

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Evaluación de concentraciones de coagulante y floculante en un
proceso de tratamiento de agua para la elaboración de cerveza

Trabajo de graduación en modalidad tesis presentado por Carmen Noelia
Cáceres Gonon para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería
Química

Guatemala
2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Evaluación de concentraciones de coagulante y floculante en un
proceso de tratamiento de agua para la elaboración de cerveza

Trabajo de graduación en modalidad tesis presentado por Carmen Noelia
Cáceres Gonon para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería
Química

Guatemala
2021

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Carlos René Gil Pineda

Tribunal Examinador

(f) 
Ing. Carlos René Gil Pineda

(f) 
M. Sc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 
MSc & MBA Luis Ernesto Núñez Gonzales

Fecha de aprobación: Guatemala 23 de febrero 2021

PREFACIO

*“Lo importante es no dejar de cuestionarse.
La curiosidad tiene su propia razón de ser”
-Albert Einstein.*

Este trabajo inició al encontrarme en una industria la cual tenía la necesidad de estandarizar un proceso que inicialmente lo controlaban únicamente con muestreo constante. Con este estudio se buscó encontrar cantidades estándar de reactivos para dicho proceso. Encontré algunas dificultades en el camino como el largo tiempo que se requería para realizar cada prueba y la inexperiencia que me afectó al inicio; sin embargo, encontré un gran apoyo en los ingenieros y operarios de dicha industria y espero poder haber devuelto en resultados todo ese apoyo que se me brindó.

Agradezco sobre todo a Dios, por darme la sabiduría, templanza y fuerza para poder realizar este trabajo y por poner en mi camino siempre personas que aportan cosas buenas a mi vida.

Agradezco a mis padres Nelson Cáceres Toledo y Victoria del Carmen Gonon Ardón por siempre ser mi mayor apoyo y soporte, por confiar en mí incluso cuando yo no lo hacía. Por siempre motivarme y animarme, hasta cuando estaba en momentos de mucho estrés. Por darme tanta seguridad, amor y consejos invaluable. Agradezco que siempre me guiaran por el mejor camino, ya que todo lo que soy se lo debo a ustedes.

Agradezco a mi familia en general y amigos que estuvieron pendientes del proceso de este trabajo. Gracias por cada palabra de aliento, consejo y ayuda que me brindaron, sin ustedes esto tampoco sería posible. Especialmente a César Catalán, por su ayuda durante la ejecución del trabajo.

A mi asesor Ing. Carlos René Gil Pineda, por sus concejos académicos y por compartir su conocimiento conmigo. Por tomarse el tiempo de enseñar un trabajo no solo a mí si no a muchos otros jóvenes que iniciamos en el camino de la ingeniería.

A los ingenieros en general y operarios de la industria en la que realicé el presente proyecto, por siempre brindarme ayuda, soporte y consejo. Especialmente para el Ing. Harry Pérez, Max, don Elías y don Francisco. Finalmente, agradezco al Ing. Luis Núñez, por toda la ayuda y consejo durante la investigación de este proyecto, por guiarme por el mejor camino para obtener los mejores resultados.

Índice

| | |
|---|------|
| PREFACIO | V |
| LISTA DE CUADROS | VIII |
| LISTA DE FIGURAS | XII |
| RESUMEN | XVII |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. OBJETIVOS..... | 3 |
| A. General..... | 3 |
| B. Específicos..... | 3 |
| III. JUSTIFICACIÓN | 4 |
| IV. MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| A. Historia de la cerveza | 6 |
| B. Materia Prima | 7 |
| C. Proceso..... | 9 |
| D. El agua y su uso como materia prima | 10 |
| E. Doble capa eléctrica..... | 10 |
| F. Coagulación-Floculación | 12 |
| G. Alcalinidad..... | 16 |
| H. Dureza | 19 |
| I. Turbidez | 19 |
| J. Prueba de Jarras..... | 21 |
| K. Policloruro de aluminio..... | 21 |
| L. Proceso industrial utilizado..... | 22 |
| M. Impacto ambiental de residuos | 23 |
| N. Alternativas para tratamiento de agua..... | 24 |
| V. METODOLOGÍA | 25 |
| A. Observaciones..... | 25 |
| B. Materiales | 25 |
| C. Metodología..... | 26 |
| VI. RESULTADOS | 30 |

| | | |
|-------|--|-----|
| A. | Agua cruda utilizada..... | 30 |
| B. | Cambios en dureza y alcalinidad del agua tratada. | 32 |
| C. | Cambios en el pH del agua tratada, antes de su estandarización. | 38 |
| D. | Turbidez del agua tratada después de su filtración..... | 40 |
| E. | Resultados de alcalinidad, desviación estándar, turbidez y pH..... | 42 |
| F. | Dureza y alcalinidad removida..... | 44 |
| G. | Comparación agua cruda y agua tratada | 46 |
| H. | Análisis de costos | 64 |
| VII. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 66 |
| VIII. | MANUAL..... | 76 |
| A. | Inventario del equipo “agitador para floculación Jar test” | 76 |
| B. | Procedimiento para la operación del equipo..... | 77 |
| IX. | CONCLUSIONES | 87 |
| X. | RECOMENDACIONES..... | 89 |
| XI. | BIBLIOGRAFÍA..... | 90 |
| XII. | APÉNDICE | 92 |
| A. | Cálculos de muestra..... | 92 |
| B. | Análisis de error | 95 |
| C. | Datos originales..... | 96 |
| D. | Datos calculados | 104 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Propiedades del agua cruda primera prueba de 338 ppm de coagulante | 30 |
| Cuadro 2. Propiedades del agua cruda segunda prueba de 338 ppm de coagulante | 30 |
| Cuadro 3. Propiedades del agua cruda tercera prueba de 338 ppm de coagulante | 30 |
| Cuadro 4. Propiedades del agua cruda primera prueba de 358 ppm de coagulante | 30 |
| Cuadro 5. Propiedades del agua cruda segunda prueba de 358 ppm de coagulante | 31 |
| Cuadro 6. Propiedades del agua cruda tercera prueba de 358 ppm de coagulante | 31 |
| Cuadro 7. Propiedades del agua cruda primera prueba de 378 ppm de coagulante | 31 |
| Cuadro 8. Propiedades del agua cruda segunda prueba de 378 ppm de coagulante | 31 |
| Cuadro 9. Propiedades del agua cruda tercera prueba de 378 ppm de coagulante | 31 |
| Cuadro 10. Propiedades del agua cruda primera prueba de 398 ppm de coagulante | 31 |
| Cuadro 11. Propiedades del agua cruda segunda prueba de 398 ppm de coagulante | 32 |
| Cuadro 12. Propiedades del agua cruda tercera prueba de 398 ppm de coagulante | 32 |
| Cuadro 13. Análisis estadístico del agua cruda utilizada para las pruebas con 338 ppm | 42 |
| Cuadro 14. Análisis estadístico de las propiedades obtenida al comparar los resultados con las mismas concentraciones para las pruebas a 338 ppm de coagulante. | 42 |
| Cuadro 15. Análisis estadístico del agua cruda utilizada para las pruebas con 358 ppm | 43 |
| Cuadro 16. Análisis estadístico de las propiedades obtenidas al comparar los resultados con las mismas concentraciones para las pruebas a 358 ppm de coagulante | 43 |
| Cuadro 17. Análisis estadístico del agua cruda utilizada para las pruebas con 378 ppm | 43 |
| Cuadro 18. Análisis estadístico de las propiedades obtenidas al comparar los resultados con las mismas concentraciones para las pruebas a 378 ppm de coagulante. | 43 |
| Cuadro 19. Análisis estadístico del agua cruda utilizada para las pruebas con 398 ppm | 44 |
| Cuadro 20. Análisis estadístico de las propiedades obtenidas al comparar los resultados con las mismas concentraciones para las pruebas a 398 ppm de coagulante | 44 |
| Cuadro 21. Análisis estadístico para todas las aguas crudas utilizadas en todas las pruebas. | 44 |
| Cuadro 22. Dureza y alcalinidad removidas en (ppm) para la prueba con 338 ppm de cal. | 44 |
| Cuadro 23. Dureza y alcalinidad removidas en (ppm) para la prueba con 358 ppm de cal. | 45 |
| Cuadro 24. Dureza y alcalinidad removidas en (ppm) para la prueba con 378 ppm de cal. | 45 |
| Cuadro 25. Dureza y alcalinidad removidas en (ppm) para la prueba con 398 ppm de cal. | 45 |

| | |
|--|-----|
| Cuadro 26. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 338 ppm y 21 ppm. | 64 |
| Cuadro 27. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 338 ppm y 23 ppm. | 64 |
| Cuadro 28. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 358 ppm y 21 ppm. | 64 |
| Cuadro 29. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 358 ppm y 23 ppm. | 65 |
| Cuadro 30. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 398 ppm y 23 ppm. | 65 |
| Cuadro 31. Densidad del floculante y coagulante | 96 |
| Cuadro 32. Variables medidas del proceso actual | 96 |
| Cuadro 33. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 38 ppm de coagulante | 96 |
| Cuadro 34. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 338 ppm de coagulante..... | 96 |
| Cuadro 35. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 338 ppm de coagulante | 96 |
| Cuadro 36. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 338 ppm de coagulante | 97 |
| Cuadro 37. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 338 ppm de coagulante | 97 |
| Cuadro 38. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 338 ppm de coagulante | 97 |
| Cuadro 39. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 358 ppm de coagulante..... | 97 |
| Cuadro 40. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 358 ppm de coagulante..... | 98 |
| Cuadro 41. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 358 ppm de coagulante | 98 |
| Cuadro 42. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 358 ppm de coagulante | 98 |
| Cuadro 43. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 358 ppm de coagulante | 98 |
| Cuadro 44. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 358 ppm de coagulante..... | 99 |
| Cuadro 45. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 378 ppm de coagulante | 99 |
| Cuadro 46. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 378 ppm de coagulante..... | 99 |
| Cuadro 47. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 378 ppm de coagulante | 99 |
| Cuadro 48. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 378 ppm de coagulante | 100 |
| Cuadro 49. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 378 ppm de coagulante | 100 |
| Cuadro 50. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 378 ppm de coagulante..... | 100 |
| Cuadro 51. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 398 ppm de coagulante..... | 100 |

| | |
|--|-----|
| Cuadro 52. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante..... | 101 |
| Cuadro 53. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 398 ppm de coagulante | 101 |
| Cuadro 54. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante..... | 101 |
| Cuadro 55. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 398 ppm de coagulante | 101 |
| Cuadro 56. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante..... | 102 |
| Cuadro 57. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 418 ppm de coagulante..... | 102 |
| Cuadro 58. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante..... | 102 |
| Cuadro 59. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 418 ppm de coagulante | 102 |
| Cuadro 60. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante | 103 |
| Cuadro 61. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 418 ppm de coagulante | 103 |
| Cuadro 62. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante..... | 103 |
| Cuadro 63. Precio de los reactivos utilizados en Q/ kg de reactivo..... | 103 |
| Cuadro 64. Condiciones de operación actuales de cada reactor..... | 104 |
| Cuadro 65. Peso requerido de coagulante para cada concentración..... | 104 |
| Cuadro 66. Volumen de floculante requerido para cada concentración y para alícuota madre de 100 ml | 104 |
| Cuadro 67. Propiedades del agua tratada primera prueba de 338 de coagulante | 104 |
| Cuadro 68. Propiedades del agua tratada segunda prueba de 338 de coagulante..... | 105 |
| Cuadro 69. Propiedades del agua tratada tercera prueba de 338 de coagulante..... | 105 |
| Cuadro 70. Propiedades del agua tratada primera prueba de 358 de coagulante | 105 |
| Cuadro 71. Propiedades del agua tratada segunda prueba de 358 de coagulante..... | 105 |
| Cuadro 72. Propiedades del agua tratada tercera prueba de 358 de coagulante..... | 106 |
| Cuadro 73. Propiedades del agua tratada primera prueba de 378 de coagulante | 106 |
| Cuadro 74. Propiedades del agua tratada segunda prueba de 378 de coagulante..... | 106 |
| Cuadro 75. Propiedades del agua tratada tercera prueba de 378 de coagulante..... | 106 |
| Cuadro 76. Propiedades del agua tratada primera prueba de 398 de coagulante | 107 |
| Cuadro 77. Propiedades del agua tratada segunda prueba de 398 de coagulante..... | 107 |
| Cuadro 78. Propiedades del agua tratada tercera prueba de 398 de coagulante..... | 107 |

| | |
|--|-----|
| Cuadro 79. Costos generados para las diferentes concentraciones de polímero para un año de producción, utilizando los flujos de los reactores y asumiendo que se producirá agua tratada 15 horas al día 365 días al año. | 107 |
| Cuadro 80. Costos generados para las diferentes concentraciones de cal hidratada para un año de producción, utilizando los flujos de los reactores y asumiendo que se producirá agua tratada 15 horas al día 365 días al año. | 108 |
| Cuadro 81. Costos generados por el uso de una solución de ácido clorhídrico al 25% m/m para neutralizar los carbonatos disueltos en el agua, después del tratamiento, para las pruebas trabajadas con 338 ppm de cal. | 108 |
| Cuadro 82. Costos generados por el uso de una solución de ácido clorhídrico al 25% m/m para neutralizar los carbonatos disueltos en el agua, después del tratamiento, para las pruebas trabajadas con 358 ppm de cal. | 108 |
| Cuadro 83. Costos generados por el uso de una solución de ácido clorhídrico al 25% m/m para neutralizar los carbonatos disueltos en el agua, después del tratamiento, para las pruebas trabajadas con 378 ppm de cal. | 109 |
| Cuadro 84. Costos generados por el uso de una solución de ácido clorhídrico al 25% m/m para neutralizar los carbonatos disueltos en el agua, después del tratamiento, para las pruebas trabajadas con 398 ppm de cal. | 109 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura A. Doble capa eléctrica de una molécula | 11 |
| Figura B. Potencial eléctrico entre dos partículas cargadas. | 12 |
| Figura C. Doble capa eléctrica difusa y del mecanismo de generación de la fuerza de repulsión. | 13 |
| Figura D. (a) Floculación por puentes, (b) Representación de la neutralización de las cargas | 14 |
| Figura E. Diagrama de floculación para polímeros. | 15 |
| Figura F. Flóculos de carbonato de calcio. | 16 |
| Figura G. Equilibrio bicarbonato-bicarbonato-carbonato | 17 |
| Figura H. Porcentaje de remoción de carbonatos disueltos en el agua al aumentar la cantidad de coagulante en la mezcla. | 18 |
| Figura I. Eficiencia de remoción de turbidez y tamaño final de los flóculos, respecto a los distintos intervalos de tiempo | 20 |
| Figura K. Planta de tratamiento de agua | 22 |
| Figura 1. Condiciones finales obtenida en la primera prueba utilizando 338 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 32 |
| Figura 2. Condiciones finales obtenida en la segunda prueba utilizando 338 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 33 |
| Figura 3. Condiciones finales obtenida en la tercera prueba utilizando 338 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 33 |
| Figura 4. Condiciones finales obtenida en la primera prueba utilizando 358 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 34 |
| Figura 5. Condiciones finales obtenida en la segunda prueba utilizando 358 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 34 |
| Figura 6. Condiciones finales obtenida en la tercera prueba utilizando 358 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 35 |
| Figura 7. Condiciones finales obtenida en la primera prueba utilizando 378 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 35 |
| Figura 8. Condiciones finales obtenida en la segunda prueba utilizando 378 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 36 |
| Figura 9. Condiciones finales obtenida en la tercera prueba utilizando 378 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 10. Condiciones finales obtenida en la primera prueba utilizando 398 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 37 |
| Figura 11. Condiciones finales obtenida en la segunda prueba utilizando 398 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 37 |
| Figura 12. Condiciones finales obtenida en la tercera prueba utilizando 398 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero. | 38 |
| Figura 14. Comportamiento de pH al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 358 ppm | 39 |
| Figura 16. Comportamiento de pH al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 398 ppm | 40 |
| Figura 18. Comportamiento de la turbidez al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 358 ppm | 41 |
| Figura 19. Comportamiento de la turbidez al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 378 ppm | 41 |
| Figura 20. Comportamiento de la turbidez al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 398 ppm | 42 |
| Figura 21. Comparación de la dureza del agua cruda con la del agua tratada 338 ppm de coagulante. | 46 |
| Figura 23. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 46 |
| Figura 22. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 46 |
| Figura 25. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 47 |
| Figura 24. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 47 |
| Figura 27. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 47 |
| Figura 26. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 47 |
| Figura 28. Comparación de la alcalinidad del agua cruda con la del agua tratada 338 ppm de coagulante. | 48 |
| Figura 29. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 30. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 48 |
| Figura 31. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 49 |
| Figura 32. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 49 |
| Figura 33. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 49 |
| Figura 34. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante | 49 |
| Figura 35. Comparación de la turbidez del agua cruda con la del agua tratada 338 ppm de coagulante. | 50 |
| Figura 36. Comparación de la dureza del agua cruda con la del agua tratada 358 ppm de coagulante. | 50 |
| Figura 38. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 51 |
| Figura 37. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 51 |
| Figura 40. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 51 |
| Figura 39. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 51 |
| Figura 42. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 52 |
| Figura 41. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 52 |
| Figura 43. Comparación de la alcalinidad del agua cruda con la del agua tratada 358 ppm de coagulante. | 52 |
| Figura 44. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 53 |
| Figura 45. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 53 |
| Figura 46. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 53 |

| | |
|--|----|
| Figura 47. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 53 |
| Figura 49. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 54 |
| Figura 48. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante | 54 |
| Figura 50. Comparación de la turbidez del agua cruda con la del agua tratada 358 ppm de coagulante. | 54 |
| Figura 51. Comparación de la dureza del agua cruda con la del agua tratada 378 ppm de coagulante. | 55 |
| Figura 52. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 55 |
| Figura 53. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 55 |
| Figura 54. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 56 |
| Figura 55. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 56 |
| Figura 56. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 56 |
| Figura 57. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 56 |
| Figura 58. Comparación de la alcalinidad del agua cruda con la del agua tratada 378 ppm de coagulante. | 57 |
| Figura 60. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 57 |
| Figura 59. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 57 |
| Figura 62. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 58 |
| Figura 61. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 58 |
| Figura 63. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 64. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante | 58 |
| Figura 65. Comparación de la turbidez del agua cruda con la del agua tratada 378 ppm de coagulante. | 59 |
| Figura 66. Comparación de la dureza del agua cruda con la del agua tratada 398 ppm de coagulante. | 59 |
| Figura 68. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 60 |
| Figura 67. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 60 |
| Figura 69. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 60 |
| Figura 70. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 60 |
| Figura 72. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 61 |
| Figura 71. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 61 |
| Figura 73. Comparación de la alcalinidad del agua cruda con la del agua tratada 398 ppm de coagulante. | 61 |
| Figura 75. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 62 |
| Figura 74. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 62 |
| Figura 76. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 62 |
| Figura 77. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 62 |
| Figura 78. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 63 |
| Figura 79. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante | 63 |
| Figura 80. Comparación de la turbidez del agua cruda con la del agua tratada 398 ppm de coagulante. | 63 |

