programa Statgraphics, nos permite realizar el análisis de los datos de un experimento con un factor. A continuación en la **Tabla 36**, se muestra al análisis de varianza para SST de la segunda combinación.

Tabla 36: Análisis de varianza para SST-segunda combinación.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	528.125	1	528.125	20.12	0.0065
B:Concentración agente floculante	50.0	1	50.0	1.90	0.2261
C:pH	3.125	1	3.125	0.12	0.7441
AA	1212.98	1	1212.98	46.21	0.0010
AB	225.0	1	225.0	8.57	0.0327
AC	6.25	1	6.25	0.24	0.6462
BB	1.44231	1	1.44231	0.05	0.8240
BC	25.0	1	25.0	0.95	0.3739
CC	12.9808	1	12.9808	0.49	0.5133
Error total	131.25	5	26.25		
Total (corr.)	2233.33	14			

R-cuadrada = 94.1231 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 83.5448 por ciento

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Sólidos suspendidos totales en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

En la tabla 36, se puede observar que existen 3 efectos (concentración del agente coagulante, grupo AA y grupo AB), que tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

Se realiza un ajuste a la tabla 36, para poder mostrar los tres factores significativos (concentración del agente coagulante, grupo AA y grupo AB), para este análisis, teniendo un análisis de varianza ajustado que se muestra en la **Tabla 37**.

Tabla 37. Análisis de varianza ajustado para SST-segunda combinación.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	528.125	1	528.125	35.17	0.0001
AA	1155.03	1	1155.03	76.92	0.0000
AB	225.0	1	225.0	14.98	0.0026
Error total	165.179	11	15.0162		
Total (corr.)	2073.33	14			

R-cuadrada = 92.03 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 89.86 %

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Sólidos suspendidos totales en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

4.4.1.2. DIAGRAMA DE PARETO-SST-SEGUNDA COMBINACIÓN.

La **Figura 20**, muestra el diagrama de Pareto de los sólidos suspendidos totales para la segunda combinación.

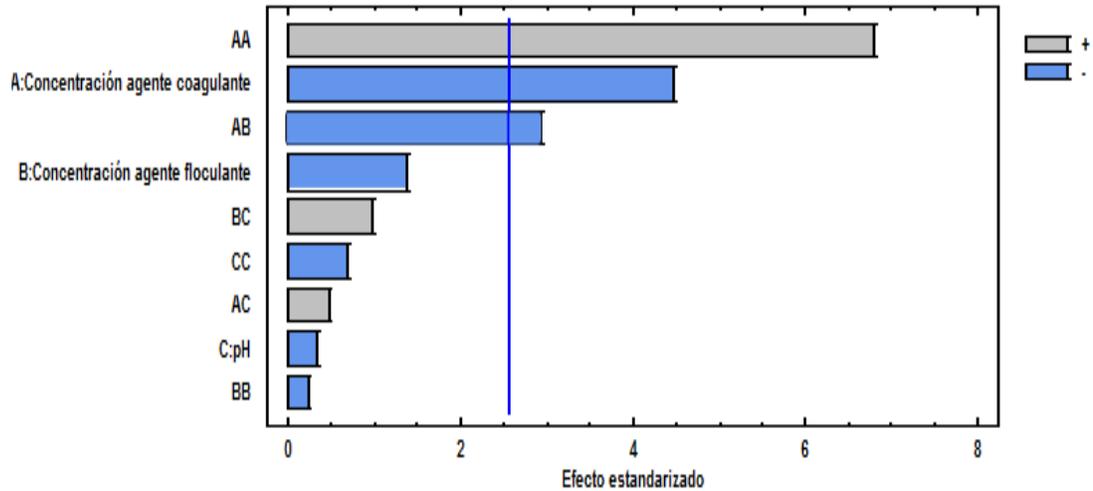


Figura 20. Diagrama de Pareto – SST – Segunda combinación.

Esta es la representación gráfica de la tabla 36, de modo que se puede observar en la figura las variables significativas (grupo AA, concentración de agente coagulante, grupo AB), y la variable no significativa (pH).

4.4.1.3. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES – SST - SEGUNDA COMBINACIÓN.

La **Figura 21**. Muestra la gráfica de efectos principales de los sólidos suspendidos totales para la segunda combinación.

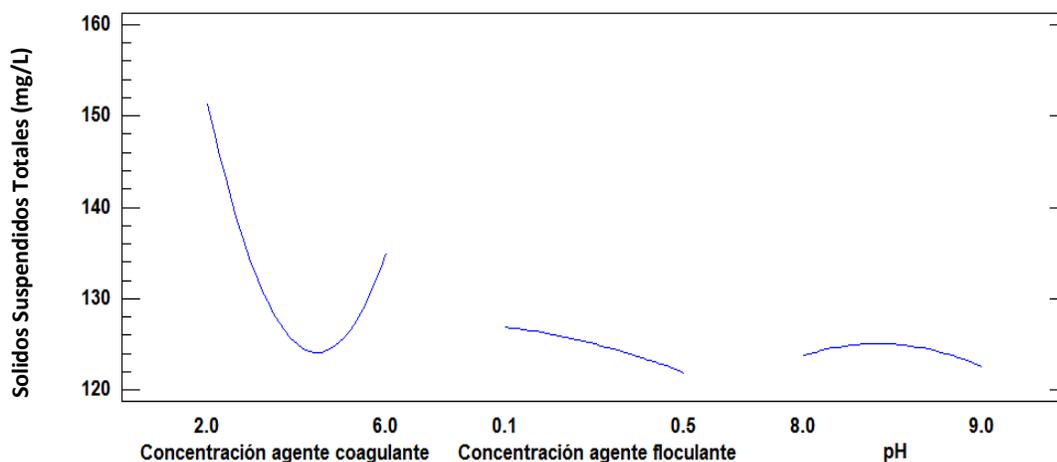


Figura 21. Efectos principales – SST – Segunda combinación.

INTERPRETACIÓN: En la **Figura 21**, se observa una mayor remoción de SST respecto al aumento de la concentración del agente coagulante, no obstante en concentraciones altas de este agente, se observa un descenso de la acción removedora de turbidez debido al exceso de los agentes preparadas en la solución estándar, provocando que en el efluente se generen floculos de menor diámetro, (comprendida entre 0,4 μm y 2 μm), para que sedimenten en un periodo de tiempo asignado. Estos floculantes se adsorben sobre los microfloculos mediante el uso de sus grupos funcionales. Los grupos carboxilo se adsorben en la microfloculos por la fuerza de atracción electrostática y la fuerza de unión iónica con los átomos metálicos, tales como aluminio y hierro.

4.4.1.4. COEFICIENTE DE REGRESIÓN – SST - SEGUNDA COMBINACIÓN.

La **Tabla 38**, muestra los coeficientes de regresión de los sólidos suspendidos totales para la segunda combinación.

Tabla 38. Coeficientes de regresión – SST-Segunda combinación.

<i>Coefficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	233.393
A:Concentración agente coagulante	-44.8661
B:Concentración agente floculante	-75.0
AA	4.39732
AB	18.75

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

Sólidos suspendidos totales = 233.393 - 44.8661*Concentración agente coagulante - 75.0*Concentración agente floculante + 4.39732*Concentración agente coagulante² + 18.75*Concentración agente coagulante*Concentración agente floculante

4.4.1.5. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA – SST - SEGUNDA COMBINACIÓN.

La **Tabla 39**, muestra la superficie de respuesta estimada de los sólidos suspendidos totales para ella segunda combinación.

Tabla 39.Resultados estimados para SST-segunda combinación.

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95.0% para Media</i>	<i>Superior 95.0% para Media</i>
1	130.0	126.25	120.219	132.281
2	140.0	142.5	136.469	148.531
3	145.0	141.25	135.219	147.281
4	120.0	124.286	121.062	127.509
5	130.0	133.75	129.485	138.015
6	125.0	124.286	121.062	127.509
7	125.0	124.286	121.062	127.509
8	120.0	124.286	121.062	127.509
9	125.0	124.286	121.062	127.509
10	130.0	124.286	121.062	127.509
11	155.0	150.0	145.735	154.265
12	155.0	157.5	151.469	163.531
13	125.0	124.286	121.062	127.509
14	150.0	150.0	145.735	154.265
15	130.0	133.75	129.485	138.015

INTERPRETACION: En la tabla 39, se observan los valores obtenidos experimentalmente en la columna de valores observados y en la siguiente se observa los valores calculados por la ecuación de regresión descrita con los valores significativos obtenidos en el análisis de varianza , además de calcular los límites superior e inferior del mismo.

La **Figura 22**, muestra la superficie de respuesta estimados de los sólidos suspendidos totales para la segunda combinación.

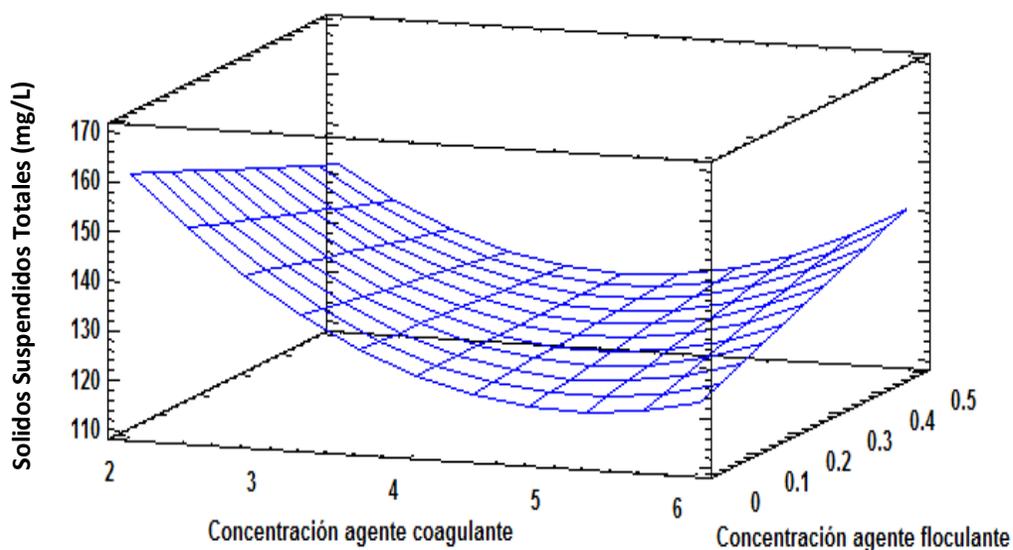


Figura 22. Superficie de respuesta estimada – SST-segunda combinación.

INTERPRETACIÓN: En la figura 22, Se observa una mejor respuesta de la remoción de los SST empleando como límite concentraciones de agente coagulante de 4.88%, concentración agente floculante de 0.1% y pH de 8.73, ya que al aumentar dichas concentraciones se produce un descenso en la remoción de SST.

4.4.1.6. OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA – SST - SEGUNDA COMBINACIÓN.

Meta: minimizar Sólidos suspendidos totales

Valor óptimo deseado = 120.82

La **Tabla 40**, muestra la optimización de respuesta de los sólidos suspendidos totales para la segunda combinación.

Tabla 40. Optimización de respuesta – segunda combinación.

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Concentración agente coagulante	2.0	6.0	4.88
Concentración agente floculante	0.1	0.5	0.1
pH	8.0	9.0	8.73

La **Figura 23**, muestra la gráfica de residuos de los sólidos suspendidos totales para la segunda combinación.

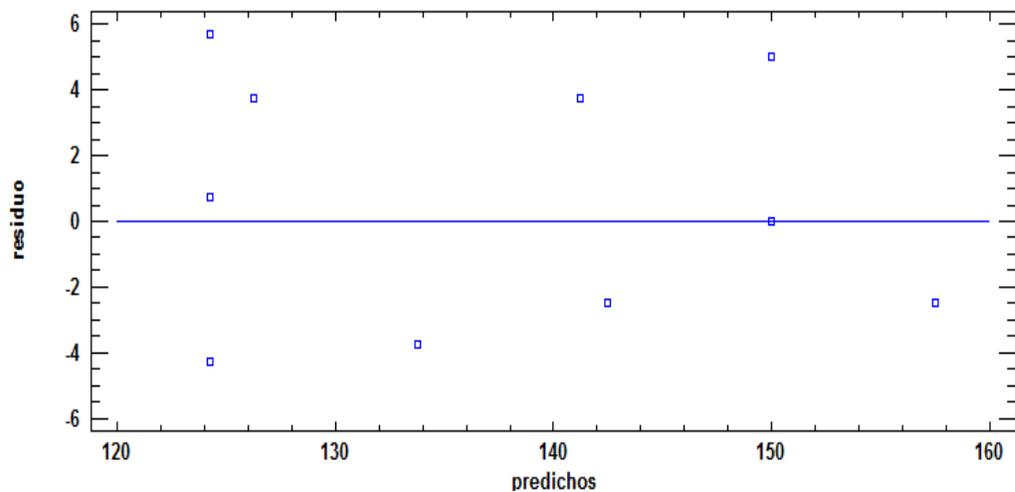


Figura 23. Gráfica de residuos – SST-segunda combinación.

INTERPRETACIÓN: Indica la variabilidad de los resultados con respecto a los 15 ensayos ejecutados y sus efectos predichos, de hecho en el caso de tratamiento de efluentes siempre va a existir una leve variación en sus componentes iniciales, sin embargo el coeficiente de correlación es aceptable y en caso que se desee mejorar o establecer resultados más confiables se pueden repetir los ensayos que se encuentren más alejados del punto referencial de residuo 0.

4.4.2. ANÁLISIS DE DUREZA TOTAL.

Para el desarrollo del análisis de la dureza presente en el agua de sanguaza luego del tratamiento con la combinación 2, se emplearon los siguientes análisis:

4.4.2.1. ANÁLISIS DE VARIANZA-DUREZA TOTAL-COMBINACION 2.

La **Tabla 40**, muestra el análisis de varianza para la dureza total de la combinación 2.

Tabla 41. Análisis de varianza para la dureza total - combinación 2

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	2.5538	1	2.5538	82.06	0.0003
B:Concentración agente floculante	0.4802	1	0.4802	15.43	0.0111
C:pH	0.0288	1	0.0288	0.93	0.3802
AA	3.43837	1	3.43837	110.49	0.0001
AB	0.3364	1	0.3364	10.81	0.0218
AC	0.1024	1	0.1024	3.29	0.1294
BB	0.000830769	1	0.000830769	0.03	0.8766
BC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CC	0.0111692	1	0.0111692	0.36	0.5752
Error total	0.1556	5	0.03112		
Total (corr.)	7.12576	14			

R-cuadrada = 97.82 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 93.89 %

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Dureza total en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 4 efectos (concentración del agente coagulante, concentración del agente floculante, grupo AA y grupo AB), tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%. Se realiza un ajuste a la tabla 40, para mostrar los cuatro factores significativos para este análisis en la **Tabla 41**.

Tabla 42. Análisis de varianza ajustado - dureza total – combinación 2

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	2.5538	1	2.5538	44.19	0.0000
B:Concentración agente floculante	0.4802	1	0.4802	8.31	0.0149
AA	3.45602	1	3.45602	59.80	0.0000
Error total	0.635743	11	0.0577948		
Total (corr.)	7.12576	14			
A:Concentración agente coagulante	2.5538	1	2.5538	44.19	0.0000

R-cuadrada = 91.08 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 88.65 %

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Dureza total en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

4.4.2.2. DIAGRAMA DE PARETO - DUREZA TOTAL - COMBINACION 2.

La **Figura 24**, muestra el diagrama de Pareto de la dureza total para la combinación 2.

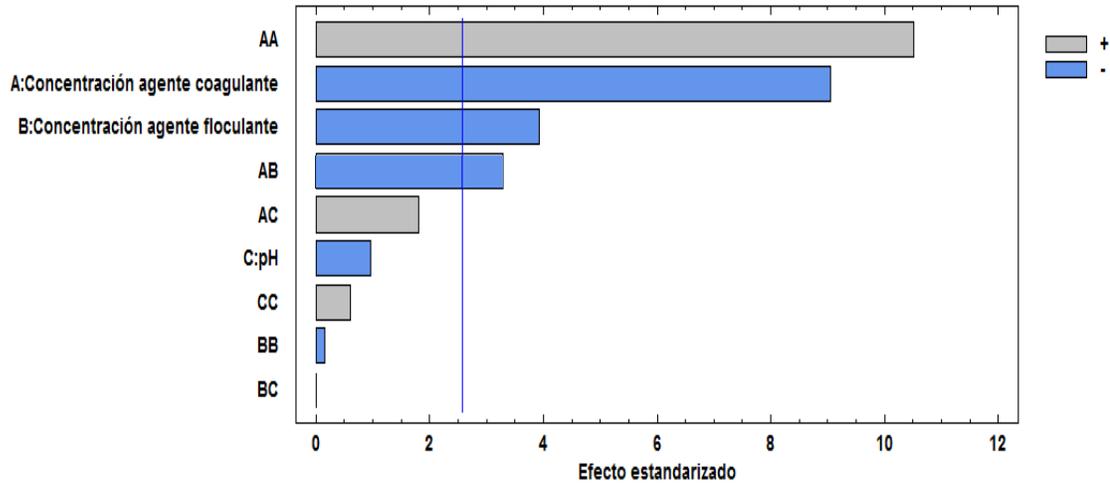


Figura 24. Diagrama de Pareto – Dureza Total – Combinación 2

INTERPRETACIÓN: Se observan las variables significativas descritas en el cuadro de análisis de varianza de dureza total-diseño 2; en este caso el valor del pH no fue determinante, de hecho el menor valor empleado puede utilizarse de forma adecuada para obtener una dosis aceptable, por otra parte el agente coagulante natural empleado: mucílago de tuna opuntia, se utilizó en mayor concentración que el agente floculante (producto químico), necesitando que el valor del medio pH (efluente) no sea llevado a niveles elevados con soda cáustica, como si se realiza cuando se emplean productos químicos coagulantes.

4.4.2.3. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES-DUREZA TOTAL - COMBINACION 2.