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue el de determinar las mejores concentraciones de floculante y coagulante para que el agua utilizada en la elaboración de cerveza cumpla con los estándares de calidad de dureza, alcalinidad por bicarbonato y por carbonatos, acidez (pH) y turbidez mediante la variación de ambos reactivos y comparación de los resultados. Para esto se utilizó un método de prueba de jarras, con equipo de jarras agitadas marca Ethink Technology, titulaciones con indicadores colorimétricos, potenciómetro y turbidímetro. El floculante utilizado es un polímero de clorhidróxido de aluminio al 50%, mientras que el coagulante usado fue hidróxido de calcio hidratado. Las concentraciones evaluadas de floculante fueron de 15 ppm a 25 ppm variando 2 ppm entre cada una, y las concentraciones evaluadas de coagulante fueron de 338 ppm a 398 ppm, variado 20 ppm entre cada una de las pruebas. Al analizar los resultados obtenidos con los métodos y equipos mencionados, se obtuvieron gráficas con tendencias a un valor mínimo de todas las propiedades. Se determinó con un análisis estadístico que los resultados obtenidos fueron precisos por lo que las pruebas pueden ser comparables entre sí. Mediante un análisis de costos y de los parámetros mencionados se determinó que para el tipo de agua cruda analizada la mejor combinación de floculante y coagulante es de 23 ppm y 338 ppm respectivamente.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se busca encontrar la mejor combinación de concentraciones de coagulante y floculante, para que el agua de proceso, después de pasar por el tratamiento, tengan la calidad requerida para la elaboración de Cerveza. Las propiedades analizadas para determinar la calidad fueron: dureza, alcalinidad por ácidos carbónicos, alcalinidad por carbonatos, pH y turbidez. En este proceso se utilizó hidróxido de calcio hidratado y un polímero de clorhidróxido de aluminio como floculante.

El agua cruda contiene una alcalinidad en forma de bicarbonato, por lo que al entrar en contacto con el hidróxido de calcio se da una reacción de neutralización, donde se forma la sal carbonato de calcio y agua. Al tener una gran cantidad de CaCO_3 , esta forma pequeños precipitados, los cuales están cargados positivamente y al encontrarse en una solución básica se rodean mayormente de iones negativos, por lo que su doble capa tiende a tener una densidad de carga negativa. Al agregar el floculante que es un polielectrolito catiónico, el cual está hecho de clorhidróxido de aluminio y tener una alta agitación, los sitios positivos del polímero se adsorben a los pequeños precipitados de carbonato de calcio y forman puentes con otras cadenas de polímeros para formar lo que se le conoce como flóculos. Sin embargo, el floculante necesita tener espacios positivos libres, por lo menos la mitad de ellos, para poder crear estos puentes con las demás cadenas y así formar estos flóculos. Por lo tanto, al tener una sobre saturación de carbonato de calcio se llenarían todos los espacios positivos del polímero, por lo que no sería posible crear los flóculos y si se tiene el escenario contrario igualmente la cantidad de flóculos es menor.

Para poder determinar las concentraciones de cal activada y floculante adecuadas para obtener la mejor velocidad y proporción de floculación. Se mantuvo la concentración de coagulante constante durante 3 pruebas seguidas y en cada jarra se colocó en una concentración distinta de floculante. Esto se repitió para una de las concentraciones a evaluar de coagulante. Se tuvo una agitación rápida por 1 minuto para que se dieran los choques necesarios para la adsorción del polímero en el carbonato de calcio, y luego una agitación lenta para permitir que se creen los puentes entre los polímeros cargados y crear los flóculos. Luego se dejó sedimentar por 15 a 20 minutos para que se asentarán bien los flóculos y se tomaron las muestras. Las muestras fueron filtradas con papel filtro y luego analizadas mediante titulaciones con indicadores colorimétricos dependiendo del pH al que se quiera llegar. Para la dureza se utilizó un buffer amoniacal y negro de eriocromo T como indicador, para la alcalinidad por bicarbonato se utiliza naranja de metileno y para la alcalinidad por hidróxidos y carbonatos se utilizó la fenolftaleína. Para medir un pH se utilizó un potenciómetro y para la turbidez un turbidímetro.

Las gráficas obtenidas muestran la tendencia que se obtuvo donde todas las pruebas tienen un punto donde se tiene una mayor remoción de carbonato de calcio, por lo que se dio una mejor floculación del medio. Es decir, si se alcanza la mejor proporción de concentraciones de cada reactivo. Al hacer un análisis de costos y de los valores de las propiedades obtenidas, se determinó que la mejor opción para el tipo de agua cruda utilizada es de 338 ppm de cal hidratada y 23 ppm de floculante. Además, se hizo un análisis del agua cruda utilizada para todas las pruebas donde se tuvo desviaciones estándar de aproximadamente 10 ppm de dureza y alcalinidad, por lo que al agua en este rango se le pueden aplicar estas proporciones de coagulante y floculante, sin embargo, si las condiciones de agua cruda cambian, se debería realizar nuevamente otro estudio igual para determinar cuáles son las mejores condiciones.

II. OBJETIVOS

A. General

Determinar las concentraciones de coagulante y floculante, en el tratamiento de agua de proceso, para que cumpla con los estándares de calidad para la elaboración de cerveza utilizando el método de prueba de jarras, variando las concentraciones de los reactivos y comparándolo con los datos de operación actuales.

B. Específicos

1. Determinar la cantidad de bicarbonato (alcalinidad m), carbonato disuelto (alcalinidad P) y carbonato de calcio, así como pH y turbidez del agua antes de comenzar la prueba de jarras, utilizando métodos analíticos, para conocer la influencia de esta en el tratamiento de agua.
2. Determinar la cantidad de bicarbonato, carbonato disuelto y carbonato de calcio, así como pH y turbidez para el agua que ya ha pasado por la prueba de jarras, utilizando métodos analíticos, para conocer la influencia que tuvo la prueba en las condiciones finales del agua.
3. Encontrar la mejor relación de proporción de reactivos a utilizar para que no solo los parámetros analizados sean favorables, sino también los costos sean los menores, esto realizando un análisis de costos.
4. Proponer un manual para utilizar el equipo de Prueba de Jarras para las pruebas de determinación de la proporción coagulante-floculante más adecuada acorde a la alcalinidad residual del agua analizada.

III. JUSTIFICACIÓN

El agua es la materia prima que se utiliza en mayor proporción al momento de elaborar cerveza. También se utiliza para la limpieza y mantenimiento de los equipos. Según el análisis de la huella de agua se requieren entre 5 a 7 litros por cada litro de cerveza terminada. La obtención y el tratamiento del agua del proceso es importante ya que la calidad de esta puede llegar a afectar la calidad final de la cerveza para la que sea utilizada.

El agua de proceso proviene de pozos de agua en las capas de los subsuelos, debiendo ser tratada para que esta tenga los parámetros requeridos de agua potable. El agua debe cumplir con los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y químicos, con los rangos de valores específicas que son requeridas para el proceso de elaboración de cerveza.

En el agua proveniente de los subsuelos se encuentran sales disueltas, cuyos iones pueden llegar a reaccionar con la malta e incluso modificar el pH de esta, lo que provoca problemas a lo largo del proceso. Por ejemplo, algunas enzimas trabajan de mejor manera en un pH determinado; el malteo es un proceso enzimático, por lo que el pH del agua debe ser controlado. Por otro lado, se encuentran también los iones de calcio disueltos. Estos pueden llegar a reaccionar con el mono hidrógeno de fosfato de potasio en la malta y de manera ácida con el sulfato de calcio o con el bicarbonato de calcio, lo que afectaría el pH del producto final y su sabor. Por último, los iones de carbonato y bicarbonato, que en exceso aumentan el pH, lo que perjudica la actividad enzimática, y el sabor final de la cerveza. A pesar de que los dos últimos inconvenientes mencionados se podrían contra restar entre sí, siempre queda una alcalinidad, que es la que debe ser tratada previo al proceso.

Es importante tener un control de los parámetros previamente mencionados, ya que estos pueden influenciar el pH del mosto y la cerveza, y por lo tanto el sabor y turbidez del producto final. Una de las mejores maneras de alcanzar los parámetros del agua es mediante un proceso de coagulación- floculación, seguido de un filtrado y por último estandarizado, donde la proporción de cada reactivo utilizado proporcione los resultados más convenientes para el proceso.

Para alcanzar dicha proporción es necesario realizar pruebas y analizar los resultados de los parámetros descritos. Sin embargo, realizar las pruebas en el proceso representaría un alto costo en reactivos y se perjudicaría la producción. Por lo tanto, en este trabajo de graduación se realizará una simulación a menor escala del proceso utilizando la prueba de Jarras, empleando un mínimo de reactivos y muestra. Con esto se puede encontrar un método estandarizado para obtener la proporción más apropiada de reactivos, partiendo desde los utilizados actualmente en el proceso. Así se tendrá un mejor control del uso de estos, de los gastos económico y se asegurará que el proceso posterior no se vea afectado por el agua utilizada.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Historia de la cerveza

El primer indicio que se tiene de la fabricación de cerveza es un escrito Mesopotámico del año 2800 a.C. En este se menciona cómo se les daba a los trabajadores diariamente una ración de pan y cerveza. La primera regulación de producción y venta comenzó en los años 1728 a 1686 a.C. y fue estipulada por el rey babilónico Hammurabi. Por otro lado, en el antiguo Egipto la cerveza fue un producto muy común para el consumo humano. (Kunze, 2006)

El agua no siempre tenía las condiciones para el consumo humano, por lo que la utilizaban para la elaboración de cerveza, ya que creían que con ayuda de la fermentación y los ácidos producidos el agua podía llegar a purificarse. Por lo que era la cerveza y no el agua lo que saciaba la sed de las personas. En las culturas germanas, celtas y escitas eran las mujeres las encargadas de la elaboración de cerveza. Así mismo, la industria cervecera tubo sus inicios en los monasterios del siglo XIV, ya que estos fueron los que comenzaron con el comercio de esta. Fue en esta época que se comenzó a utilizar el lúpulo como saborizante en lugar de mezclas de condimentos como era usual. (Kunze, 2006)

En la Edad Media en Alemania el comercio de la cerveza se vio regida por las leyes impuestas por el gobierno. Ya que, en momentos de escases la gente intentaba substituir la materia prima por otra que le dieran un sabor similar al producto, sin preocuparse por la salud del consumidor. Por ejemplo, en lugar de los cereales usaban avena barata, o en lugar del lúpulo, hiervas substitutas. Por lo tanto, el gobierno decidió imponer la ley donde indicaba que la única materia prima que se podía utilizar para la elaboración debía ser la malta a partir de cebada, el lúpulo y el agua. La documentación de la ley se encontró en Múnich en 1447 bajo el nombre de “Reinheitsgebot”, que significa ley de pureza, la cual fue dictada por los duques Guillermo IV y Luis X durante su mandato. Así mismo, se fijó un precio justo dentro del mercado de calidad de producto. (Kunze, 2006)

La guerra de 30 años, el desarrollo de otras bebidas como el té y el café, provocaron un retroceso en la producción de la Cerveza. No obstante, al pasar los años comenzó el auge de la cerveza tipo “Lager”, que era de baja fermentación, que también se le llamó “de tipo bávara” por la región de Alemania donde comenzó. Mientras que esto sucedía la tecnología comenzó a avanzar, se desarrolló la primera máquina de vapor, se inició el uso de la primera máquina frigorífica y hubo un avance significativo en el desarrollo del transporte, lo que promovió la producción de cerveza en todo el mundo. (Kunze, 2006)

Sin embargo, el descubrimiento que apporto con una mayor magnitud a la producción de cerveza fue por parte de Louis Pasteur, quien fue el precursor de la microbiología moderna, y probó que los microorganismos son los que promueven los procesos de fermentación. “*La fermentation est la vie sans oxyg en*”, que significa “La fermentaci3n es la vida sin ox igeno” es una de las frases del científico. A  el se le atribuyen los conocimientos utilizados aun hoy en día sobre la fermentaci3n y las condiciones para preservar la cerveza. (Kunze, 2006)

Debido al gran desarrollo que tuvo la industria, comenz3 a aumentar la cantidad de cervecerías en todo el mundo y se moderniz3 el proceso. Se crearon laboratorios de ensayo para mejorar cada vez m as el proceso. Entre estos se encuentra la “Brauereihochschule Weihenstephan” en las afueras de Múnich, el laboratorio Analítico Dr. Siebel en Chicago, la “Versuchs- und Lehranstalt f ur Brauerei” en Berlín, entre otros. Igualmente se realizaron publicaciones con respecto a la innovaci3n del proceso, y comparaciones entre los procesos. (Kunze, 2006)

En estados Unidos en los años 20, el comercio de cerveza se vio afectada por la prohibici3n del alcohol o la bien conocida “Ley Seca”, la cual fue revocada hasta 1933. Desde ese entonces hasta ahora la industria ha sufrido cambios revolucionarios, los m as notorios fueron despu es del descubrimiento de la máquina frigorífica, ya que gracias a eso es posible la filtraci3n para obtener un producto más brillante. (Kunze, 2006)

La producci3n de ha aumentado significativamente en los últimos años. Posicionando a China como el país productor número 1, dejando detrás a EE. UU. Sin embargo, Alemania tiene se posiciona aun como el país numero 1 como consumidor de cerveza. (Kunze, 2006)

B. Materia Prima

Cebada

La cebada es un cereal, cuyas espigas tiene barbas largas. Es el suministro de almid3n en el proceso de elaboraci3n, esta es transformada en la sala de cocimientos en extracto fermentable. Existen varios tipos de cebadas, el tipo invernal y el tipo de verano. En ambos tipos hay variedades, de dos hileras o de varias hileras. En la de varias hileras, se encuentran 3 granos en cada una de las hileras, mientras que en las de dos hileras se forma únicamente un grano en cada segmento. (Kunze, 2006)

Entre las mencionadas, la combinaci3n utilizada para la fabricaci3n de la malta es la de dos hileras cultivada en verano, ya que esta tiene granos grandes, uniformes, con cascara finas y arrugadas, fáciles de remover, así como un mayor contenido de las sustancias utilizadas en el proceso. Existe una gran cantidad de variedades de cebadas, pero para obtener una malta homogénea se recomienda utilizar una sola variedad de cebada. La cebada está compuesta por 14-15% de agua, al resto se le llama materia seca la cual se compone de 70-85% de hidratos de carbono, 10.5-11.5% de proteínas, 2-4% de sustancias minerales, 1.5-2.0% de grasas y 1-2% de otras sustancias. Entre los hidratos de carbono, los importantes para el proceso son: los almidones, azucares, la celulosa, hemicelulosa y las gomas. No obstante, el almid3n ($C_6H_{10}O_5$), es el compuesto más importante, para el proceso, estas contienen amilosa, que contienen entre 200 a 400 residuos de alfa glucosa y amilopectinas, que contiene hasta 600 residuos de alfa glucosa. (Kunze, 2006)