La **figura 25**, muestra los efectos principales de la dureza total para la combinación 2.

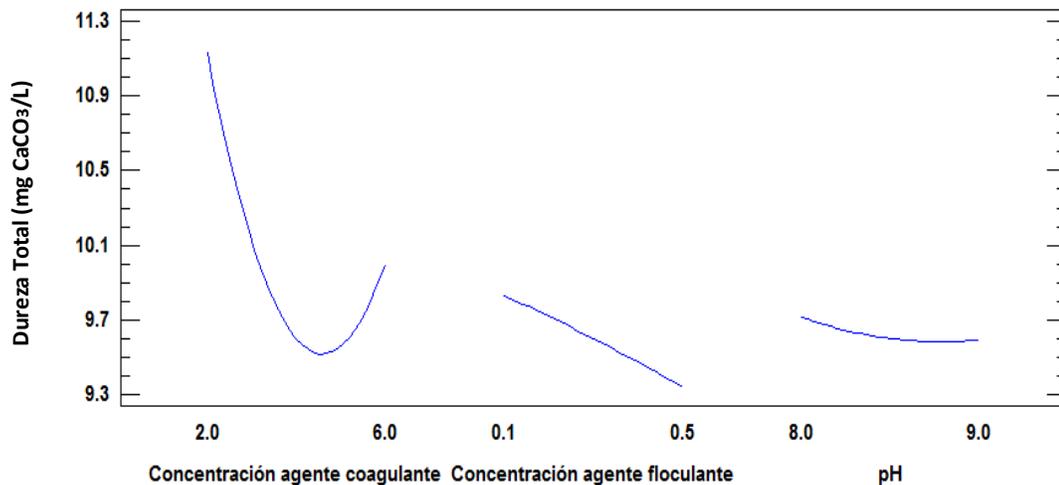


Figura 25. Gráfico de Efectos principales – Dureza Total – Combinación 2

INTERPRETACIÓN: Se observan los valores óptimos de las tres variables mostradas (concentración de agente coagulante, concentración de agente floculante y pH), mostrando un comportamiento similar al obtenido en los SST, por otra parte la concentración del agente floculante cumple un rol más importante en este caso, porque reduce en mayor cantidad el contenido de dureza presente en el agua residual. La dureza se produce a partir de la disolución de carbonatos en forma de bicarbonatos y puede ser eliminada por la adición del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La presencia de estos sólidos disueltos en el agua puede comprender sal inorgánica y materia orgánica que influyen en las cualidades del agua tales como: propiedades de sabor, alcalinidad, dureza y corrosión. El proceso de coagulación favorece a la disminución de los parámetros en estudios por medio de la sedimentación de las partículas coloidales.

**4.4.2.4. COEFICIENTE DE REGRESIÓN - DUREZA TOTAL -
COMBINACION 2.**

Tabla 43. Coeficientes de regresión – dureza total- combinación 2

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	15.8389
A:Concentración agente coagulante	-2.42429
B:Concentración agente floculante	-4.125
AA	0.240536
AB	0.725

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. Según los resultados presentados en la tabla 42, la ecuación del modelo ajustado es:

Dureza total = 15.8389 - 2.42429*Concentración agente coagulante - 4.125*Concentración agente floculante + 0.240536*Concentración agente coagulante² + 0.725*Concentración agente coagulante*Concentración agente floculante

4.4.2.5. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA-DUREZA TOTAL-COMBINACION 2.

La **Tabla 43**, muestra la superficie de respuesta estimada de la dureza total para la combinación 2.

Tabla 44.Resultados estimados para la dureza total-combinación 2

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95.0% para Media</i>	<i>Superior 95.0% para Media</i>
1	10.08	9.975	9.67023	10.2798
2	10.44	10.615	10.3102	10.9198
3	9.92	10.065	9.76023	10.3698
4	9.52	9.37786	9.17834	9.57737
5	10.08	10.02	9.82725	10.2128
6	9.76	9.86786	9.66834	10.0674
7	9.6	9.62286	9.47715	9.76856
8	9.52	9.37786	9.17834	9.57737
9	9.6	9.62286	9.47715	9.76856
10	9.76	9.86786	9.66834	10.0674
11	11.48	11.15	10.9572	11.3428
12	11.76	11.685	11.3802	11.9898
13	9.6	9.62286	9.47715	9.76856
14	10.92	11.15	10.9572	11.3428
15	10.0	10.02	9.82725	10.2128

INTERPRETACION: En la tabla 43, se observan los valores obtenidos experimentalmente en la columna de valores observados y en la siguiente se observa los valores calculados por la ecuación de regresión descrita con los valores significativos obtenidos en el análisis de varianza , además de calcular los límites superior e inferior del mismo.

La **Figura 26**, muestra la superficie de respuesta estimada de la dureza total para la combinación 2.

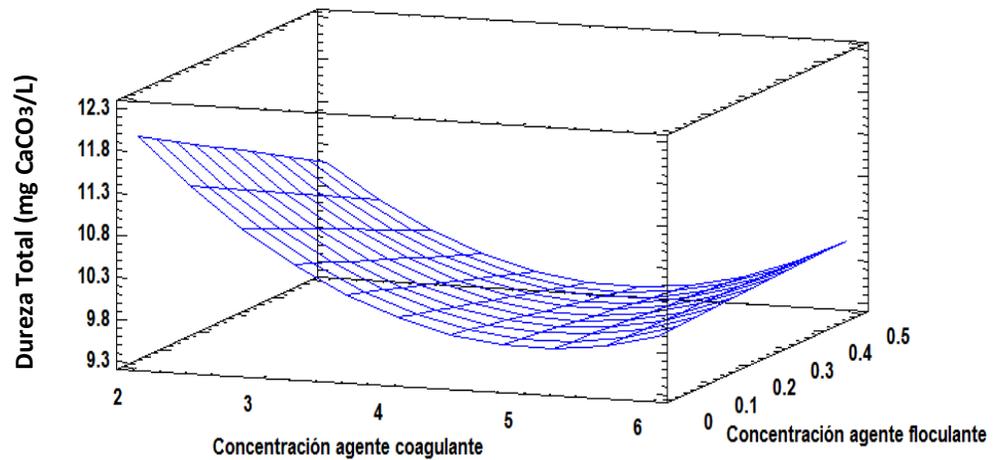


Figura 26. Superficie de Respuesta Estimada-dureza total-combinación 2

INTERPRETACIÓN: En esta gráfica se observa la tendencia de los resultados obtenidos en base a las variables del estudio más influyentes, el agente coagulante de 4.2% y floculante de 0.5%, ya que al aumentar dichas concentraciones se produce un descenso en la remoción de la dureza. El pH óptimo observado es de 8.95.

4.4.2.6. OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA-DUREZA TOTAL-COMBINACION 2.

Meta: minimizar Dureza total

Valor óptimo deseado = 9.36

La **Tabla 44**, muestra la optimización de respuesta de la dureza total para la combinación 2.

Tabla 45. Optimización de respuesta – Combinación 2

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Concentración agente coagulante	2.0	6.0	4.29
Concentración agente floculante	0.1	0.5	0.5
pH	8.0	9.0	8.25

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores registrados, la cual minimiza la Dureza total sobre la región indicada. La **Figura 27**, representa la gráfica de residuos de la dureza total para la combinación 2.

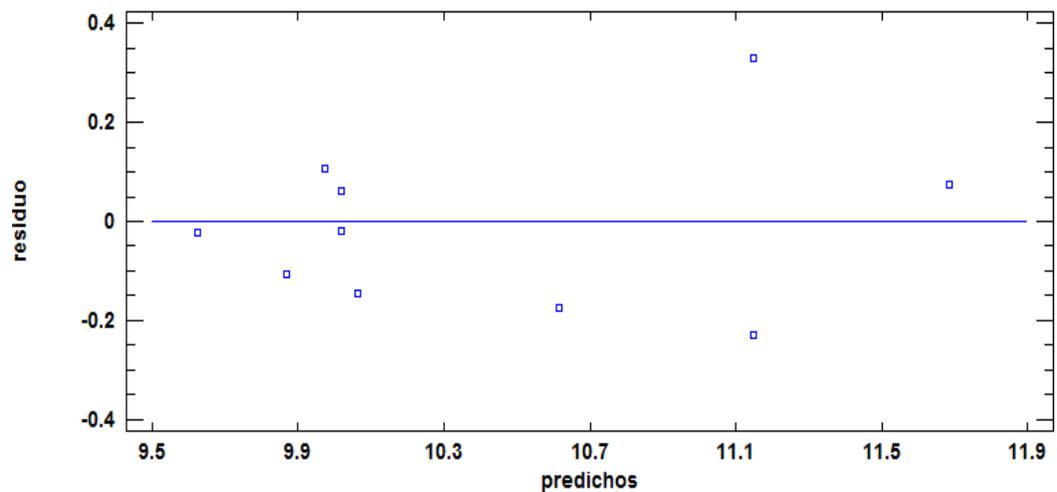


Figura 27. Gráfico de residuos – Dureza total – Combinación 2

INTERPRETACIÓN: Se muestra la tendencia de los resultados de los ensayos para Dureza total obteniendo valores aceptables en la gráfica de residuos, es decir la correlación existente entre ellos y que en caso que se desee mejorar estos valores, se repetirían el o los ensayos que se encuentren alejados del valor de residuo ideal.

4.4.3. ANÁLISIS DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO-COMBINACION 2.

Para el desarrollo de los análisis de la demanda bioquímica de oxígeno, presentes en el agua residual de sanguaza luego del tratamiento con el diseño 2, se emplearon los siguientes análisis:

4.4.3.1. ANÁLISIS DE VARIANZA-DBO₅-COMBINACION 2.

La **Tabla 45**, muestra el análisis de varianza de la demanda bioquímica de oxígeno la combinación 2.

Tabla 46. Análisis de varianza para DBO₅-combinacion 2

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	190.125	1	190.125	62.34	0.0005
B:Concentración agente floculante	60.5	1	60.5	19.84	0.0067
C:pH	3.125	1	3.125	1.02	0.3579
AA	333.231	1	333.231	109.26	0.0001
AB	20.25	1	20.25	6.64	0.0496
AC	9.0	1	9.0	2.95	0.1465
BB	0.230769	1	0.230769	0.08	0.7943
BC	0.25	1	0.25	0.08	0.7861
CC	3.69231	1	3.69231	1.21	0.3213
Error total	15.25	5	3.05		
Total (corr.)	632.933	14			

R-cuadrada = 97.59 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 93.25 %

La **Tabla (45)** ANOVA particiona la variabilidad de DBO₅ en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 4 efectos (concentración de agente coagulante, concentración de agente floculante, grupo AA y grupo AC), tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%. Se realiza un ajuste a la tabla 45 para mostrar los tres factores significativos para este análisis. Ahora tenemos la **Tabla 46**:

Tabla 47. *Análisis de varianza ajustado para DBO₅ – combinación 2*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración agente coagulante	190.125	1	190.125	43.84	0.0000
B:Concentración agente floculante	45.03	1	45.03	10.38	0.0081
AA	325.804	1	325.804	75.13	0.0000
Error total	47.7035	11	4.33668		
Total (corr.)	608.663	14			

R-cuadrada = 94.3936 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 92.151 %

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de DBO₅ en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

4.4.3.2. DIAGRAMA DE PARETO- DBO_5 -COMBINACION 2.

La **Figura 28**, muestra el diagrama de Pareto de la demanda bioquímica de oxígeno para la combinación 2.

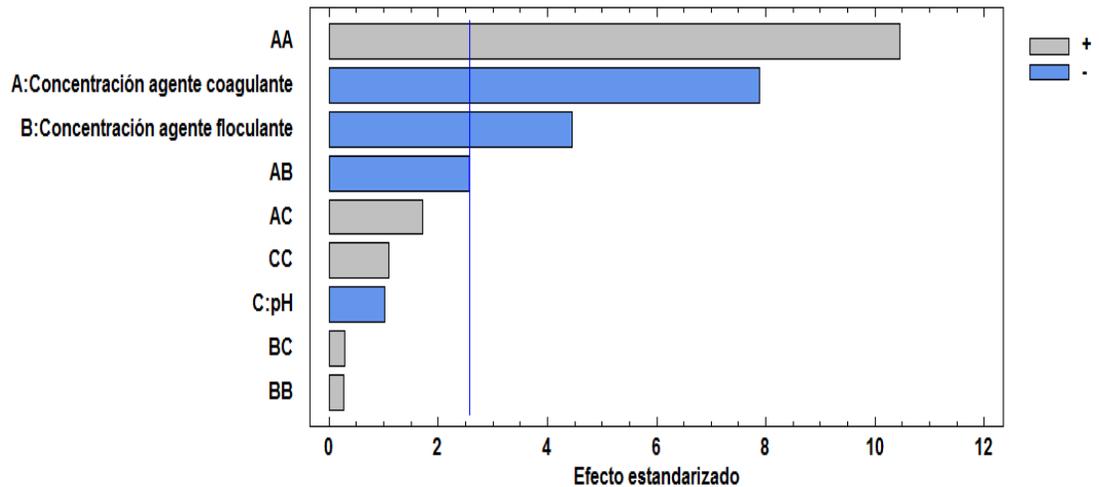


Figura 28.Diagrama de Pareto – DBO_5 – Combinación 2

Se observan las variables significantes: concentración del agente coagulante y floculante, además el pH no fue significativo, así mismo se observa que a una doble concentración del agente coagulante produce un efecto de maximizar las respuestas obtenidas, alterando los resultados deseados, puesto que el estudio se enfoca en minimizar dichos valores.

4.4.3.3. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES-DBO₅-COMBINACION 2.

La **figura 29**, muestra los efectos principales de la demanda bioquímica de oxígeno para la combinación 2.

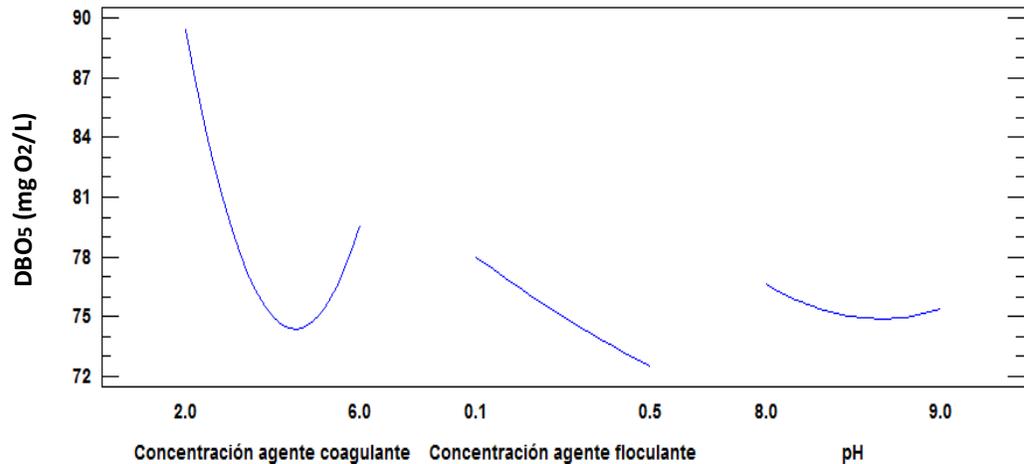


Figura 29.Gráfica de efectos principales – DBO₅ – Combinación 2

INTERPRETACIÓN: Se observa una mejor respuesta en la reducción del DBO₅ con una concentración del agente coagulante del 4%, agente floculante del 0.5% y pH de 9, no obstante cuando este valor del agente coagulante aumenta, se produce una saturación de este agente en la solución estándar, provocando que no se lleve a cabo la desestabilización química de las partículas coloidales, por lo que el proceso de tratamiento de efluentes no es realizado adecuadamente, entonces como se observa en la figura, la reducción en la respuesta del valor del DBO según los ensayos no será tan efectiva.

4.4.3.4. COEFICIENTE DE REGRESIÓN-DBO₅-COMBINACION 2.

Tabla 48. Coeficientes de regresión – DBO₅-combinación 2

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	133.982
A:Concentración agente coagulante	-22.9464
B:Concentración agente floculante	-36.25
AA	2.35268
AB	5.625

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{DBO}_5 = 133.982 - 22.9464 * \text{Concentración agente coagulante} - 36.25 * \text{Concentración agente floculante} + 2.35268 * \text{Concentración agente coagulante}^2 + 5.625 * \text{Concentración agente coagulante} * \text{Concentración agente floculante}$$

Los polímeros naturales tales como almidón, y celulosa han sido investigados como una alternativa atractiva en los procesos de coagulación-floculación para la remoción de partículas suspendidas y coloidales, y una de las ventajas que presentan es que dichos polímeros naturales y sus derivados son biodegradables; asimismo, su degradación intermedia es inofensiva para el ser humano y el ambiente. Entre los más utilizados se encuentran los polisacáridos extraídos de los almidones de la papa, yuca y maíz. (Shogren, 2009, p.644).

4.4.3.5. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA-DBO₅-COMBINACIÒN

2.

La **Tabla 48**, muestra la superficie de respuesta estimada de la demanda bioquímica de oxígeno para la combinación 2.

Tabla 49.Resultados Estimados para DBO₅-combinaciòn 2

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95.0% para Media</i>	<i>Superior 95.0% para Media</i>
1	81.0	80.75	77.6272	83.8728
2	84.0	85.0	81.8772	88.1228
3	78.0	79.75	76.6272	82.8728
4	75.0	72.9643	70.9199	75.0086
5	81.0	80.25	78.275	82.225
6	78.0	78.4643	76.4199	80.5086
7	75.0	75.7143	74.2213	77.2073
8	74.0	72.9643	70.9199	75.0086
9	75.0	75.7143	74.2213	77.2073
10	78.0	78.4643	76.4199	80.5086
11	93.0	90.0	88.025	91.975
12	96.0	95.0	91.8772	98.1228
13	75.0	75.7143	74.2213	77.2073
14	87.0	90.0	88.025	91.975
15	81.0	80.25	78.275	82.225

INTERPRETACION: En la tabla 48, se observan los valores obtenidos experimentalmente en la columna de valores observados y en la siguiente se observa los valores calculados por la ecuación de regresión descrita con los valores significativos obtenidos en el análisis de varianza , además de calcular los límites superior e inferior del mismo.