La calidad de la malta y de la cerveza es directamente proporcional a la de la cebada. Por lo que se le debe hacer controles de calidad manual, físicos y químicos. (Kunze, 2006)

Lúpulo

Para la elaboración de la cerveza se utilizan únicamente las inflorescencias de las plantas femeninas, ya que estas contienen las resinas amargas, como los alfa-ácidos y los aceites etéreos o aceite de lúpulo, que proveen a cerveza el sabor amargo y el aroma característico al producto fina. (Kunze, 2006)

Los compuestos amargos no son utilizados únicamente para el sabor, sino que también para la inhibición del desarrollo de microorganismos, es decir tiene propiedades preservantes, sin embargo, estas no son infinitas, entre más se degrada el compuesto menor es su capacidad inhibidora, por lo que se debe tener una temperatura y humedad controladas, así como la prevención del contacto con oxígeno. Además, este compuesto le da estabilidad a la espuma. (Kunze, 2006)

Por otro lado, los aceites de lúpulo, en su mayoría, son volátiles, por lo que en el tiempo de cocción se volatilizan. Posteriormente, para poder mantener el aroma requerido se le agrega una cantidad de lúpulo a la cerveza. (Kunze, 2006)

Así mismo el lúpulo contiene taninos, los cuales provocan una sensación de sequedad y amargor. Además, estos contribuyen a la turbidez de la cerveza y tiene propiedades antioxidantes, gracias a los grupos fenilos que los componen. (Kunze, 2006)

Arroz

Otra fuente de almidones adicionales proviene de cereales sin maltear más baratos como el arroz, que contiene de 85 a 90% de almidón. Esta es utilizada en menor cantidad que la malta ya que su contenido de proteínas es menor por lo que no puede aportar en la concentración de amino nitrógeno libre, que es requerido por las levaduras. (Kunze, 2006)

Levadura

La levadura es un Sacaromiceto unicelular, que puede trabajar con o sin presencia de oxígeno en el medio. En la fermentación para la elaboración de cerveza, la levadura convierte las azúcares fermentables presentes en el mosto a alcohol y CO₂. La especie más utilizada es la *Saccharomyces Cerevisiae*. Algunas cepas son aisladas para ser cultivadas para proveer cultivos puros de levadura. La levadura es en su mayoría agua, pero también contiene albuminoides, hidratos de carbono, grasas y minerales. (Kunze, 2006)

La energía que esta levadura necesita para realizar sus actividades metabólicas proviene de la respiración. Los nutrientes ingresados como el azúcar son degradados en CO₂ y agua sin que queden residuos. En la ausencia de oxígeno, esta procede a una fermentación alcohólica, donde se produce etanol y CO₂ a partir de la glucosa. Sin embargo, la levadura siempre obtiene más energía de la respiración con oxígeno que con la degradación de la glucosa. Esta degradación se da en múltiples etapas de reacción y estas son catalizadas por distintas enzimas que se encuentran en la levadura. La enzima para la fermentación alcohólica está en el citoplasma. Al metabolismo de la levadura le cuesta procesa los hidratos de carbono, las sustancias albuminoideas, grasas y minerales. (Kunze, 2006)

Dependiendo del tipo de levadura se puede tener una fermentación alta o baja. Para la fermentación alta se utiliza la *Saccharomyces cerevisiae*, mientras que para la baja se emplea la *Saccharomyces carlsbergensis*. (Kunze, 2006)

Cloruro de Calcio

Se utiliza como un aditivo en el agua, para mejorar la floculación de proteínas y taninos durante el hervido, además es usado para la compactación de la materia durante el filtrado en el Whirlpool (Filtro con fuerza centrífuga utilizado para separar restos sólidos del líquido). Así mismo durante la fermentación ayuda a la floculación de levaduras ayudando al control de turbidez y color de la cerveza. (Kunze, 2006)

Azúcar

Se puede utilizar el azúcar de caña o de remolacha en la cocción del mosto, para aportar a las azúcares fermentables en proceso microbiano posterior. Lo que se agrega es una solución de agua saturada con azúcar. (Kunze, 2006)

C. Proceso

Para iniciar el proceso la malta debe ser humectada para que la extracción del almidón sea más fácil. Luego esta es llevada a unos tamices e imanes retirar las impurezas. Luego es molido por 3 molinos distintos para la reducción de su tamaño. Luego la malta molida y el arroz, que se encuentra en el cocedor de adjuntos a 100°C, son transportados al pre macerador donde se le agrega agua y la mezcla que sale después del proceso es dejada en reposo por 30 minutos y llega a una temperatura de 81°C, luego la mezcla pasa al macerador donde y sale con una temperatura de 77°C y luego de haber reposado por 20 minutos termina con 74°C. (Kunze, 2006)

Cuando está listo pasa al filtro Lauter donde se separa el líquido al que se le llamará mosto y el sólido que puede ser utilizado como afrecho. En este punto se realiza una prueba de Yodo y pH para verificar que los almidones si se hayan convertido en azúcares fermentables y el pH sea el adecuado. Luego el mosto pasa a la hoyo de cocción que se encuentra a 100°C, en este punto se agrega el lúpulo, el cloruro de calcio y el jarabe de azúcar, las cantidades dependen del tipo de cerveza que se esté realizando. La cocción dura un aproximado de 35 minutos y luego pasa al Whirlpool, el cual es una máquina que mediante centrifugación retira las proteínas de mosto, ya que estas causan turbidez en la cerveza. (Kunze, 2006)

Luego el mosto ya está listo para ser llevado a el área de fermentación, pero primero es enfriado en un intercambiador de calor, donde se baja su temperatura de 94°C a 7 °C, con ayuda de agua a 3 °C. Luego ya es llevado al reactor donde se mezcla con la levadura que será la encargada de realizar la fermentación. En este punto se aumenta la temperatura a aproximadamente 12°C. Dependiendo de la velocidad de la fermentación esta puede durar de 3 a 5 días. (Kunze, 2006)

Cuando los datos de azúcares fermentables y alcoholes secundarios son los requeridos por el tipo de cerveza que se está realizando se despoja el líquido de la levadura que queda asentada en el fondo y luego va al área de filtración, donde pasa por 3 filtros diferentes, uno de tierras diatomeas para disminuir la turbidez, uno con Polivinilpolipirrolidona que por sus siglas se le llama PVPP, para disminuir la cantidad de polifenoles en la cerveza y por último pasa por un

filtro Trap, que es un filtro de polipropileno no liberador de fibras y se utiliza como seguridad para retirar cualquier partícula de PVPP o partícula de tierra diatomea que pueda quedar en el líquido. Luego es pasada por tanques donde se le agrega los aditivos y componentes extra según el tipo que se esté elaborando. Estos pueden ser bisulfito, jarabe, lúpulo o colorantes. Durante este proceso la cerveza baja a una temperatura de 0°C. (Kunze, 2006)

Antes de ser pasada a los salones de embotellado, se le inyecta una cantidad de CO₂ y se diluye con agua des aireada, es decir sin oxígeno disuelto, para alcanzar la concentración de alcohol requerida. (Kunze, 2006)

D. El agua y su uso como materia prima

El agua subterránea o de pozo, se encuentra debajo de la superficie de la tierra y está localizada en los poro o fisuras de las rocas solidas. Esta puede ser recolectada por medio de perforaciones o túneles. Al tener contacto con las rocas del subsuelo contiene minerales provenientes de estas, así como los carbonatos y otros compuestos que dependen de la naturaleza del suelo donde yace el agua, por lo que el agua tiene variantes en sus características dependiendo de donde sea extraída. (Baird, 2014)

El agua es la materia prima de mayor porcentaje contenida en la cerveza. Según la huella de agua se deben agregar de 5 a 8 litros de agua por cada litro de cerveza producido. Esta constituye al final el 90% del producto final. Lo ideal sería que el agua extraída de los pozos fuera directamente al proceso de elaboración, sin embargo, las sales disueltas que contiene y los compuestos alcalinos, crean reacciones adversas con la malta, reduciendo la actividad enzimática, afectando el amargor, la actividad de la levadura, entre otros. Por lo tanto, esta debe ser tratada y para que la calidad del producto final no se vea afectada. Una manera de controlar que el agua tenga los parámetros necesarios para entrar al proceso es el pH. Para poder controlar los valores estos, es necesario tener un reactor donde se realice un proceso de coagulación-floculación. (Kunze, 2006)

E. Doble capa eléctrica

Este es un efecto que se da alrededor de todas las moléculas con carga y en partículas en solución. Ha habido varios estudios de cómo se comporta esta doble capa, el primero fue Hermann von Helmholtz, quien determinó que al sumergir un electrodo cargado en una solución con electrolitos los iones de la misma carga se repelen mientras que los iones de la carga contraria son atraídos a este y así se forman dos capas de polaridades opuestas, a lo que él le llamó la doble capa (DL). (Harrison *et al*, 2003)

Luego los científicos Louis George Gouy y David Leonard Champman realizaron mejoras al modelo de Helmholtz al introducir el concepto de modelo difuso a la doble capa. Ellos implementaron la estadística de Maxwell – Boltzmann para determinaron que la carga de los iones está en función de la distancia con la superficie cargada inicial, por lo tanto, el potencial eléctrico disminuye exponencialmente lejos de la superficie. (Harrison *et al*, 2003)

Luego el científico Otto Stern sugirió combinar ambos modelos para generar el suyo, que dice que algunos iones se adhieren al electrodo como sugirió Helmholtz, creando así una capa interna nombrada capa de Stern mientras que alrededor de esta se forma la capa difusa de Gouy-Chapman. Por otro lado D.C. Graham sugirió que algunas especies iónicas cargadas pueden penetrar la capa de Stern. Este modelo propone la existencia de tres regiones: el plano interno

de Helmholtz donde están iones específicamente adsorbidos, el plano exterior de Helmholtz donde están iones disueltos a una distancia cercana del electrodo y por último la capa difusa de Gouy- Chapman. (Harrison *et al*, 2003)

Rudolph A. Marcul, sustituyó la teoría de los estados de transiciones utilizado en las reacciones redox de Henry Eyring y lo llevó a las reacciones de cambios de estructura. La formación de la doble capa en equilibrio se debe a una afinidad no eléctrica de iones determinantes a una superficie cargada, lo que produce la acumulación de una superficie cargada eléctricamente (C/m^2) creando un campo electrostático. El campo interactúa con el movimiento térmico de los iones, creando así una contra carga que protege la carga eléctrica de la superficie. La carga eléctrica neta en la capa difusa es igual al inverso de la magnitud de la carga neta superficial, por lo que la estructura es neutra. (Harrison *et al*, 2003)

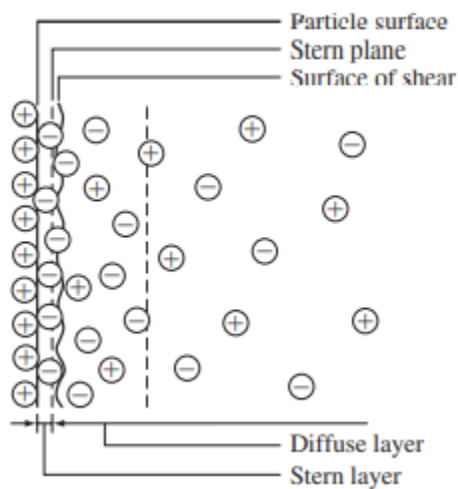


Figura A. Doble capa eléctrica de una molécula

(Harrison *et al*, 2003)

Para estimar el grado de la doble capa se utiliza el potencial Z , ya que este es el potencial eléctrico en el límite externo de la capa de Stern. Los valores típicos van de 25 mV a 100 mV. El punto iso eléctrico es donde el potencial Z es igual a 0, es decir la carga en la capa de Stern y en la masa del fluido son iguales. (Harrison *et al*, 2003)

El grosor de la doble capa es la longitud de Deby, que proviene de la contante de Deby-Hückel, en las soluciones acuosas está en la escala de nanómetros y al aumentar los electrolitos disminuye. (Harrison *et al*, 2003)

En la siguiente figura se muestra el potencial de energía entre dos partículas cargadas y separadas por una distancia r , con una doble capa repulsiva ψ_E , un potencial atractivo ψ_L y la suma de estas ψ_Y . En esta se muestra el mínimo secundario que es donde la repulsión donde se da una ligera coagulación, ya que en este punto las partículas se atraen entre sí para tener un potencial menor a cero. (Harrison *et al*, 2003)

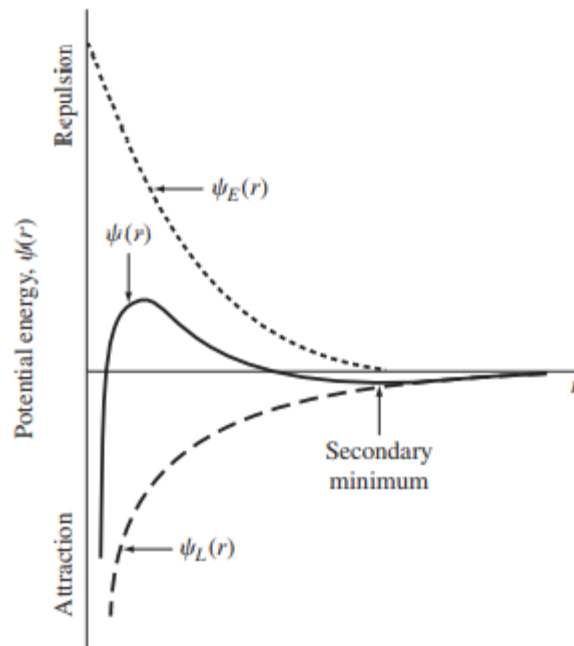


Figura B. Potencial eléctrico entre dos partículas cargadas.

(Harrison *et al*, 2003)

F. Coagulación-Floculación

El objetivo principal de estos procesos es el de aumentar el tamaño de partícula de algunos coloides en una solución, mediante la reducción de las fuerzas electrostáticas de la solución, para crear “puentes” entre ellas. La reducción de las fuerzas, que generan la repulsión, logra que estas se unan entre sí y crear flóculos, que son grupos de coloides desestabilizados que alcanzan un peso molecular suficiente para sedimentarse en la solución y ser removidas de esta. A los coloides en una solución que no floculan se les dice que son estables, para pasar a un coloide inestable que puede ser unido con otro se debe reducir la densidad de carga de su superficie. (Harrison *et al*, 2003)

Como se mencionó el objetivo es reducir las fuerzas de repulsión eléctricas lo más posible para permitir que las partículas se acerquen y dejar que las fueras de atracción de van de Waals sean mayores a las fuerzas de repulsión, lo que cumple con el paradigma de Deryagin and Landau DLVO, este se encuentra en el punto mínimo secundario mencionado anteriormente. Cabe mencionar que si la capa difusa se extiende demasiado la atracción por fuerzas de van der Waals sería imposible. Este proceso se puede dar mediante la adición de electrolitos o de polímeros que funcionan como electrolitos. En este caso nos enfocaremos en los polímeros, los cuales tienen una ventaja ya que al entrar en contacto con la doble capa le confieren una carga positiva que se extiende más allá que el radio de Debye, causando que las partículas sean electrostáticamente atractivas para las dobles capas de las partículas coloidales. (Harrison *et al*, 2003)

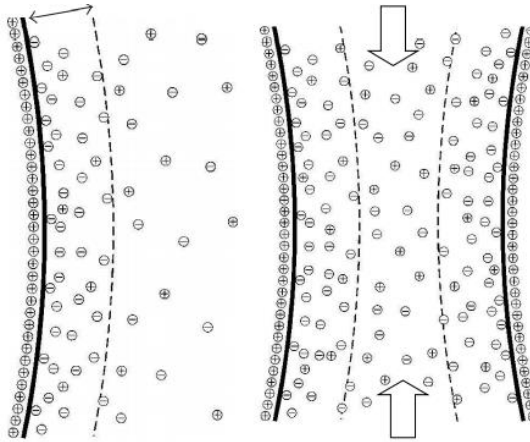


Figura C. Doble capa eléctrica difusa y del mecanismo de generación de la fuerza de repulsión.