La **Figura 30**, muestra la superficie de respuesta estimada de la demanda bioquímica de oxígeno para la combinación 2.

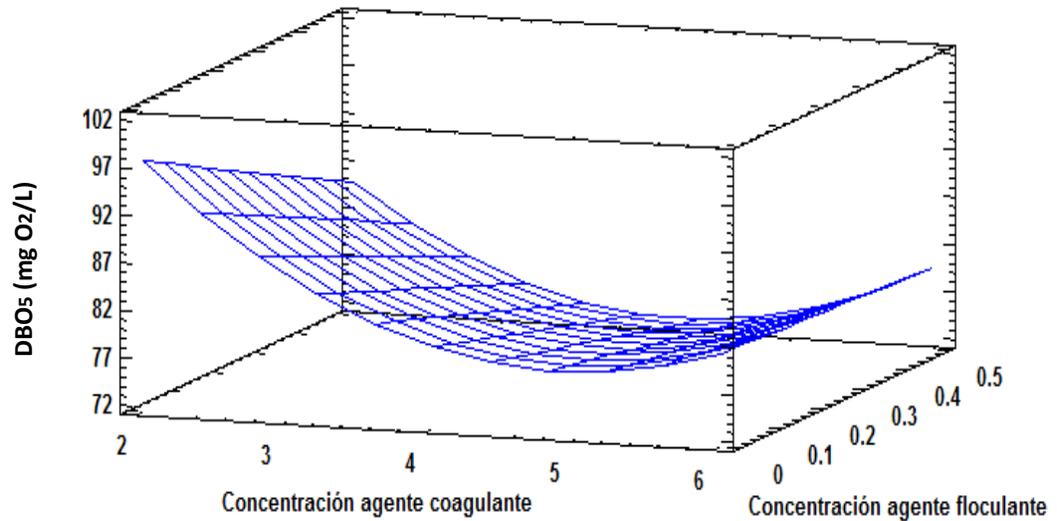


Figura 30. Superficie de Respuesta Estimada-DBO₅-Combinación 2

INTERPRETACIÓN: Se observa un mejor valor de respuesta del DBO₅ empleando como límite concentraciones de agente coagulante de 5% y floculante de 0.5%, ya que al aumentar dichas concentraciones se produce un efecto adverso en el parámetro medido, por lo tanto la materia orgánica presente en este se encontrará dispersa y como consecuencia el valor del DBO₅ obtenido no será el óptimo según la combinación.

4.4.3.6. OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA - DBO₅- COMBINACION 2.

Meta: minimizar DBO₅

Valor óptimo deseado = 72.78

La **Tabla 49**, muestra la optimización de respuesta de la demanda bioquímica de oxígeno para la combinación 2.

Tabla 50. Optimización de respuesta –DBO₅- Combinación 2

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Concentración agente coagulante	2.0	6.0	4.27
Concentración agente floculante	0.1	0.5	0.50
pH	8.0	9.0	8.98

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual minimiza DBO₅ sobre la región indicada.

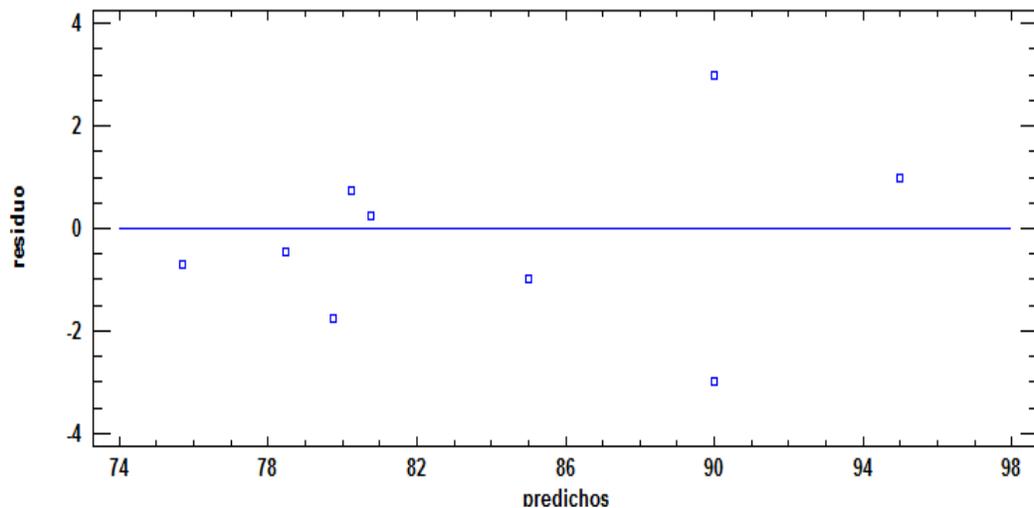


Figura 31. Gráfico de residuos – DBO₅- Combinación 2

INTERPRETACIÓN: En este parámetro las respuestas han sido en general buenas, ya que los puntos tienen al valor de residuo 0, es decir una variabilidad mínima que se observa también en el coeficiente de correlación.

4.4.4. OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES RESPUESTAS-COMBINACIÓN 2.

Datos/VARIABLES:

Sólidos suspendidos totales (mg/L)

Dureza total (mg CaCO₃/L)

DBO₅ (mg O₂/L)

Tabla 51. Valores observados de múltiples respuestas-combinación 2

<i>Respuesta</i>	<i>Mínimo Observado</i>	<i>Máximo Observado</i>
Sólidos suspendidos totales	120	155
Dureza total	9.52	11.76
DBO ₅	74	96

INTERPRETACION: La tabla 51 contiene los valores de respuesta bajos y altos registrados en el estudio.

Tabla 52. Deseabilidad – Variables - Combinación 2

<i>Respuesta</i>	<i>Deseabilidad Baja</i>	<i>Deseabilidad Alta</i>	<i>Meta</i>
Sólidos suspendidos totales	120	155	Minimizar
Dureza total	9.52	11.76	Minimizar
DBO ₅	74	96	Minimizar

Este procedimiento ayuda a determinar la combinación de los factores experimentales que simultáneamente optimiza varias respuestas.

La tabla 52 muestra la función de ‘deseabilidad’ evaluada en cada punto del diseño. Entre los puntos de diseño, la ‘deseabilidad’ máxima se alcanza en la ejecución 8 (tabla 52).

Tabla 53.*Deseabilidad óptima de la combinación 2*

I Fila	DBO₅	Dureza total	Sólidos suspendidos totales	Deseabilidad Prevista	Deseabilidad Observada
N 1	81.0	10.08	130.0	0.768427	0.714826
2	84.0	10.44	140.0	0.450253	0.516459
T 3	78.0	9.92	145.0	0.603294	0.576922
E 4	75.0	9.52	120.0	0.927394	0.984613
R 5	81.0	10.08	130.0	0.696333	0.714826
6	78.0	9.76	125.0	0.839124	0.855516
P 7	75.0	9.6	125.0	0.917364	0.924028
R 8	74.0	9.52	120.0	0.957394	1.0
E 9	75.0	9.6	125.0	0.917364	0.924028
10	78.0	9.76	130.0	0.839124	0.805072
T 11	93.0	11.48	155.0	0.219737	0.0
A 12	96.0	11.76	155.0	0.0	0.0
C 13	75.0	9.6	125.0	0.917364	0.924028
14	87.0	10.92	150.0	0.219737	0.279845
I 15	81.0	10.0	130.0	0.696333	0.725997

INTERPRETACION: En esta tabla según la deseabilidad observada se escogerá la dosis óptima en el estudio de los 15 ensayos, según los resultados integrados de las tres variables de respuesta experimentadas el ensayo 8 es el que el programa estadístico estableció como el ensayo óptimo de acuerdo a la tendencia experimental que se observó.

La **Figura 32**, muestra la superficie de respuesta estimada para la combinación 2.

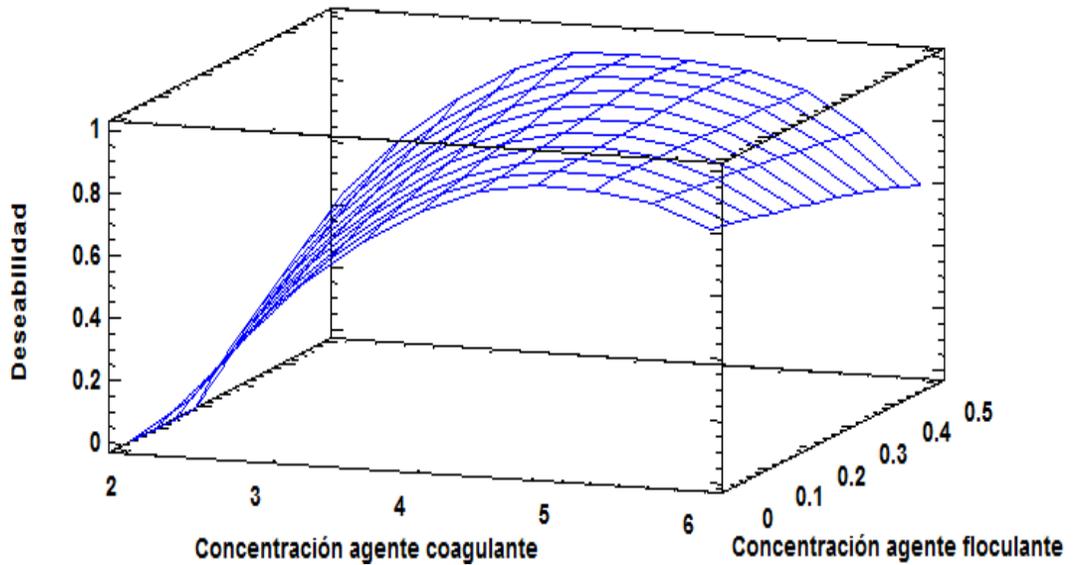


Figura 32. Superficie de respuesta estimada-combinación 2

INTERPRETACIÓN: Se observa la interacción de las dos variables determinantes en el estudio, a diferencia del estudio, el valor de deseabilidad tiene que tender a 1, integrando los resultados obtenidos y su fin en el estudio (minimizar valores), finalmente se obtiene la dosis ideal en base a los ensayos realizados.

Tabla 54.*Factores Óptimos-combinación 2*

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Concentración agente coagulante	2.0	6.0	4
Concentración agente floculante	0.1	0.5	0.5
pH	8.0	9.0	8

INTERPRETACIÓN: En la **Tabla 54**, se muestran los valores de los factores planteados, y en función de la deseabilidad mostrada en tabla (52) y gráfica (29) se obtiene la dosis óptima planteada por el programa Statgraphics Centurión.

Tabla 55.*Respuesta Óptima-combinación 2*

<i>Respuesta</i>	<i>Óptimo</i>
Sólidos suspendidos totales	120
Dureza total	9.52
DBO ₅	74

INTERPRETACIÓN: La tabla 55 muestra las respuestas planteadas por la dosis óptima a través del programa estadístico.

4.4.5. REMOCIÓN DE SST Y DBO₅ EN FUNCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LA COMBINACIÓN 2.

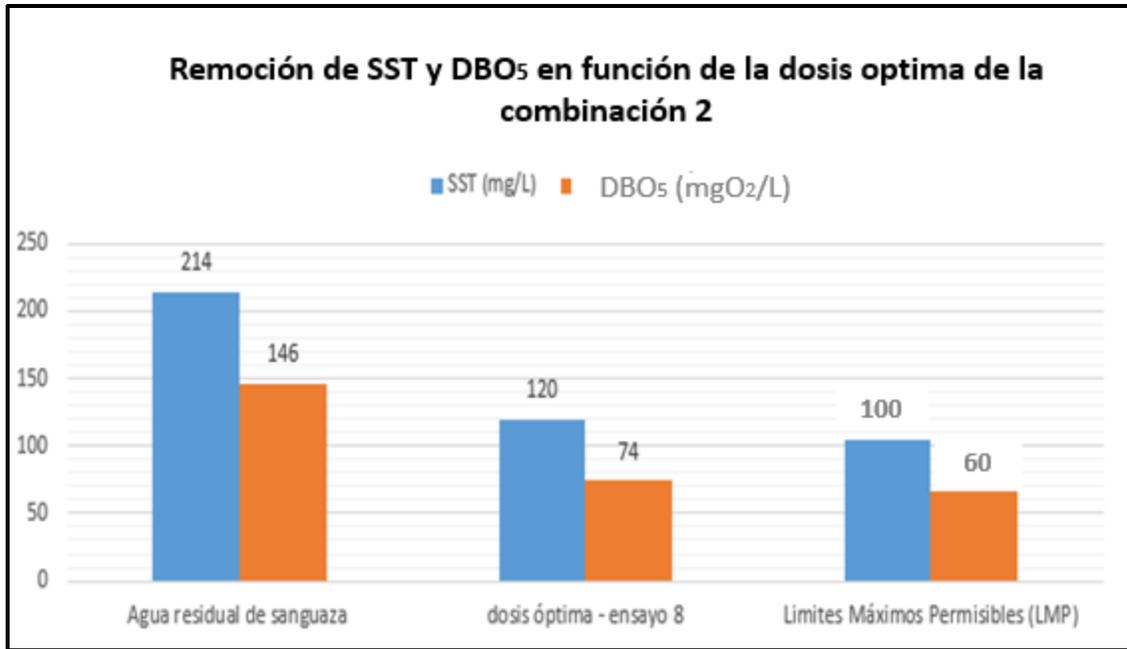


Figura 33. Remoción de SST y DBO₅ en función de la dosis óptima de la combinación 2

Los resultados obtenidos en el segundo diseño (agente coagulante: Mucílago de Tuna *Opuntia Ficus -Indica* - agente floculante: poliacrilamida), permitió definir la dosis óptima concentración de agente coagulante al 4% (dosificado a 100 ppm), concentración de agente floculante de 0.5% (dosificado a 100 ppm) y en pH de 8, se obtuvieron porcentajes de remoción de SST (43.93 %; desde 214mg/L hasta 120 mg/L) y DBO₅ (49.32 %; desde 146 mgO₂/L hasta 74 mgO₂/L)

Sin embargo cabe resaltar que industrialmente se complementa este proceso con una segunda etapa de difusión de aire a través de discos localizados en el contenedor DAF (Flotación por aire disuelto), por lo que el porcentaje de remoción de las variables estudiadas mejoraría.

4.4.6. REMOCIÓN DE DUREZA TOTAL EN FUNCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LA COMBINACION 2.

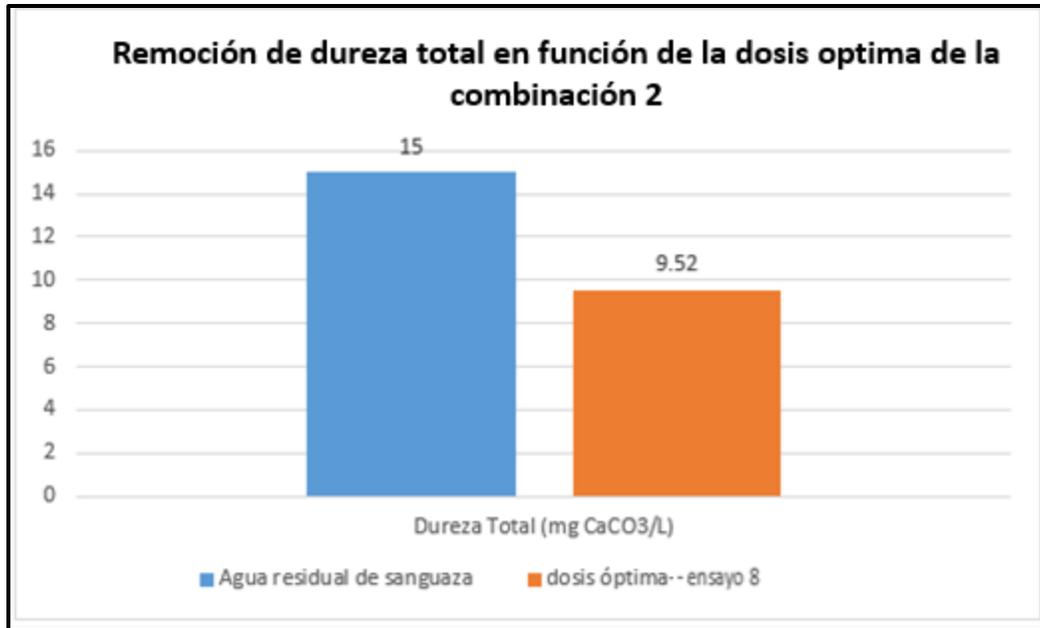


Figura 34. Remoción de dureza total en función de la dosis óptima de la combinación 2

En el parámetro de Dureza total se observó una leve disminución de este valor: dureza total (36.53%; desde 15 mgCaCO₃/L hasta 9.52 mgCaCO₃/L), por consecuencia de la reducción de la materia inorgánica a raíz del proceso de coagulación/floculación, por lo que no es un efecto significativo el que se produce por la dosis óptima del diseño y programa estadístico planteado.

4.5. SELECCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA

Se definió la dosis óptima del estudio mediante la aplicación de las herramientas del programa estadístico Statgraphics Centurion, comparando ambos diseños y expresándolos a través de los parámetros estudiados, obteniendo que el ensayo 4 (agente coagulante 4%, agente floculante, 0.5% y pH 9), de la combinación 1 presento los mejores valores del estudio.

- Agente Coagulante: Sulfato de Aluminio
- Agente Floculante: Almidón de yuca

Tabla 56. *Respuesta Óptima general del estudio*

<i>Respuesta</i>	<i>Agua de sanguaza</i>	<i>Efluente tratado (ensayo 4-combinacion 1)</i>
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	214	115
Dureza total (mg CaCO ₃)	15	9.36
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	146	72

Se presentan las respuestas en función a los valores iniciales del efluente y la dosis óptima obtenida en este estudio. El incluir un agente natural, en este caso, agente floculante (almidón de yuca) contribuye de igual manera a la remoción óptima de los parámetros mencionados, disminuyendo además la presencia de componentes químicos dañinos vertidos al litoral marino.