(Yasuhisa, 2011)

Los polímeros solubles en agua son normalmente utilizados para en tratamiento de agua, para mejorar la tasa de floculación y así producir flóculos más grandes, densos y fuertes y así facilitar la separación de líquido y sólido. A los flóculos con una forma similar a una esfera y alta densidad se le llama floculo pellet. Esto se da únicamente cuando la cantidad adecuada de polímero es agregada a la a la mezcla con una intensidad de mezclado apropiada. (Adachi *et al*, 2011)

Hay dos métodos en los que se puede dar una floculación por polímeros, la primera es por puentes y la segunda por neutralización de cargas, ambas suceden al mismo tiempo, pero la dominante depende de que tan bien se adsorba el polímero a la superficie del coloide. Al haber adsorbido una cadena de polímero en la superficie se da una reconfiguración de este más estable con bucles, colas y lazos. Si el polímero es de alto peso molecular y largo se puede extender y alcanzar otras partículas creando puentes entre estas para juntarlas. El primero en proponer este método fueron Smellie Jr. Y La Mer en 1958. Para que los puentes no se desestabilicen el polímero debe contar con un espacio desocupado para unirse con otras cadenas de polímero y así crear los flóculos. (Adachi *et al*, 2011)

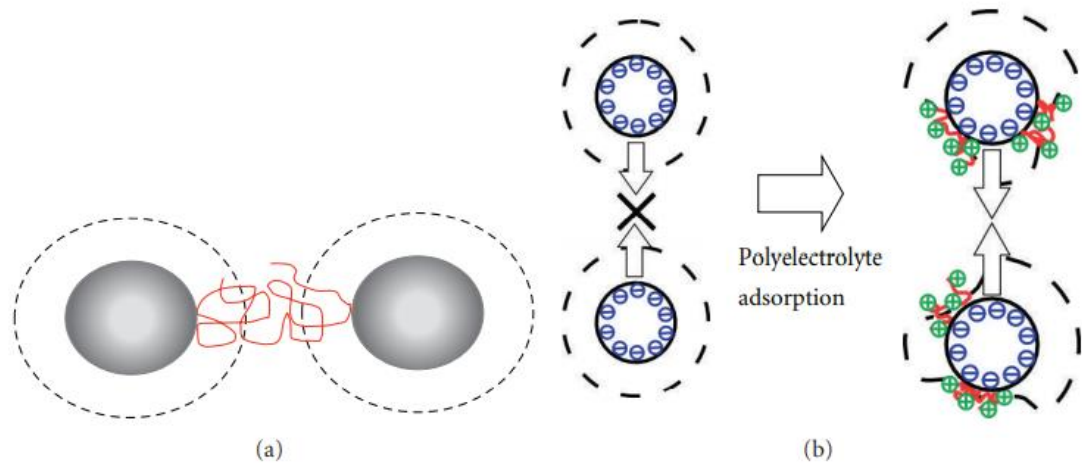


Figura D. (a) Floculación por puentes, (b) Representación de la neutralización de las cargas
(Yasuhisa, 2011)

La probabilidad de formar puentes depende de la cobertura de la superficie, una superficie menos cubierta facilita este mecanismo, sin embargo, hacer una estimación cuantitativa a partir de esta afirmación es poco exacta, ya que otros factores cinéticos también tienen que ver como la adsorción de las estructuras complejas de polímeros. La adsorción de un polímero cargado en una superficie con la carga opuesta resulta en la reducción de la carga neta de la partícula, lo que reduce las fuerzas electrostáticas de repulsión y se induce la floculación. La interacción electrostática entre la partícula y el polielectrolito es función de la fuerza iónica de la solución y la densidad de carga del polielectrolito. (Adachi *et al*, 2011)

Ambos mecanismos, por puentes o por neutralización de cargas, depende de la adsorción del polímero y la colisión de los coloides, por lo que tener una agitación que promueva un flujo turbulento es ideal. (Adachi *et al*, 2011)

El trabajo de coagulante es el de desestabilizar las partículas lo que se puede dar mediante una reacción de neutralización de cargas entre el coagulante cargado positivamente y los coloides cargados negativamente y la materia natural orgánica o de los productos de las precipitaciones que forman sitios negativos. (Ahmad *et al*, 2005)

Según los estudios: "Optimización del proceso de floculación-coagulación para el efluente de un molino de aceite palma utilizando metodología de respuesta superficial" y "La estequiometría de coagulación" el mecanismo de sedimentación de flóculos, tanto para el aceite, como para el agua cruda, se da en un rango de pH de 6-8, donde las condiciones son apropiadas para que la formación de sólidos amorfos sea rápida. En este proceso se da la disminución de la turbidez, la materia natural orgánica es removida por adsorción junto con el precipitado. (Ahmad *et al.*, 2005) (Shin *et al*, 2008)

Entre los coagulantes más utilizados en los estudios entra la alúmina de grado industrial, y la cal hidratada; mientras que una buena elección de floculante son las sales mecánicas y los polímeros de aluminio, entre los comerciales se puede encontrar el Poliflocal que es una solución al 50% de clorhidróxido de aluminio. (Ahmad *et al*, 2005) (Shin *et al*, 2008)

Si se utiliza una cantidad muy escasa del coagulante no se logrará neutralizar totalmente la carga de las partículas y la formación de micro flóculos será muy escasa, por ende, la turbidez será alta. Por otro lado, si se agrega una coagulante en exceso se producirá la inversión de las cargas de las partículas y se formará una gran cantidad de micro flóculos con tamaños pequeños y velocidad de sedimentación bajas por lo que la turbidez será igualmente alta. Se debe encontrar en punto óptimo para que la turbidez disminuya. (Cárdenas, 2000)

Para tener un adecuado proceso de coagulación y floculación se debe seguir los siguientes pasos:

- I. Mezclar el polímero floculante en una solución homogénea con altas revoluciones por minuto para que reacciones y se puedan dar las colisiones entre los coloides requeridos.
- II. Transporte de la de la cadena polimérica sobre la superficie de la partícula. Y reconfiguración de esta.
- III. Con una velocidad más lenta de agitación se forman los puentes entre los coloides y se da un re -arreglo de las estructuras de los flóculos.
(Adachi *et al*, 2011)

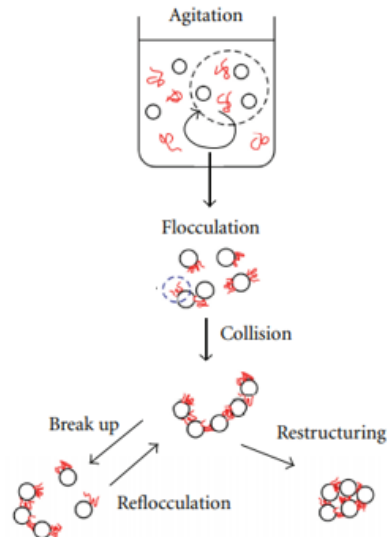


Figura E. Diagrama de floculación para polímeros.

(Yasuhisa, 2011)

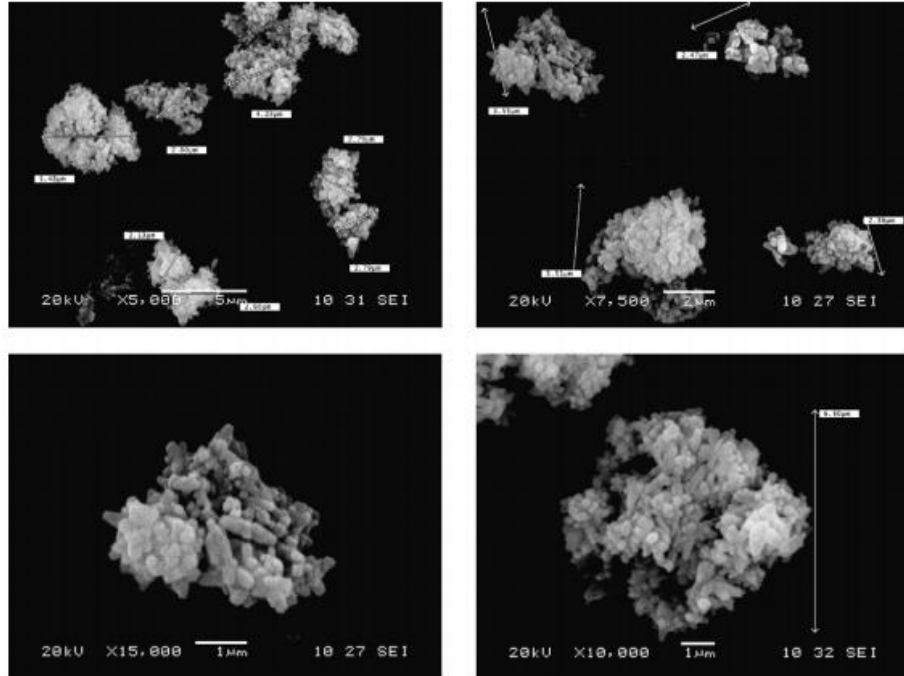
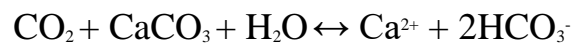


Figura F. Flóculos de carbonato de calcio.

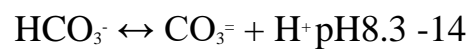
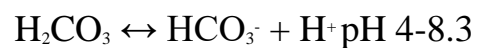
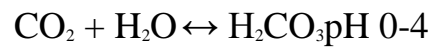
(Gaudreault, 2009)

G. Alcalinidad

La alcalinidad del agua es la capacidad que tiene para neutralizar ácidos y se debe a la presencia de ciertas sales, ácidos débiles y bases fuertes y débiles. En el agua proveniente de la naturaleza los compuestos que más contribuyen son los bicarbonatos ya que por causa del dióxido de carbono abundante en la atmósfera y los materiales de los suelos se da la siguiente reacción (Skoog *et al*, 2014)



Equilibrio carbónico



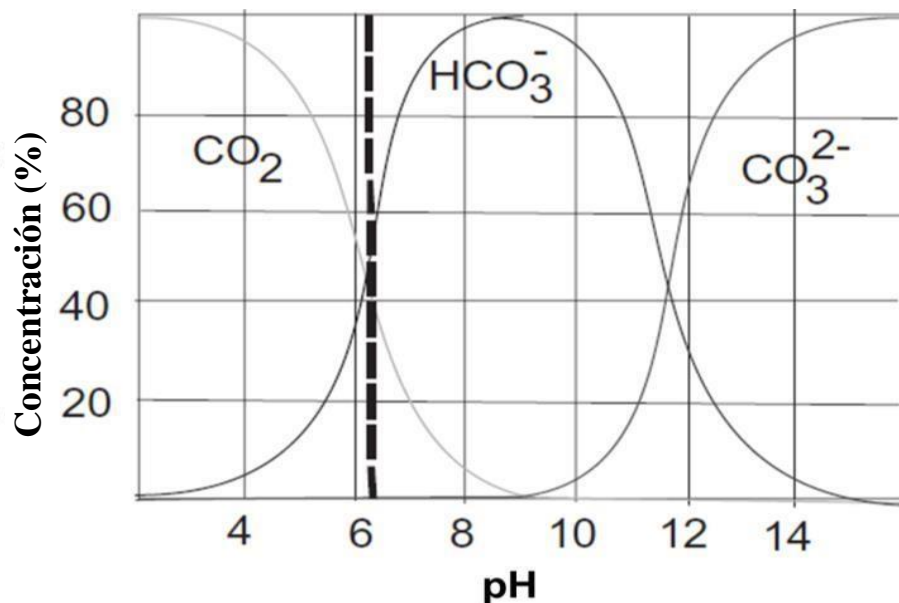


Figura G. Equilibrio bicarbonato-bicarbonato-carbonato

Alcalinidad M: Representa la cantidad de iones de HCO_3^-

Alcalinidad P: Representa la cantidad de iones de CO_3^{2-} y OH^-

(Skoog *et al*, 2014)

La alcalinidad M y P son importantes parámetros para procesos donde se tiene agua cercana al punto de ebullición. La Alcalinidad P se presenta en agua con un pH mayor a 8.3, esta representa la alcalinidad debida a hidróxidos y a carbonatos disueltos, por lo tanto, se puede utilizar fenolftaleína para como indicador en su titulación, ya que esta tiene su punto de viraje justo en este pH. Luego tenemos la alcalinidad M, que se da cuando se tiene un pH de ente 4.5 a 8.3, al titular únicamente con naranja de metileno esta alcalinidad, nos da un resultado de alcalinidad total, ya que representa los carbonatos, hidróxidos y bicarbonatos disueltos en la solución. (Skoog *et al*, 2014)

Para encontrar la alcalinidad de las muestras se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{A*N*50\ 000}{Y} = \frac{mg}{L} \text{ de alcalinidad} \quad (\text{ec. 1}) \quad (\text{Skoog } et \text{ al, 2014})$$

Donde

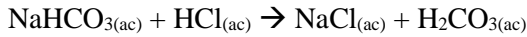
A ... ml de ácido utilizados para titular

N ... normalidad de la solución utilizada

Y ... ml de la solución

(Skoog *et al*, 2014)

Para esto se utiliza la siguiente reacción



(Skoog *et al*, 2014)

La alcalinidad de las muestras tomadas es medida mediante métodos analíticos de estandarización. Según el estudio “Producción mejorada de polímero in situ Keggin Al 137 + mediante un proceso combinado de coagulación de Fe-Al para el tratamiento de agua de alta calidad” la concentración de carbonato de calcio bajo de 192.8 ppm a 50 ppm. Dicha disminución de cantidad de carbonos se pudo observar también en el estudio “el comportamiento de la coagulación mediante las sales de alúmina utilizando agua eutrófica”. Además, dicho estudio muestra una relación parabólica invertida para el porcentaje de carbonatos disueltos en el agua, al aumentar la dosificación de coagulante, como se puede observar en la Figura 3. (Nig, li *et al*, 2019), (Chengshihu, *et al*, 2006)

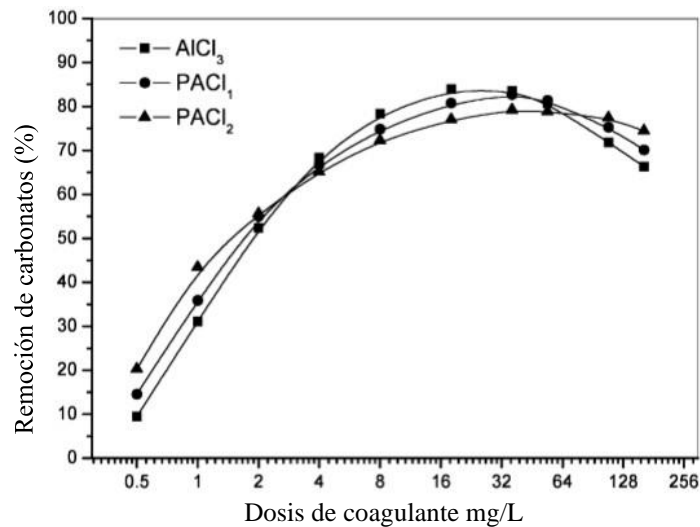


Figura H. Porcentaje de remoción de carbonatos disueltos en el agua al aumentar la cantidad de coagulante en la mezcla.

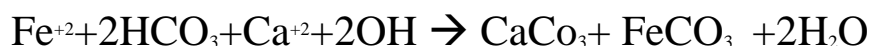
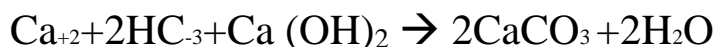
(Chengshihu, *et al*, 2006)

Esta cuenta con un punto máximo en alguna de las concentraciones por lo que si el fin del proceso es el de disminuir alcalinidad se debe encontrar dicha concentración para utilizarla en el proceso. (Chengshihu, *et al*, 2006)

H. Dureza

Se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. El agua denominada comúnmente como “dura” tiene una elevada concentración de dichas sales y el agua “blanda” las contiene en muy poca cantidad. (Skoog *et al*, 2014)

Una manera práctico y económico de ablandar el agua es agregar cal apagada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en cantidades elevadas para reaccionar con los bicarbonatos, precipitándose los carbonatos correspondientes como indican la ecuaciones siguientes:



(Skoog *et al*, 2014)

La dureza permanente es producida por sales más fijas como los cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), encontrando que la dureza total es la suma con la dureza temporal y que se acostumbra a representarla en función de los bicarbonatos de calcio y de magnesio. (Skoog *et al*, 2014)

Para determinar la cantidad de dureza se recomienda utilizar una solución estandarizada de EDTA, así como un reactivo estándar para provocar un cambio de color. La solución de EDTA se deben amortiguar a un pH de 10, lo que se puede realizar con un buffer amoniacal, mientras que para el indicador se recomienda el negro de eriocromo T. Según los estudios la dureza total se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, pero ambos expresados como ppm de carbonato de calcio. El buffer es requerido ya que si se aumenta indefinidamente se corre el riesgo de que este pueda precipitar como carbonato de calcio, lo que sucedería al agregar demasiada solución de EDTA. (Skoog *et al*, 2014)

Para encontrar la dureza se debe utilizar la siguiente ecuación

$$\frac{V \cdot N \cdot 1000}{\text{ml muestra}} * 50 = \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{Dureza total (ec.2)} \text{ (Skoog et al., 2014)}$$

Donde

V ... ml de EDTA

N ... Normalidad de la solución EDTA utilizada

(Skoog *et al*, 2014)

I. Turbidez

Según el estudio “Producción mejorada de polímero in situ Keggin Al 137 + mediante un proceso combinado de coagulación de Fe-Al para el tratamiento de agua de alta calidad”

después de realizar el procedimiento de coagulación floculación para el tratamiento de agua turbidez bajo de 4.5 NTU a 1.1 NTU, estas fueron medidas con un turbidímetro 21000N. La eficiencia de remoción de turbidez calculada fue de 73.5%. (Nig, li *et al*, 2019)

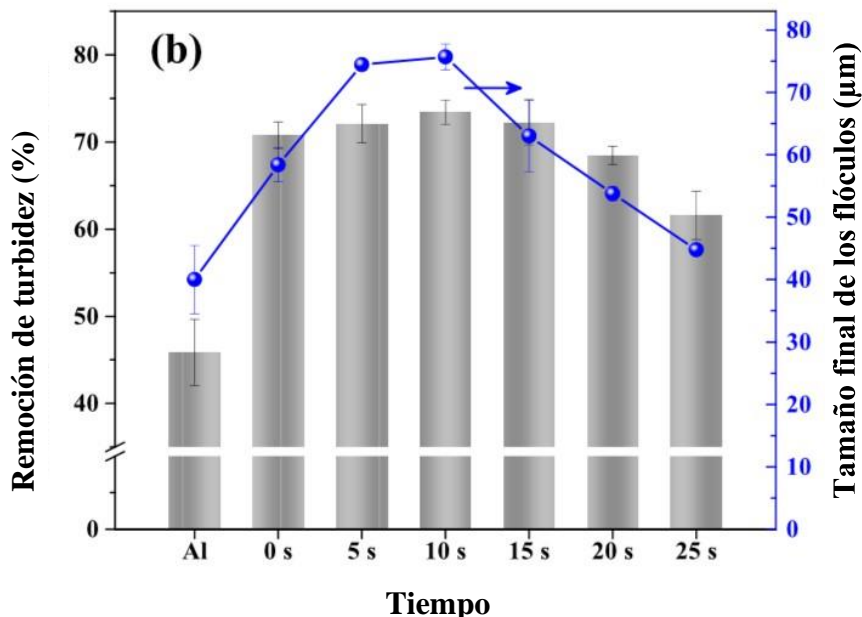


Figura I. Eficiencia de remoción de turbidez y tamaño final de los flocos, respecto a los distintos intervalos de tiempo

(Nig, li *et al*, 2019)

Por otro lado, en el mismo estudio, se demostró que la variedad de concentraciones de los reactivos floculantes y coagulantes tiene un efecto en la turbidez. Esto también se pudo observar en el trabajo de Yolanda Andía, quien muestra cómo se podría comportar la turbidez según el método de reacción de los reactivos utilizados y las cargas des estabilizadas. (Nig, li *et al*, 2019)

La aplicación de una dosis creciente del coagulante al agua presenta diferentes zonas de coagulación las cuales tiene un efecto directo en la turbidez. (Cárdenas, 2000)

Zona 1.- La dosis de coagulante no es suficiente para desestabilizar las partículas y por lo tanto no se produce coagulación. (Cárdenas, 2000)

Zona 2.- Al incrementar la dosis de coagulantes, se produce una rápida aglutinación de los coloides. (Cárdenas, 2000)

Zona 3.- Si se continúa incrementando la dosis, llega un momento en que no se produce una buena coagulación, ya que los coloides se re estabilizan. (Cárdenas, 2000)

Zona 4.- Al aumentar aún más la dosis, hasta producir una súper saturación se produce de nuevo una rápida precipitación de los coagulantes que hace un efecto de barrido, arrastrando en su descenso las partículas que conforman la turbiedad. (Cárdenas, 2000)

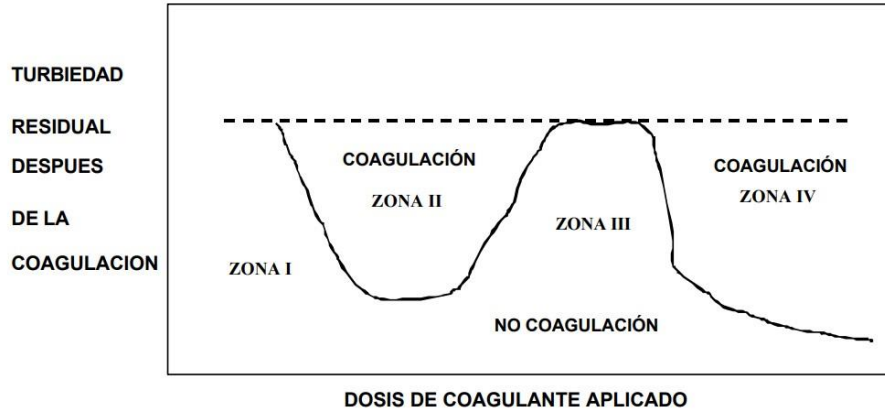


Figura J. Efecto directo del coagulante en la turbidez
(Cárdenas, 2000)

J. Prueba de Jarras

Una prueba de jarras es la prueba más adecuada para determinar las dosis de coagulante o floculante apropiadas en una planta de tratamiento de agua, indicando la dosis mínima que se debe utilizar para lograr una filtración adecuada y posteriormente una calidad de agua aceptable. (Shin, 2008)

A nivel laboratorio se utiliza este tipo de pruebas para seleccionar y cuantificar un método de tratamiento de agua cruda, soluciones diluidas o aguas residuales. Es utilizado principalmente para realizar pruebas del método coagulación/ floculación y determinar las distintas cantidades dosificadas de reactivo, velocidades de mezclado y tiempos de reposo para alcanzar cierta calidad del agua. Para llevar a cabo estas pruebas son necesarias de 4 a 5 envases con su agitador, donde se simula las condiciones de mezclado y se ajustan las condiciones de clarificación. Las jarras pueden tener distintos métodos de tratamiento cada una o distintas dosificaciones de estos químicos y ser realizadas al mismo tiempo. Pueden ser comparadas con una jarra de agua sin tratar o entre ellas. Dependiendo del proceso de tratamiento de agua las pruebas se deben realizar, diario, cada semana, cada mes o por temporadas. (Calderón, *et al*, 2017)

Se recomienda utilizar un mínimo de muestra de 1000 ml, en jarras transparentes, así como una velocidad inicial de 100 rpm por 1 minuto para que el coagulante haga su trabajo y luego una final de 20 rpm por 15 minutos dando tiempo al floculante de que funcione adecuadamente. Luego recomiendan agregar una dosificación más de floculante y dejar reposar por 20 minutos aproximadamente. Luego se pueden extraer las muestras para ser filtradas y analizadas. (Calderón, *et al*, 2017)

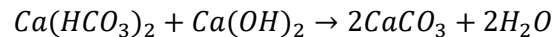
K. Policloruro de aluminio

El floculante para analizar es el policloruro de aluminio (PACl). Este es un floculante utilizado en el tratamiento de agua, sobre todo en el agua para consumo ya que no deja trazas de aluminio. Genera grandes clústeres de aluminio. Es un polímero catiónico, del cual se pueden utilizar bajas cantidades para eliminar formaciones de coloides finos, para facilitar la

filtración. Así mismo, los valores de dureza, alcalinidad y turbidez disminuyen significativamente. Es un líquido ligeramente turbio, de un color verde claro con una densidad de 1.33 g/ml con un pH de entre 2.5-3.5

L. Proceso industrial utilizado

El tratamiento de agua comienza con descarbonatando el agua mediante la adición de hidróxido de calcio, este es un método en el cual la cal hidratada reacciona con el bicarbonato del agua, formando así carbonato de calcio el cual es insoluble en el agua de acuerdo con la siguiente reacción. (Kunze, 2006)



El proceso de realizar en uno o en dos pasos, en este caso se hablará sobre la de dos etapas. Como se puede observar en la Figura F, en un reactor se prepara la solución saturada de cal $Ca(OH)_2$ y agua, a esta se le llama lechada de cal. Esta lechada es dosificada por un tubo central al reactor con el agua cruda que se desea ablandar, y al bajar reacciona con los bicarbonatos del agua. Simultáneamente se agrega el floculante para que mediante la agitación constante que se tiene en el reactor, se den los choques necesarios entre el carbonato de calcio con una densidad de carga negativa y el polímero con sitios activos positivos es adsorbido por la molécula y con otras cadenas de polímero y así formar los flóculos. (Kunze 2006)

Figura 1.20
Planta descarbonatadora
(precipitación en dos etapas)
(1) agua natural, (2) lechada de cal, (3) saturador de cal,
(4) reactor, (5) purificador,
(6) filtro de grava, (7) deshidratación de lodos, (8) agua descarbonatada

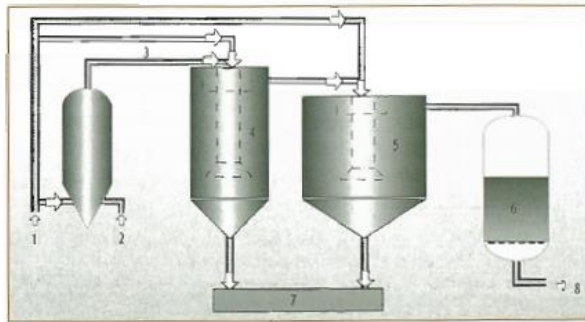


Figura K. Planta de tratamiento de agua
(Kunze, 2006)

Cabe mencionar que según estudios y cálculos moleculares se sabe que las partículas puras de carbonato de calcio tienen una densidad de carga positiva, por lo que, al estar en una solución básica, la doble capa que se forma alrededor de esta será negativa lo que permite que el polímero se adsorba a ella. Además, es importante resaltar que estos polímeros no deben saturarse por completo sino únicamente llegar al 50% de su capacidad con carbonatos de calcio, ya que el resto es utilizado para formar los puentes con el resto de los polímeros y así formar los flóculos. (Gaudreault *et al*, 2009); (Adachi *et al*, 2011)

El lodo de cal que se forma se asienta en el fondo del cono y debe ser removido cada cierto periodo de tiempo. Se debe considerar que la cantidad de cal a agregar va a variar dependiendo de la naturaleza del agua cruda a utilizar. El agua ablandada cae por rebalse a una tubería que

la lleva a filtros de grava, donde se realiza la separación de sustancias suspendidas que no lograron sedimentar. (Kunze, 2006)

Esto lo sigue un proceso de neutralización para lo que se requiere una dosificación precisa de ácido para poder neutralizar los carbonatos e hidróxidos presentes en la solución y llevarla a un pH que sea favorable para la elaboración de cerveza que va de 8 a 8.5 dependiendo del tipo que se desee producir. (Kunze, 2006)

Otra ventaja de este proceso es que los reactivos no son costosos y además se logra precipitar hierro, manganeso y otros metales pesados limpiando bien el agua. Sin embargo, la desventaja es que se requiere de una constante remoción de lodos y ajuste de las dosis de reactivos si la calidad del agua cruda varía mucho. (Kunze, 2006)

M. Impacto ambiental de residuos

El residuo proveniente del proceso de coagulación floculación se le llama “lodos”. La composición de estos lodos depende de varios factores, como el origen del agua, la edad y tratamientos previos del agua, así como de los químicos utilizados para el proceso. La cantidad de lodos es variable y depende de las características del agua a tratar, del grado de tratamiento que se requiere, el tipo de equipo y la frecuencia de remoción de los lodos. Cabe mencionar que para el proceso tratado en este trabajo los lodos generados no son categorizados como peligrosos. (Dirección de Medio Ambiente, 1999)

La disposición de estos lodos al ser removidos del reactor procede con un proceso de secado para deshidratar la materia y ser dispuestos como sólidos en un vertedero autorizado. Previo al proceso de secado se pasa por un estabilizado de lodos para que la parte sólida aumente y disminuir el volumen de sólidos a tratar, lo que ayuda a la capacidad de equipos posteriores. El proceso de secado puede darse mediante un filtro prensa un proceso de centrifugado. La deshidratación de los lodos debe encontrarse en un rango de 60% -70%. El agua extraída debe ser llevada a una planta de agua residuales, para el ajuste de su pH y demás estándares para disponer de ellas. (Valderrama, 2013)

Al tener los lodos deshidratados se pueden disponer en vertederos verificados, sin embargo hay otras maneras de aprovechar dichos desechos, como en utilidades agrícolas o forestales, mejorando las propiedades químicas del suelo, puede llegar a disminuir el consumo de fertilizantes químicos. También han sido utilizados en la silvicultura para promover la reforestación. Por otro lado, este puede ser usado en la fabricación de hormigón, en España se realizaron pruebas y se determinó que al agregar lodos a la mezcla de adoquín se disminuye la porosidad de estos. Por último, en la fabricación de ladrillos la utilización de lodos en el proceso puede suponer un ahorro energético durante la cocción, un ahorro de consumo de agua si estos lodos no han sido deshidratados previamente. (Valderrama, 2013)

N. Alternativas para tratamiento de agua

Entre los procesos de tratamiento de agua que pueden ser utilizados para la eliminación de microorganismos el proceso de ozonificación para la disminución de virus, bacterias, óxidos y olores, además es una alternativa viable a la cloración. Por otro lado, se tiene el proceso por ionización de plata, que es utilizado como un biocida eficaz que logra eliminar un amplio rango de microorganismos sin presentar efectos secundarios de toxicidad para los humanos. (Neira, 2006)

Los procesos utilizados para la disminución de dureza pueden ser los de membrana, como lo es la osmosis inversa y la nano filtración. Por el proceso de osmosis inversa se rechazan los iones monovalentes y compuestos orgánicos de menos de 0.002 μm . Se logra remover el calcio y el magnesio en un 94% - 98%. La nanofiltración es también conocida como la osmosis inversa a baja presión o des endurecimiento por membrana. Esta permite levemente el paso de iones monovalente como sodio y potasio y previene el paso de porciones grandes de iones divalentes como calcio y magnesio, al igual que moléculas orgánicas. (Neira, 2006)

Una opción de membrana puede ser acetato de celulosa, así como las de fibras finas y tejidos en espiral. La eficiencia de dichas membranas puede verse afectada por incrustaciones de sustancias insolubles. (Neira, 2006)

Por último, en años recientes se ha desarrollado un proceso de tratamiento magnético, donde se hace pasar el agua dura a través de un campo magnético alto para disminuir la dureza y no genera incrustaciones. (Neira, 2006)

V. METODOLOGÍA

A. Observaciones

La metodología presentada a continuación se debe realizar para cada una de las muestras. Una prueba consiste en seis jarras en las cuales una de las variables permanece constante, en este caso el floculante y otra cambiara en cada una de las jarras, en este caso el coagulante. Para así poder encontrar la relación entre las variables. Cada jarra tiene capacidad de 2 litros y la dosificación de los reactivos puede ser realizada simultáneamente.