V. CONCLUSIONES

- Se evaluaron las variables independientes (agentes coagulantes, agentes floculantes y pH), a través de herramientas estadísticas del programa Statgraphics Centurión, tales como: análisis de varianza, diagrama de Pareto, gráfica de efectos principales, coeficiente de regresión, superficie de respuesta estimada y optimización de respuesta en donde se determinó en ambos diseños (mediante la tabla anova), que el agente coagulante es más determinante, seguido del agente floculante y menor medida el pH; además se evaluaron las variables dependientes (SST, DBO₅, dureza total), mediante la optimización de múltiples respuesta, para determinar la mejor dosis en ambos diseños, siendo para el combinación 1, la dosis 4 (agente coagulante 4%, agente floculante 0.5% y el del pH 9), y para el combinación 2, la dosis 8 (agente coagulante 4%, agente floculante 0.5% y el del pH 8).
- Se determinó la dosis óptima en ambas combinaciones: en la primera combinación (agente coagulante: Sulfato de Aluminio - agente floculante: Almidón de yuca), con una concentración de agente coagulante al 4%, agente floculante al 0.5% y un pH de 9, se obtuvieron porcentajes de remoción de SST (46.26%; desde 214 mg/L hasta 115 mg/L), dureza total (37.80%; desde 15 mgCaCO₃/L hasta 9.33 mgCaCO₃/L), y DBO₅ (50.68%, desde 146 mgO₂/L hasta 72 mgO₂/L), y en la segunda combinación (agente coagulante: Mucílago de Tuna Opuntia Ficus -Indica - agente floculante: poliacrilamida), con una concentración de agente coagulante al 4%, agente floculante de 0.5% y en pH de 8, se obtuvieron porcentajes de remoción de SST (43.93%; desde 214mg/L hasta 120 mg/L), dureza total (36.53%; desde 15 mgCaCO₃/L hasta 9.52 mgCaCO₃/L), y DBO₅ (49.32%; desde 146 mgO₂/L hasta 74mgO₂/L).

- Finalmente se determinó la dosis óptima del estudio entre las combinaciones planteados: la combinaciones 1 obtuvo resultados más cercanos: porcentajes de remoción de SST (46.26%; desde 214mg/L hasta 115 mg/L), dureza total (37.80%; desde 15 mgCaCO₃/L hasta 9.33 mgCaCO₃/L), y DBO₅ (50.68%; desde 146 mgO₂/L hasta 72 mgO₂/L), a los Límites Máximos Permisibles.

VI. RECOMENDACIONES

- Cuando se trabaja con un efluente, se debe tomar en cuenta, la etapa del proceso del tratamiento de aguas residuales en que es tomada la muestra y las características que posee, puesto que, influye en los valores de los parámetros fisicoquímicos estudiados, en medida que pueden aumentar mientras menos etapas haya transcurrido, en este estudio se trabajó con el efluente generado de la materia prima de anchoveta entera (*Engraulis Ringens*).
- Se sugiere realizar investigaciones empleando como agente floculante natural, el almidón, puesto que es una alternativa viable en el tratamiento de agua residual de sanguaza, alcanzado niveles de remoción de SST, Dureza Total y DBO₅ similares a la de los productos químicos empleados en la industria. Por otra parte los resultados obtenidos sugieren emplear dos agentes naturales con el fin de evaluar su interacción con respecto a otros agentes comerciales.
- Es importante el desarrollar estudios enfocados a la influencia del tamaño de la partícula de los agentes naturales empleados, evaluando de esta forma su influencia durante el tratamiento (diferencia del tamaño del tamiz empleado en su obtención).
- Se recomienda incluir parámetros de estudio adicionales como: temperatura, velocidad de agitación, velocidad de aireación entre otros, teniendo como referencia un plan estadístico en el que sea viable su evaluación, además de otros análisis de referencia como: turbidez, Demanda química de oxígeno, entre otros.
- También se sugiere investigar distintas etapas del proceso de tratamiento de efluente, tales como: cribado, remoción de aceites y grasas, flotación por aire disuelto, etc.
- Para la determinación de los parámetros estudiados se recomienda disponer de los equipos limpios, calibrados y en buen estado, como es el caso de la balanza analítica, pH metro, estufa, el electrodo del oxímetro, entre otros, con el fin de evitar variaciones en los resultados.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Public Health Association International. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th Edition. Washington, APHA, AWWA, WWCF, 1992. p. 2-56.
- American Public Health Association International. (2008). Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water.D 2035- 08.
- Andía, C. (2010). Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento de agua coagulación floculación. Sedapal, 1 - 44.
- Arboleda, J. (1992). Teoría y Práctica de la purificación del agua. Ed. Acodal. Colombia. 72p.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3a. ed). Bogotá: McGraw-Hill Interamericana,
- ASTM International. (2008). Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water.D 2035- 08. USA: ASTM.
- Christopher, H. M., Michael, P.S., & Doyle, G. G. (1995). In vitro acrylamide exposure alerts growth cone morphology. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 131 (1), 119-129.
- Chun-Yang, Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*. 45(1), 1437 - 1444.
- Cogollo, J., M., (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *DYNA*, 78 (165), 18 – 27.

- Crapper, D.R., Krishnan, S.S. & Dalton, A.J. (2001). Brain Aluminum Distribution In Alzheimer's Disease And Experimental Neurofibrillary Degeneration. *Science*, 180 (4085), 511-513.
- Daughlon & Christian., G. (2010). Quantitation of Acrylamide (and Polyacrylamide): Critical review of methods for trace determination/formulation analysis & Future-research recommendations. *EPA Environmental Sciences Division homepage*. The California Public Health Foundation.
- Dearfield, K.L., Auletta, A.E., Cimino, M.C., Moore, M.M. (2012). Considerations in the U.S. Environmental Protection Agency's testing approach for mutagenicity. *Mutat Res*, 258 (1). 259–283.
- Decreto Supremo N° 010-2008-PRODUCE .Límites máximos permisibles (LMP) para la Industria de Harina y Aceite de Pescado y Normas Complementarias.
- Degremont. (1991). *Water Treatment Handbook*. 6.(1), Francia.
- Del Valle, J. & Aguilera, J. (2008). Recovery of liquid By-Products from fish meal factories: A Review. *Process Biochemistry International*, 122-131.
- Delgado, C. V. (2016). *Evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos de floculantes naturales y químicos en 3 tipos de agua residual pre y post tratamiento*. (Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia). Recuperada de la base de datos 123.dox.
- Dogu, I. & Arol, A.I. (2004). Separation of dark-colored minerals from feldspar by selective flocculation using starch. *Powder Technol*, 139 (3), 258- 263.

- Ebeling, J., Rishel, K. & Sibrell, P. (2005). Screening and evaluation of polymers as flocculation aids for the treatment of aquacultural effluents. *Aquacultural Engineering*, 33(4), 235-49.
- Esquivel, P. (2004). Los frutos de las cactáceas y su potencial como materia prima. *Agronomía Mesoamericana*, 15(2), 215-219.
- Flaten, T.P. (2001). Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. *Brain Res. Bull.* 55(2), 187-196.
- Fuentes, L., Mendoza, I., Díaz, P., Fernández, Y., Zambrano, A., & Villegas, Z. (2012). Potencial coagulante de la tuna opuntia *Cochinellifera* (L.) Mill. (CACTACEAE) en aguas para consumo humano. *Centro de investigaciones biológicas*, 46 (2), 173-187.
- García B. (2007). *Metodología de extracciones in situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial* (Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, España). Recuperado de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12458/Tesis%20de%20Master_BEATRIZ%20GARCIA%20FAYOS.pdf?sequence=1.
- Guzmán, L., Villabona, A., Tejada, C., & Garcia, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales. *Rev. U.D.C.A. Actualidad & Divulgacion Cientifica*, 16(1), 253 - 262.
- Hernández-Medina, Marilyn, Torruco-Uco, Juan Gabriel, Chel-Guerrero, Luis, & Betancur-Ancona, David. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science and Technology*, 28(3), 718-726. <https://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612008000300031>.

- Hernández, I.; Gonzales, R.; Arriaga, M.; Aranda, J. & Barra, G. (2013). Clarificación de agua del arroyo el Hueleque de Poza Rica utilizando cal, sulfato de aluminio e hidroxiclorigenato de aluminio. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9 (1), 1-10.
- Järnström, L., Lason, L., Rigdahl, M. (1995). Flocculation in kaolin suspensions induced by modified starches 1. Cationically modified starch- effects of temperatura and ionic strength. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Engineering Aspects*, 104 (2-3), 191-205.
- Landeo, G. & Ruiz, A. (2006). *Producción de harina de pescado*. p. 153.
- Llano, B., Cardona, J., Ocampo, D. & Ríos, L. (2014). Tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio de arcillas y alternativas de uso de los lodos generados en el proceso. *Información tecnológica*, 25(3), 73-82 Doi: 10.4067/S0718-07642014000300010.
- Martínez, S. (2010). *Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. México: Edit. Universidad Autónoma Metropolitana. Recuperado de http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/1795/Parametros_de_disenos_de_sistemas_ALTO_Azcapotzalco.pdf?sequence=1.
- Martínez García, J., & González Silgado, L. (2012). *Evaluación del poder coagulante de la tuna (opuntia ficus indica) para la remoción de turbidez y color en aguas cruda*, Universidad de Cartagena, Colombia. (Tesis de ingeniería, Universidad de Cartagena, Colombia). Recuperada de <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/137>.
- Miller, R.G., Kopfler, K.C.; Kelty, J.A., Stober, N.S. (2010). The occurrence of aluminium in drinking water. *J Am. Water Workers Assoc.*, 76, 84-91.