B. Materiales

1. Hidróxido de Calcio 98% de pureza
2. Clorhidróxido de aluminio a una solución de 50% de concentración
3. 6 balones aforados de 100 ml
4. Solución acuosa 0.02 N de Ácido Clorhídrico
5. Solución acuosa de 0.5 N de EDTA
6. Fenolftaleína
7. Naranja de metileno
8. Negro de eriocromo
9. Buffer amoniacal
10. 2 buretas de 50 ml
11. 2 beaker de 50 ml
12. 1 pipeta de 2000 ml
13. 1 pipeta de 50 ml
14. Prueba de Jarras
15. Turbidímetro
16. Medidor de pH
17. Agua cruda 120 ml por muestra como mínimo
18. 12 embaces de muestra

C. Metodología

- a. Hacer las alícuotas de las concentraciones que se quiere analizar del coagulante, ya que la cantidad a agregar es muy pequeña, por lo que es mejor hacerlo con alícuotas de concentraciones conocidas.
 - 1) Calcular la cantidad de polímero necesaria para obtener 100 ml de solución acuosa con 15ppm, 17 ppm, 19 ppm, 21 ppm, 23 ppm y 25 ppm,
 - 2) Lavar una pipeta graduada y medir la cantidad de polímero calculada anteriormente, por ejemplo: 22.55 ml para el caso de 15 ppm, agregar en el balón aforado de 100 ml y llenar con agua destilada hasta la marca de aforo.
 - 3) Rotular la muestra adecuadamente indicando la concentración de la solución contenida en el embace en una parte visible del mismo, y almacenar para su uso.
 - 4) Realizar el mismo procedimiento para las concentraciones 17, 19, 21, 23 y 25 ppm con las cantidades correspondientes previamente calculadas.
- b. Tomar 4 muestras de agua de la misma fuente de donde se tomará el agua para las pruebas en los embaces de 50 ml, esto para que el análisis de agua cruda sea comparable con el agua tratada.
 - 1) Colocar 50 ml de muestra en un beaker previamente enjuagado con agua destilada para evitar contaminación, introducir el potenciómetro y cuando la medición se estabilice, anotar el valor del pH
 - 2) Trasvasar los 50 ml de muestra a un beaker de 150 ml, añadir 4 gotas de fenolftaleína y titular con la solución de ácido clorhídrico y anotar la cantidad de ácido utilizada. Esta debería ser 0, ya que no deben encontrarse ácidos carbónicos disueltos en el agua.
 - 3) En los mismos 50 ml de muestra añadir 4 gotas de naranja de metilo y titular con la solución de ácido clorhídrico hasta notar el cambio de color de transparente a un naranja leve, anotar la cantidad de ácido utilizada. Así se conoce la cantidad de carbonatos presentes en el agua.
 - 4) Medir 50 ml de la solución con una probeta y trasvasarlos a un beaker de 150 ml, ambos enjuagados con agua destilada para evitar contaminación.
 - 5) Agregar 0.5g de negro de eriocromo con 4 gotas de buffer amoniacal, titular con solución de EDTA hasta ver el cambio de color de morado intenso a un azul oscuro. Anotar la cantidad de EDTA utilizado. Esto para conocer la cantidad de minerales disueltos en el agua, por el método gravimétrico.
- c. Calcular la masa requerida de floculante para un volumen total de 2L a las concentraciones de 338, 358, 378, 398 y 418 ppm.
 - 1) Pesarse en el bote de muestreo, previamente tarado, la cantidad calculada para la concentración a la que se llevará a cabo la prueba. Por ejemplo: 0.676 g por cada 2 litros de muestra, para obtener una concentración de 338 ppm.
 - 2) Colocar el mismo peso en 6 botes de muestreo distintos, tarando cada uno antes de pesar, uno por cada jarra.
 - 3) Realizar lo mismo para las concentraciones de 358, 378, 398 y 418 ppm con las cantidades previamente calculadas.
- d. Para comenzar con la prueba de Jarras se debe mover el eje de las paletas agitadoras hacia arriba y retirar el tomador de muestras de la prensa donde se encuentra sostenida, para poder retirar la jara vacía, realizar lo mismo con cada jarra.

- e. Llenar las 6 jarras con 2 litros de la muestra, es decir agua cruda, medidos con una probeta, de la misma fuente donde se tomó la muestra previamente analizada para que sean comparable.
- f. Volver a colocar las jarras llenas en su sitio, con cuidado sin botar la muestra, bajar las paletas agitadoras y colocar el tomador de muestra en su lugar.
- g. Asegurar la placa rotatoria para dosificación con tape, para evitar que esta se voltee antes de tiempo y la prueba deba comenzar nuevamente.
- h. Además, asegurar la barra inferior con los tomadores de muestras en los tornillos de los extremos para evitar que esta gire y bote la muestra de agua.
- i. Retirar los 12 tubos de dosificación removiendo el hule negro que se encuentra por debajo de la placa de metal que los sostiene.
- j. Colocar los tubos en la base metálica que se encuentra debajo
- k. Para cada una de las jarras se encuentran 2 tubos de cristal, se debe llenar uno con la cantidad de cal pesada en el paso 3, utilizando la misma concentración en todas las muestras.
- l) Al agregar la cal asegurarse que toda la muestra pase al tubo incluso la que se queda en el fondo y en las paredes del recipiente donde se encuentre, para esto se puede utilizar una paleta metálica, ya que al perder muestra la concentración puede cambiar.
- l. Llenar los otros tubos de cristal con 10 ml de cada alícuota del polímero, realizada en el paso 1.
 - 1. Medir con una pipeta volumétrica los 10 ml de cada alícuota para asegurar que se tenga la misma cantidad en cada muestra.
 - 2. Identificar bien cada tubo con su concentración para evitar confusiones posteriores.
- m. Volver a colocar los tubos en su lugar y verificar que, al inclinarlos, su contenido si logre caer dentro de la jarra, ya que si cae afuera las concentraciones cambian y se debe volver a comenzar. (Tener cuidado de no voltear la placa antes de iniciar la prueba)
- n. Conectar el cable al equipo y conectar este en el panel eléctrico más cercano.
- o. Accionar el equipo con el botón negro, que se encuentra justo arriba de la conexión.
- p. Programar los programas de agitación: (el programa 1 es estándar, los programas 2,3 y 4 pueden ser programados)
- q. Para iniciar el programa editado se debe presionar el botón inferior del medio para desplegar la lista de programas, mover las flechas de la izquierda hasta llegar al programa editado, presionar enter para seleccionarlo, luego mover las flechas de la izquierda hasta tener la palabra “Iniciar” en la pantalla.
- r. **Antes de presionar enter** y dar inicio al programa, asegurarse de que todo esté colocado como debe.
- s. **Al mismo tiempo** que se presiona enter, dejar caer la dosificación de cal y polímero.
- t. Colocar los 12 contenedores para tomar muestra en la placa de metal.
- u. Esperar a que pasen los segmentos de agitación. 1 minuto a 100 rpm para que el floculante haga su trabajo y 15 minutos a 20 rpm para que el coagulante pueda actuar correctamente.
- v. En caso de querer detener la prueba por alguna emergencia o por algún error se debe presionar el botón de la esquina inferior de la derecha.
- w. Esperar 20 minutos al finalizar la prueba para que se asiente la suspensión.
- x. Inclinar la barra inferior de los tomadores de muestras asegurando que queden dentro de los contenedores y tomar la muestra.

1. Tomar 200 ml de muestra, 100 para análisis de alcalinidades, dureza y pH y 100 para turbidez.
- y. Filtrar todas las muestras
1. En un cono de papel filtro colocado sobre un Erlenmeyer, previamente enjuagado con agua destilada, verter la muestra en el papel filtro y esperar a que se filtre todo, para retirar los flóculos aun suspendidos en el agua.
 2. Al terminar de filtrar se debe regresar la muestra a su embace previamente enjuagado con agua destilada para su posterior análisis
 3. Enjuagar el Erlenmeyer vacío para la próxima muestra y realizar lo mismo. Se puede utilizar el mismo papel filtro para la mitad de las muestras.
- z. Medir pH de las muestras
1. Enjuagar un beaker de 50 ml con agua destilada
 2. Llenar el beaker de tal manera que al introducir el electrodo la muestra no se salga.
 3. introducir el electrodo en la muestra y esperar a que la medición se estabilice.
 4. Anotar la medición en el cuadernito.
 5. Retirar el electrodo y regresar la muestra a su envase.
- aa. Para la determinación de Alcalinidad P, que mide la cantidad de bicarbonato disuelto en el agua.
1. Medir con probeta, previamente enjuagada con agua destilada, 50 ml de la muestra filtrada y trasvasar a un beaker de 150 ml
 2. Agregar 3 gotas de fenolftaleína a la muestra y titular con ácido clorhídrico hasta notar el cambio de color
 3. Anotar la cantidad de ácido utilizada y luego con estequiometría se puede conocer la cantidad de bicarbonato presente en el agua.
- bb. Medir el pH de la muestra estandarizada que se debe encontrar entre 8.3-8.4 anotar el valor, ya que así lo requiere el posterior proceso de elaboración de cerveza.
- cc. Para determinar la dureza.
1. En la muestra ya estandarizada, es decir con el pH de 8.3-8.4, agregar 0.5g de negro de eriocromo T y 4 gotas de buffer amoniacal como indicadores y titular con una solución EDTA, hasta notar el cambio de color.
 2. Anotar la cantidad de EDTA utilizada al momento del cambio de color, ya que se utilizando el método gravimétrico, esto proveerá la cantidad de minerales disueltos en el agua.
- dd. Para determinar la Alcalinidad M, que determina la cantidad de carbonatos disueltos en el agua.
1. Repetir el paso 27 y 28
 2. Al tener la solución con el pH de 8.3-8.4 medir nuevamente 50 ml de solución con una probeta previamente enjuagada y trasvasar al beaker de 150 ml
 3. Agregar 4 gotas de naranja de metileno y titular con solución de ácido clorhídrico hasta notar el cambio de color de anaranjado intenso a anaranjado leve.
 4. Anotar la cantidad de ácido utilizada y luego realizar los cálculos estequiométricos para conocer la concentración de carbonatos.
- ee. Medir turbidez de muestras ya filtradas, para determinar la cantidad de sólidos disueltos que un quedaron en el agua.

1. Utilizando 100 ml de cada muestra.
 2. Trasvasarlas a embaces al vacío y limpiar por fuera para evitar gotas.
 3. Colocar en el turbidímetro, encender y esperar a la lectura.
 4. Anotar la medición en el cuadernito, la cual debería ser menor a 0.2 FTU (Formazin Turbidity Units), para no afectar al proceso posterior.
- ff. Graficar los datos dejando fija la concentración de floculante y colocar en el eje “x” la concentración de floculante utilizada y en el “y” las partes por millón que se obtuvieron de alcalinidad M, alcalinidad P y dureza.
- gg. Realizar las mismas gráficas, pero variando en el eje “y” la turbidez en FTU (Formazin Turbidity Units) y el pH de cada muestra
- hh. Hacer un análisis estadístico para señalar la validez de los datos obtenidos mediante cada una de las pruebas para cada concentración analizada. Entre ellas la prueba de comparación de medias, desviación estándar y moda.
- ii. Se harán las mismas pruebas estadísticas para el agua de los otros pozos con el único fin de determinar que el método propuesto puede ser replicable

VI. RESULTADOS

A. Agua cruda utilizada.

Cuadro 1. Propiedades del agua cruda primera prueba de 338 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza(ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|-------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 110 | 1.49 | 0 | 132 | 1.66 | 7.488 | 0.24 |

Cuadro 2. Propiedades del agua cruda segunda prueba de 338 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza(ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|-------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 124 | 1.59 | 0 | 138 | 1.70 | 7.488 | 0.44 |

Cuadro 3. Propiedades del agua cruda tercera prueba de 338 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza(ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|-------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 106 | 1.46 | 0 | 126 | 1.61 | 7.365 | 0.12 |

Cuadro 4. Propiedades del agua cruda primera prueba de 358 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza(ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|-------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 110 | 1.49 | 0 | 134 | 1.67 | 7.533 | 0.08 |

Cuadro 5. Propiedades del agua cruda segunda prueba de 358 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza(ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|-------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 114 | 1.52 | 0 | 146 | 1.77 | 7.493 | 0.08 |

Cuadro 6. Propiedades del agua cruda tercera prueba de 358 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza(ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|-------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 106 | 1.46 | 0 | 148 | 1.79 | 7.91 | 0.16 |

Cuadro 7. Propiedades del agua cruda primera prueba de 378 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|--------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 128 | 1.62 | 0 | 154 | 1.84 | 7.473 | 0.08 |

Cuadro 8. Propiedades del agua cruda segunda prueba de 378 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza(ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|-------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 128 | 1.62 | 0 | 154 | 1.84 | 7.593 | 0.12 |

Cuadro 9. Propiedades del agua cruda tercera prueba de 378 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza(ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|-------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 132 | 1.66 | 0 | 164 | 1.92 | 7.602 | 0.08 |

Cuadro 10. Propiedades del agua cruda primera prueba de 398 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|--------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 114 | 1.52 | 0 | 146 | 1.77 | 7.747 | 0.24 |

Cuadro 11. Propiedades del agua cruda segunda prueba de 398 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|--------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 116 | 1.53 | 0 | 136 | 1.69 | 7.784 | 0.04 |

Cuadro 12. Propiedades del agua cruda tercera prueba de 398 ppm de coagulante

| Muestra | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad P (ppm) | Alcalinidad M(ppm) | ± | pH ± 0.05 | Turbidez ± 0.005 (FTU) |
|---------|--------------|------|---------------------|--------------------|------|-----------|------------------------|
| Cruda | 110 | 1.49 | 0 | 138 | 1.70 | 7.763 | 0.12 |

B. Cambios en dureza y alcalinidad del agua tratada.

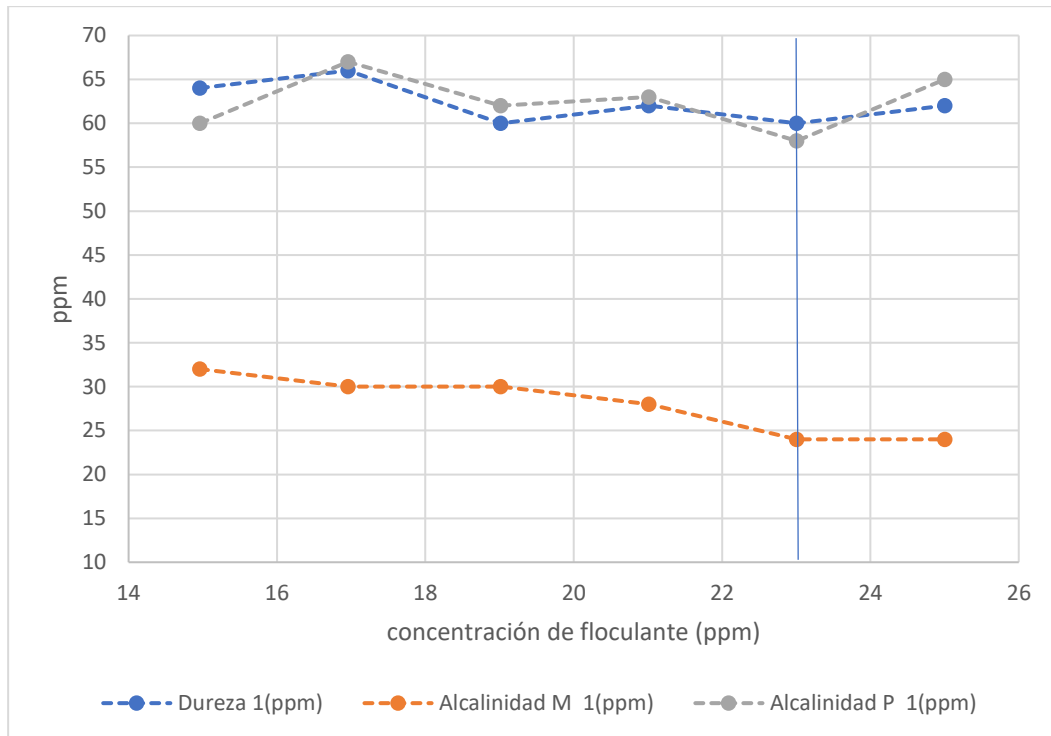


Figura 1. Condiciones finales obtenida en la primera prueba utilizando 338 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

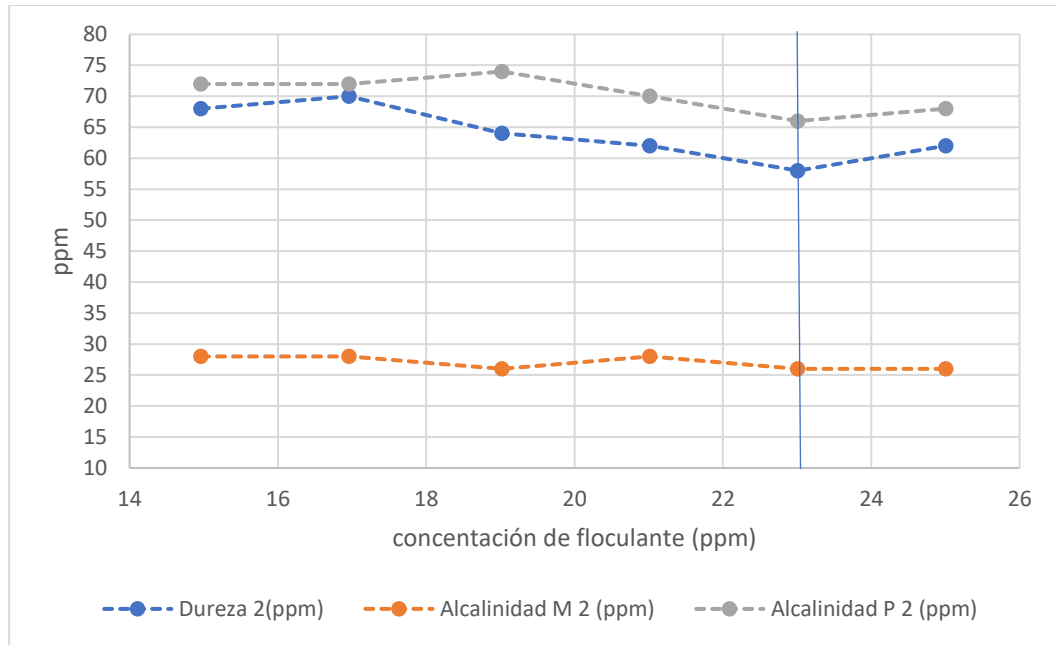


Figura 2. Condiciones finales obtenida en la segunda prueba utilizando 338 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

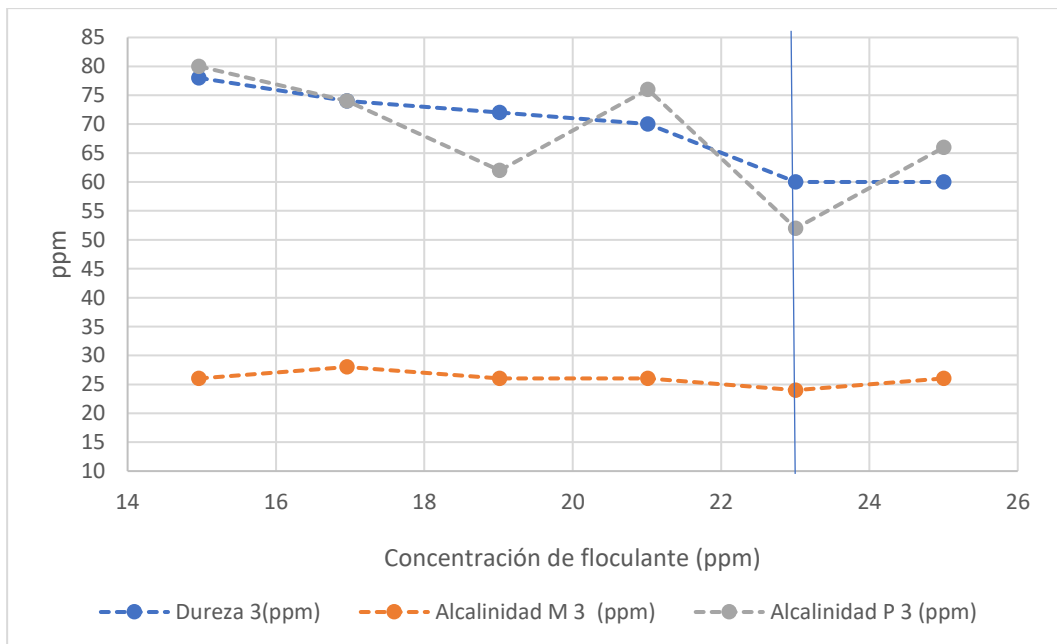


Figura 3. Condiciones finales obtenida en la tercera prueba utilizando 338 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

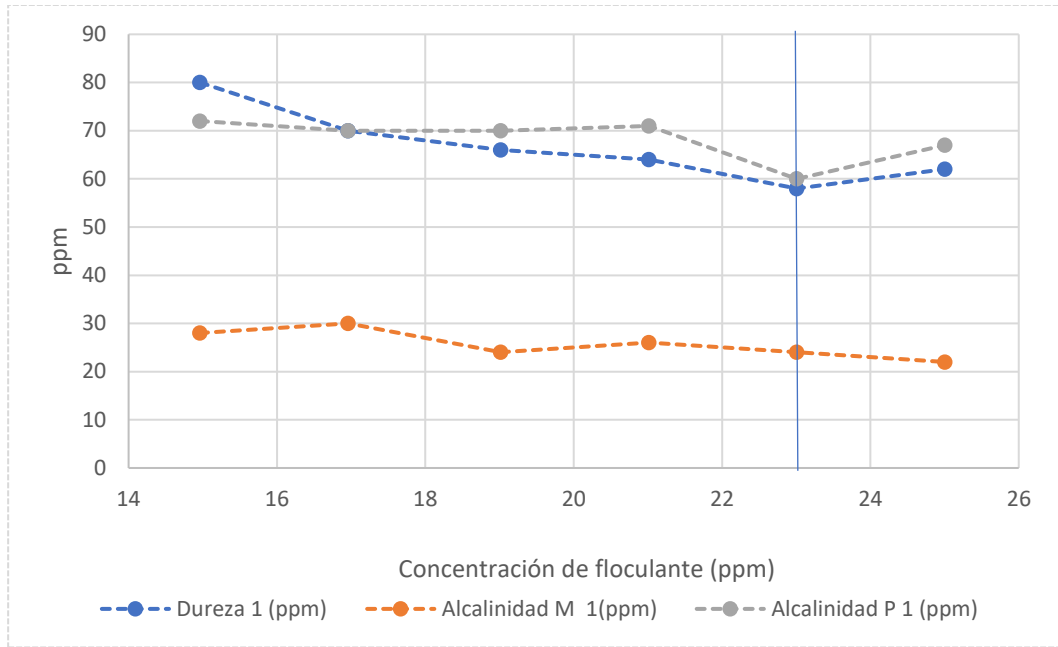


Figura 4. Condiciones finales obtenida en la primera prueba utilizando 358 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

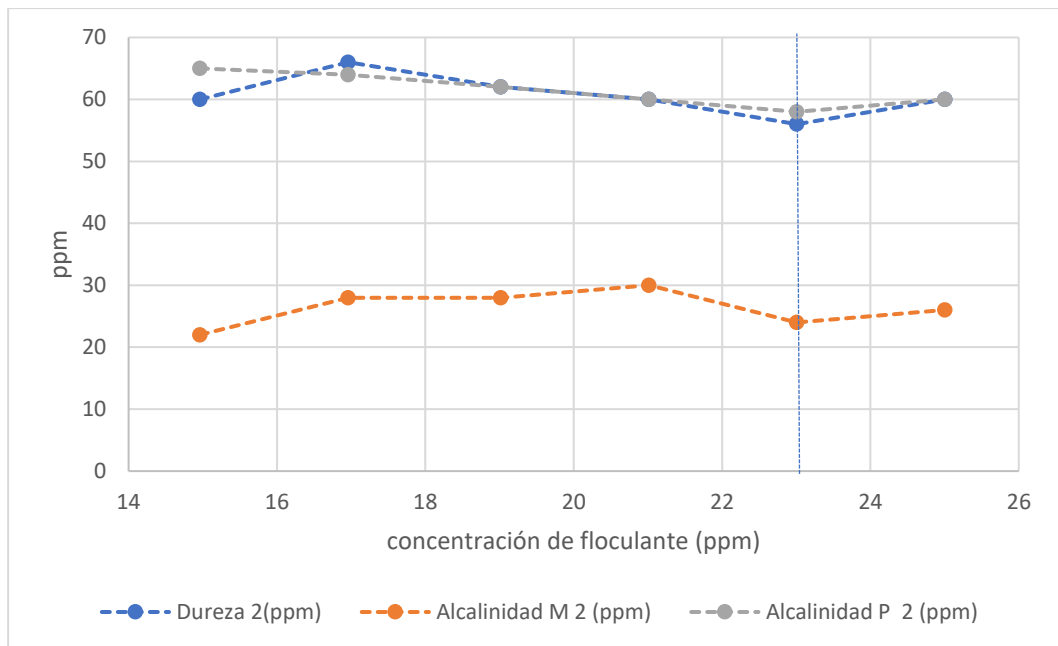


Figura 5. Condiciones finales obtenida en la segunda prueba utilizando 358 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

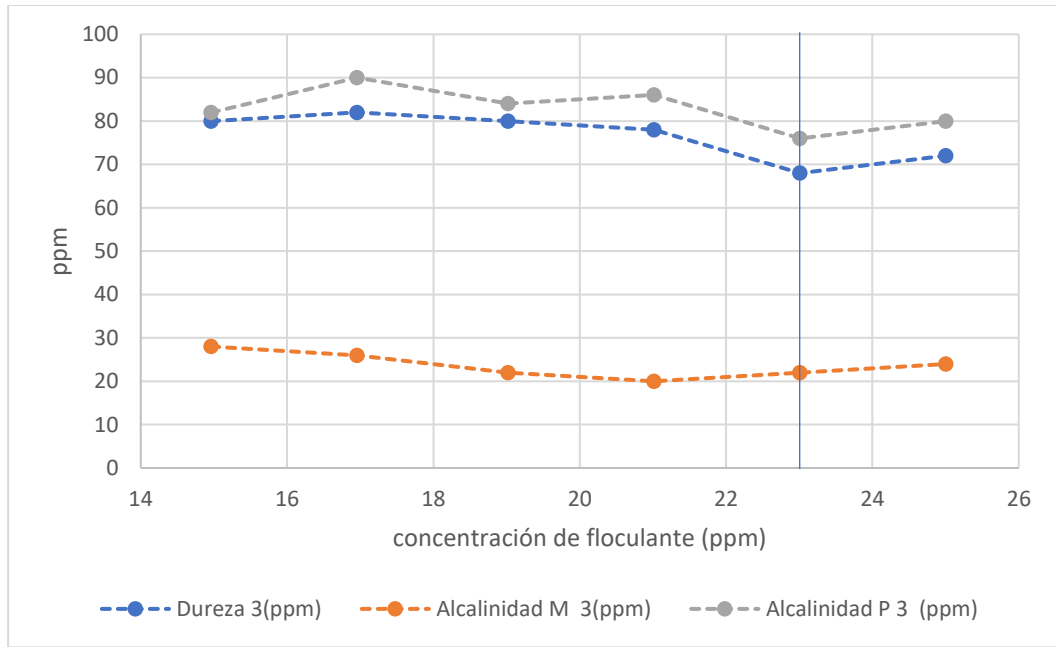


Figura 6. Condiciones finales obtenida en la tercera prueba utilizando 358 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

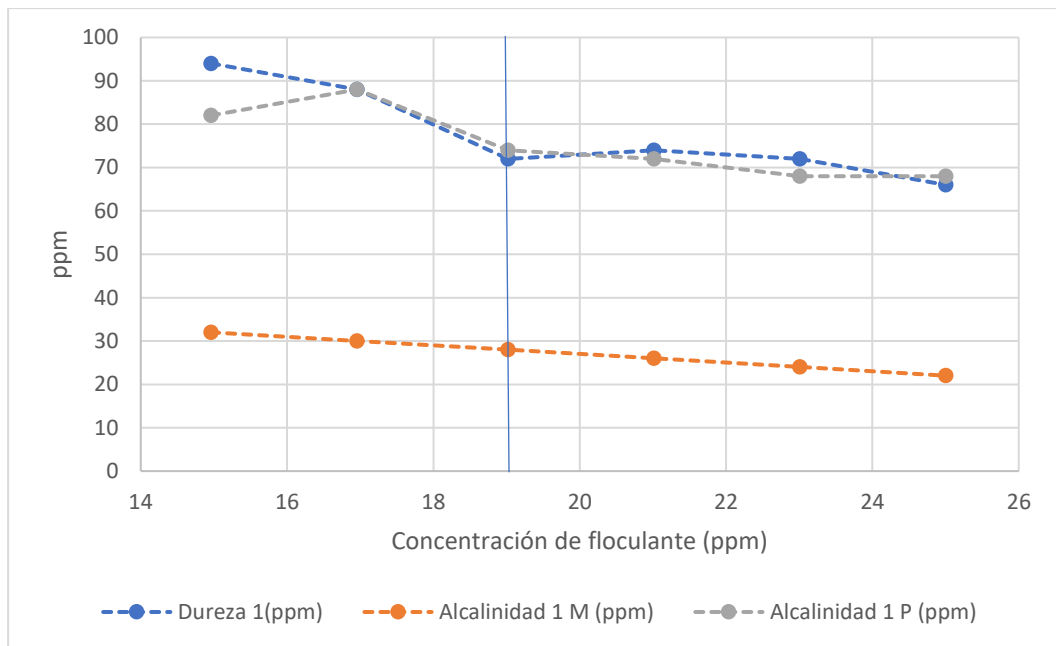


Figura 7. Condiciones finales obtenida en la primera prueba utilizando 378 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

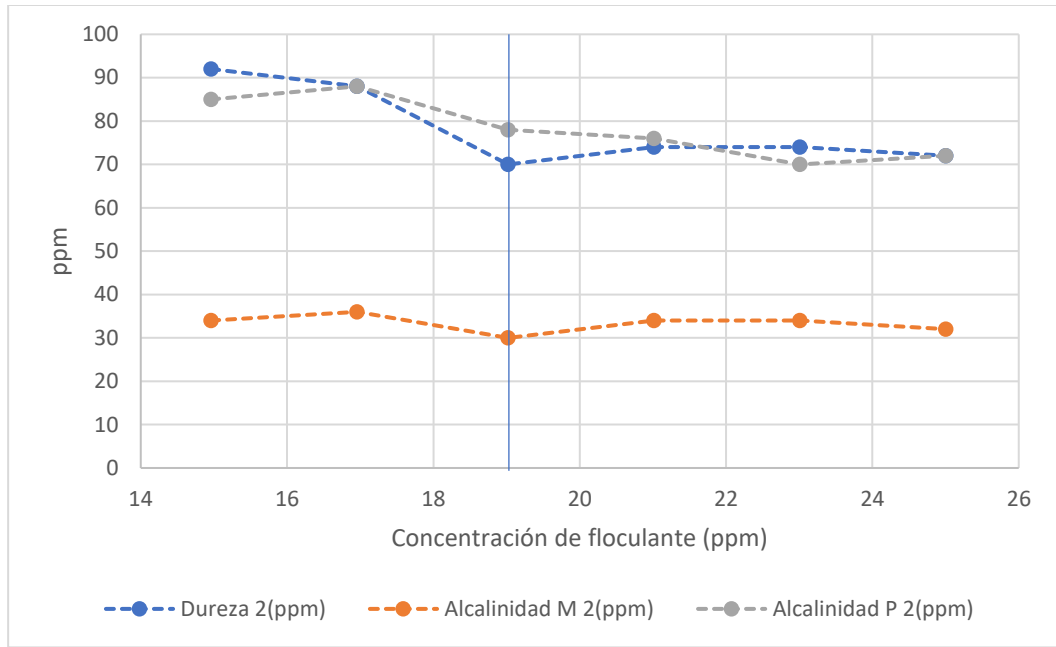


Figura 8. Condiciones finales obtenida en la segunda prueba utilizando 378 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

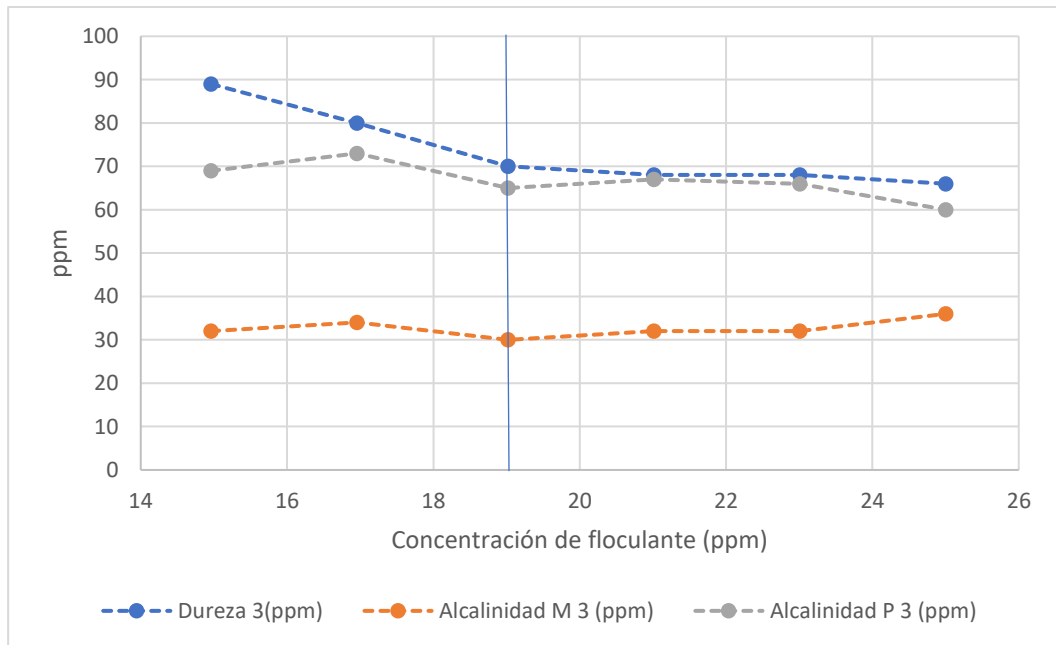


Figura 9. Condiciones finales obtenida en la tercera prueba utilizando 378 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