- Nieto, C., & Orellana, V. (2011). *Aplicación del quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante*. (Trabajo de grado, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca).
- Ojeda, L. F. (2012). *Determinación de la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del Tropaeolum Tuberosum, en el tratamiento de agua cruda de la planta de Puengasí de la Epmaps*. (Tesis de grado). Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/3866/1/UPS-QT03424.pdf>.
- Olivero, R. E., Aguas, Y., Mercado, I. D., Casas, D. P. & Montes, L.E. (2014). Utilización de Tuna (opuntia ficus-indica) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. *Avances Investigación en Ingeniería*, 11 (1), 70-75.
- Pesca Perú (2015). Informe de análisis de los efluentes. Composición de sanguaza y agua de bombeo. Departamento de aseguramiento de la calidad. Pesca Perú. U.O 3411. Informe, Lima. 50p.
- Peña, L. E., Muñoz, M. & Espinosa, A.M. (2001). Tratamiento de aguas residuales y su impacto ambiental sobre un ecosistema. *Con-Ciencias* (3), 91-112.
- Quispe, H. (2012). *Aplicación del mucílago extraído de nopal (opuntia ficus- indica) en la clarificación del agua del río Uchusuma* (Tesis de grado). Universidad nacional Jorge Basadre Grohman, Tacna.
- Ramírez, M. L., Suárez, J. D., Ramírez, J. F. (2011). Evaluación de las propiedades floculantes de Malvaviscus arboreus, Heliocarpus popayanensis e Hylocereus undatus para clarificación de aguas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 2 (2), 33 – 42.
- Ramírez, H. & Jaramillo, J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Facultad de Ciencias Básicas*, 11 (2), 136-153.

- Reina, C., Barrero, C. & Diego. (1996). Manejo pos cosecha y Evaluación de la Calidad para la yuca (*Manihot esculenta*), que se comercializa en la ciudad de Neiva. Universidad Sur Colombiana, Facultad de Ingeniería, Colombia 120p.
- Rodríguez-González, S., Martínez-Flores, H. E., Órnelas-Núñez, J. L., Garnica-Romo, M. G. (2010). Optimización de la extracción del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*), XIV congreso nacional de biotecnología y bioingeniería, México. Recuperado de <http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/queretaro11/TRABAJOS/trabajos/III/carteles/CIII-71.pdf>.
- Ruiz, H. F., & Guerrero, B. J. A. (2009). *Aplicación de las películas comestibles a base de quimostato y mucílago de nopal en fresa (Fragaria ananasa) en refrigeración*. Tesis de maestría. Ciencia en alimentos. Universidad de las Américas Puebla. Puebla. p. 21-23.
- Sáenz, C., Berger, H., Corrales, J., Galletti, L., García, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez, A., Sepúlveda, A. & Varnero, M. (2006). Boletín de servicios agrícolas de la FAO 162. Utilización agroindustrial del nopal. Roma. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Sciban, M., Klasnja, M., Antov, M., & Skrbic., B. (2009). Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource Technology*, 100 (24), 6639 – 6643.
- Shogren, R. (2009). Flocculation of kaolin by waxy maize starch phosphates. *Carbohydrate Polymers*, 76(1), 639–644.
- Solís, R. S., Canepa, J. L., & Barajas, J. H. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 229-236. Recuperado de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300005.

- United States Environmental Protection Agency. Cincinnati. (2015). Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes.
- Villabona, A.; Paz, I. & Martínez, J. (2013). Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 5(1), 137-144.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1. RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA DE SANGUAZA



Fotografía 1: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales



Fotografía 2: Poza de emisión de efluentes



Fotografía 3: Contenedor (efluente)

ANEXO 2. AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES QUÍMICOS



Fotografía 4: Agente coagulante químico (sulfato de aluminio)



Fotografía 5: Agente floculante químico (Poliacrilamida)

ANEXO 3. OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA

Fotografía 6: Obtención del almidón de yuca.



Materia prima: yuca.



Lavado de la yuca.



Pelado de la yuca.



Cortado en trozos.



Rallado.



Filtrado.



Sedimentado.



Secado.



Almidón de yuca en polvo.

ANEXO 4. OBTENCIÓN DEL MUCILAGO DE OPUNTIA FICUS INDICA

Fotografía 7: Obtención del mucilago de opuntia ficus indica.



Nopal de la tuna



Lavado y despinado



Troceado



Calentamiento 78-80°C



Filtración



Líquido con mucilago



Fibras del nopal



Adición de alcohol etílico y calentar



Mucilago en polvo obtenido



Secado en la estufa a 70°C



ANEXO 5. TEST DE JARRAS

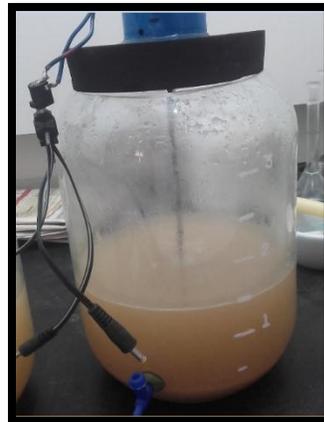
Fotografía 8: Equipo reactor adaptado para realizar el test de jarras



El contenedor empleado cumple con la función de mantener a el agua de sanguaza a las condiciones estables descritas en el diseño experimental, y brindarle mediante el agitador de turbina la velocidad necesaria (indicada también en el diseño experimental) para realizar la difusión de los agentes empleados, así mismo permitió realizar de forma adecuada el desarrollo de los ensayos programados, evaluando la variación de las variables propuestas (SST, Dureza Total y DBO_5)

Especificaciones:

- Equipo reactor adaptado de capacidad de 3 L. de volumen de trabajo.
- Dimensiones: 14 cm (base-diámetro) y 25 cm (altura)
- Agitador de turbina de hoja curva
- Velocidad ajustable de 40 a 200 rpm (motor eléctrico de 6 voltios)



ANEXO 6. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Fotografía 9: Análisis de SST



Muestra de agua se sanguaza tratada.



Filtrado de la muestra (50ml).



Medición de la muestra (50ml).



Secado a 115°C.



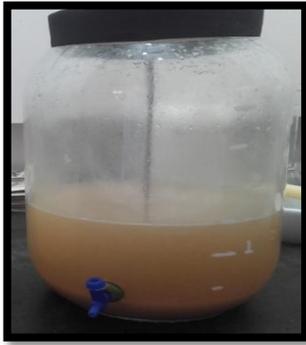
Muestra seca en la campana desecadora.



Pesado.

ANEXO 6. DETERMINACIÓN DE LA DUREZA TOTAL

Fotografía 10: Dureza Total



Muestra de agua de sanguaza tratada.



Filtrado de la muestra (25ml).



Establecer el pH de la muestra



Agregar indicador EBT.



Se torna de un color granate.



Titulación de un color granate hasta un color azul vino.



Color azul vino

ANEXO 7. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO

Fotografía 11: Demanda Bioquímica de Oxígeno



Muestra de agua tratada en el vaso winkler.



Agregar reactivos: 1ml de sulfato de manganeso 4%, 1ml de I_2/KI , 1 ml de H_2SO_4 .



Homogenizar



Cubrir y guardar en un lugar oscuro el vaso winkler.



Titulación con sulfato de sodio hasta un color transparente.

ANEXO 8. NIVELES RECOMENDADOS DE AGENTES COAGULANTES Y FLOCULANTES



INFORME N° 01 – 2015 / QASAC – TA

Para: Ing. Christian Bhoy
Jefe de Planta

De: Ricardo Palma Martín

Fecha: 07/10/2015

Asunto: Informe de las Prueba de Jar – Test - Área de Tratamiento de Agua

CONSIDERACIONES INICIALES

Fecha de visita: 7 de Octubre del 2015

1. Toma de muestra
2. Bateria de productos
3. Pruebas de Jar - Test
4. Consideraciones finales
5. Evaluación Económica

1. TOMA DE MUESTRAS:

Realizado el martes 07 de Octubre del 2015

- Se tomó las muestras del pozo de agua residual.

2. BATERIA DE PRODUCTOS

Productos Químicos	Concentración (%)
Floculante Anionico (Eflac A1)	0.1 - 0.5
Coagulante (QA-100 PAC)	2 - 6



QUIMICA ANDERS S.A.C.
Las Banderas 101 Urb. Valle de los Andes - Písa - Ene. (011) 4120230 - Fax: (011) 4120230 - qaru@quimica.com

www.quimica.com