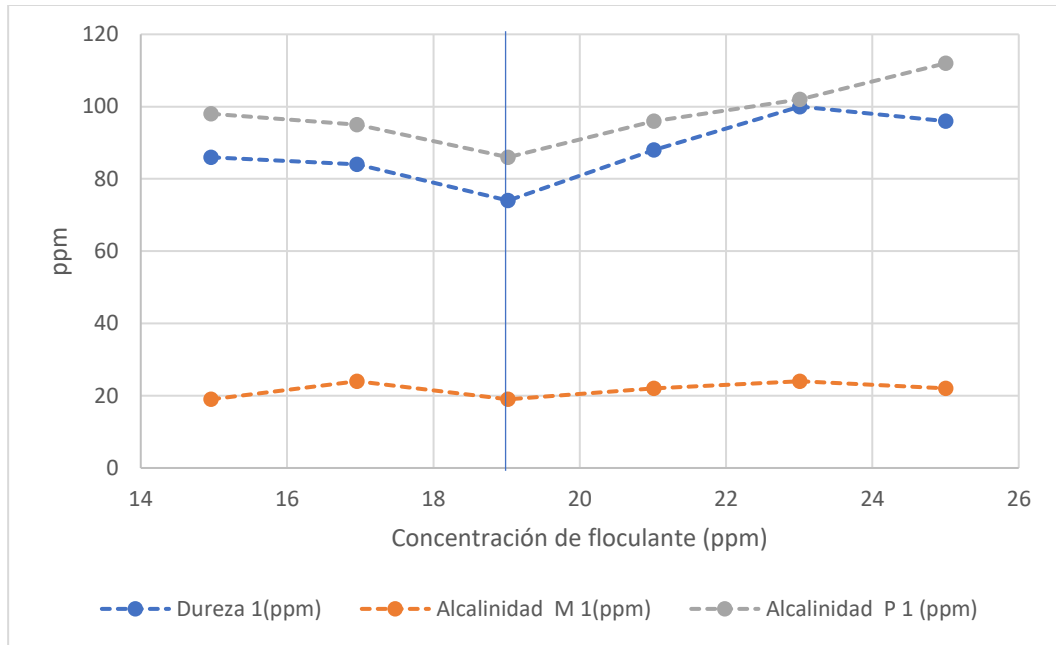


Figura 10. Condiciones finales obtenida en la primera prueba utilizando 398 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

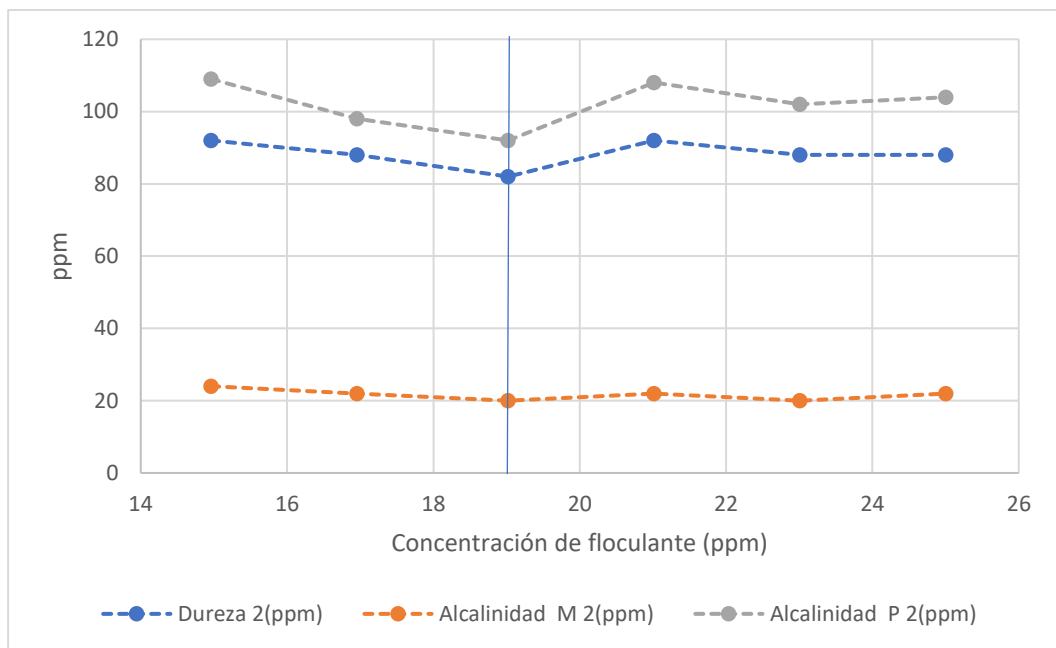


Figura 11. Condiciones finales obtenida en la segunda prueba utilizando 398 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

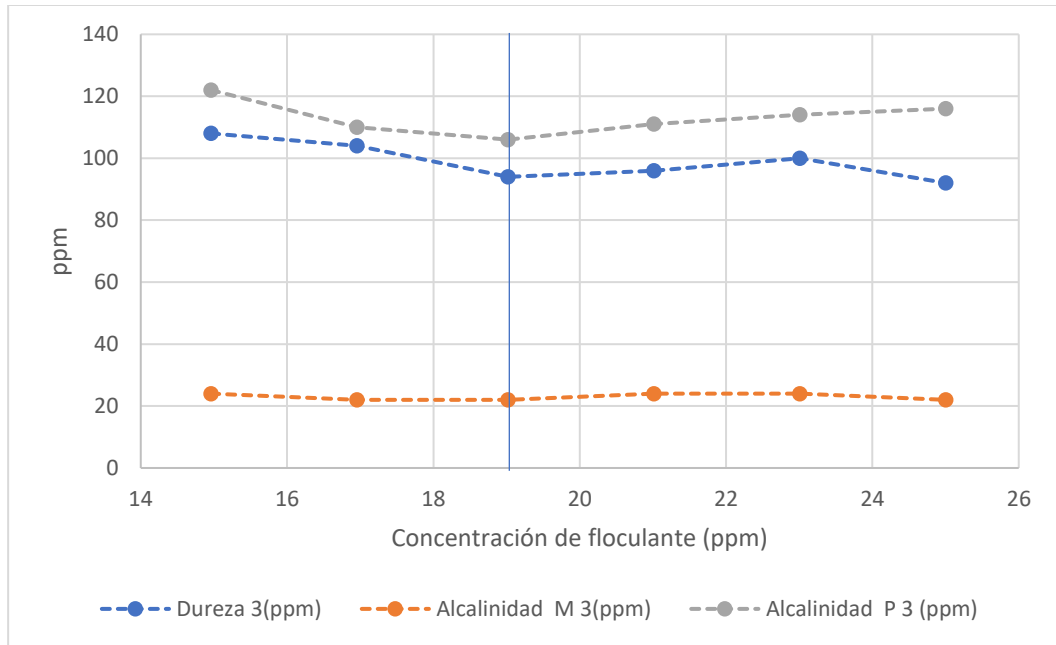


Figura 12. Condiciones finales obtenida en la tercera prueba utilizando 398 ppm de coagulante y variando las concentraciones de polímero.

C. Cambios en el pH del agua tratada, antes de su estandarización.

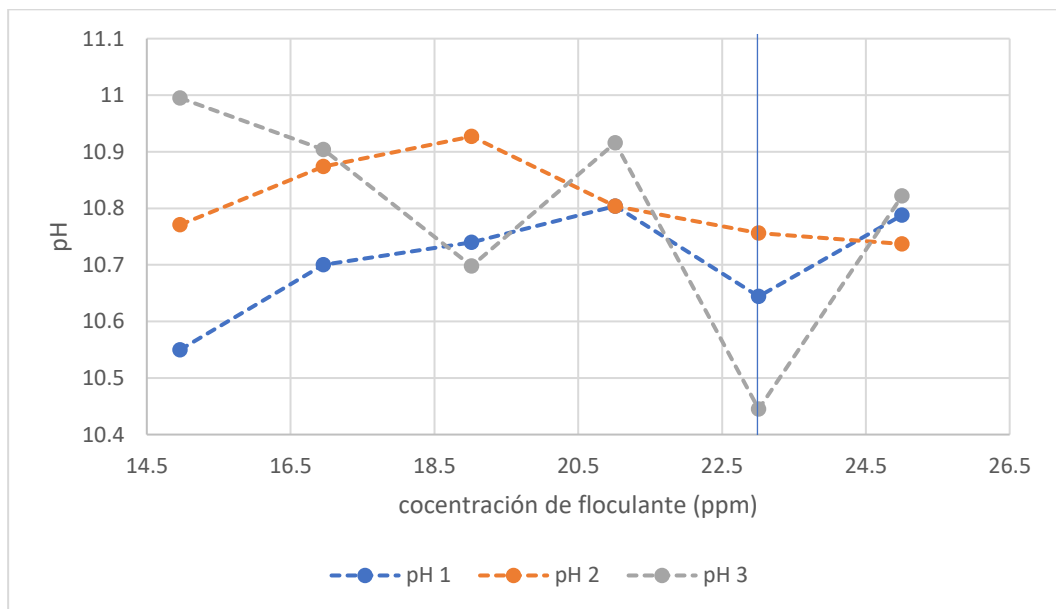


Figura 13. Comportamiento de pH al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 338 ppm

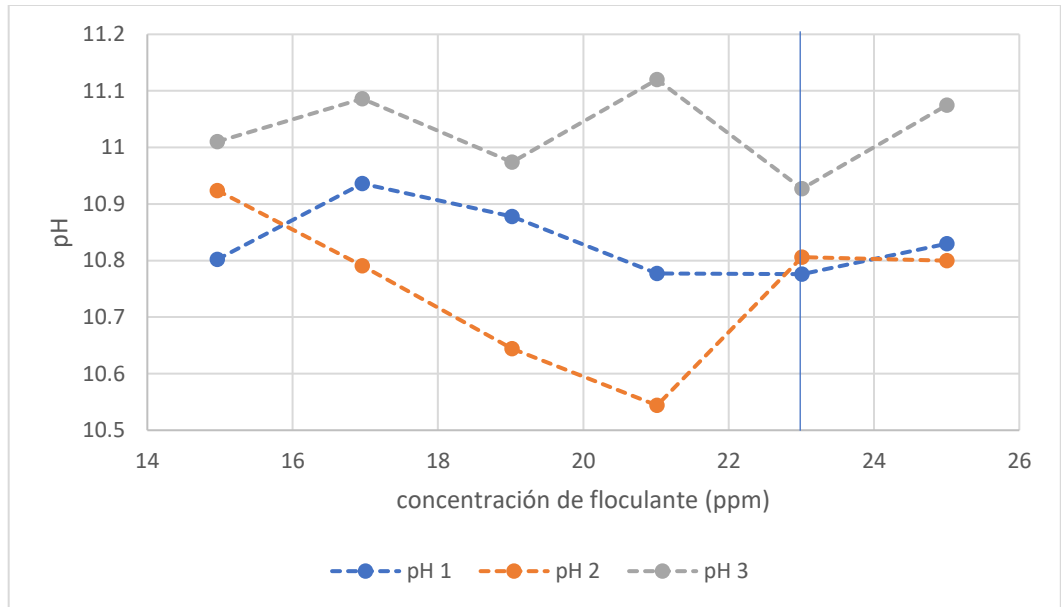


Figura 14. Comportamiento de pH al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 358 ppm

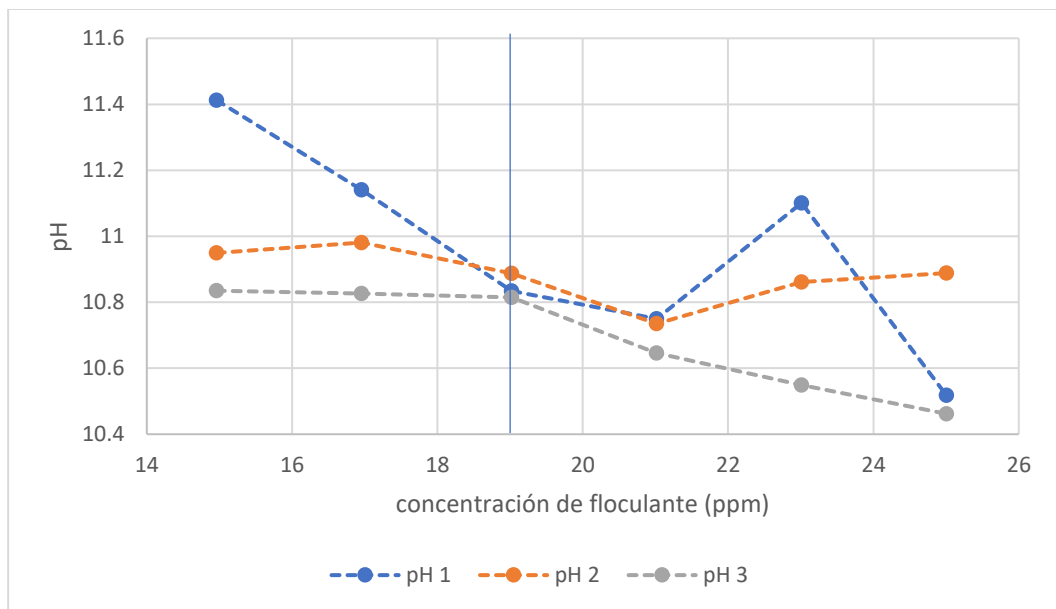


Figura 15. Comportamiento de pH al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 378 ppm

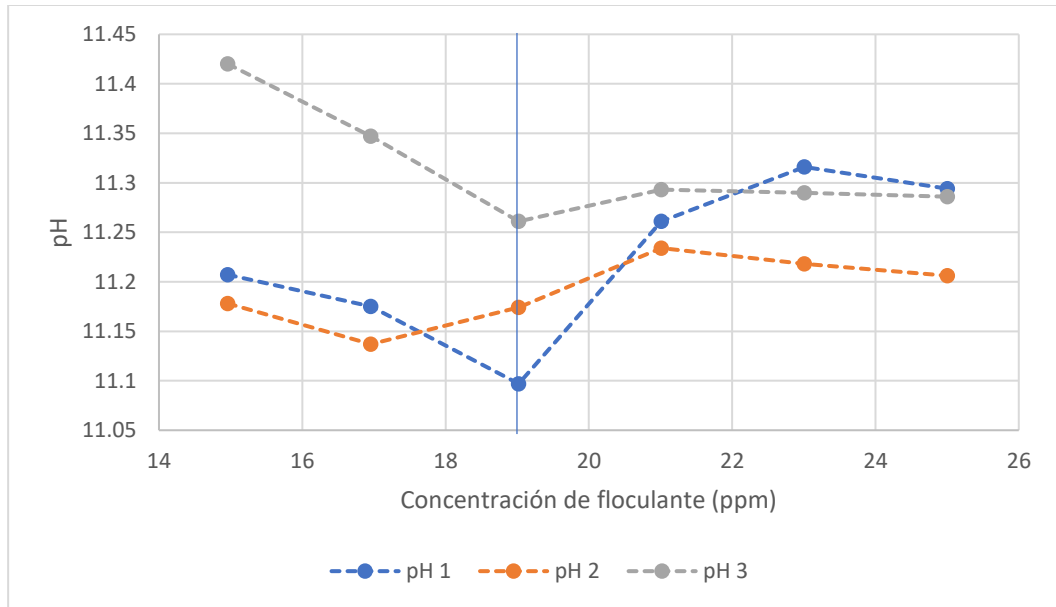


Figura 16. Comportamiento de pH al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 398 ppm

D. Turbidez del agua tratada después de su filtración.

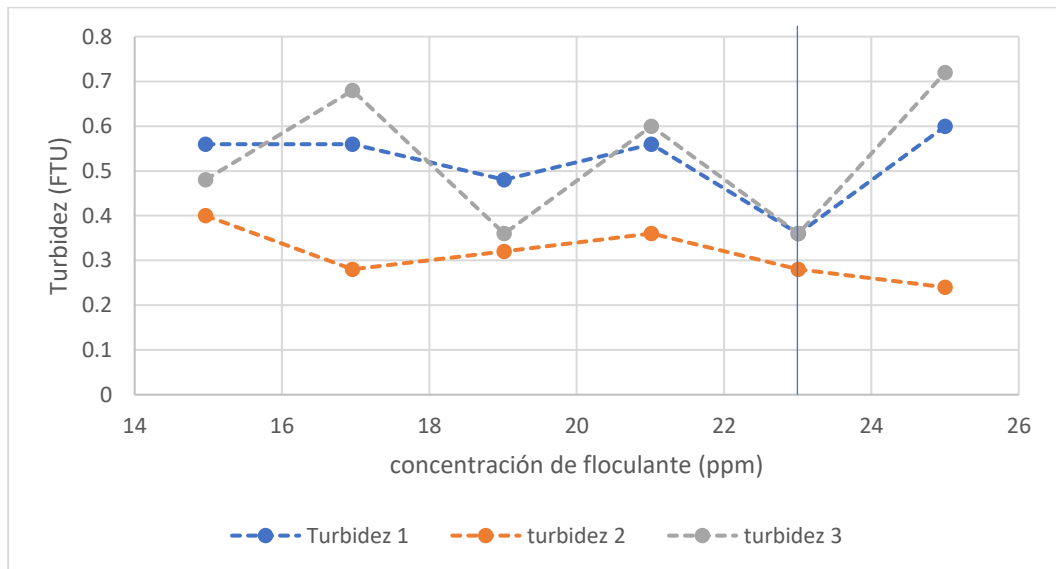


Figura 17. Comportamiento de la turbidez al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 338 ppm

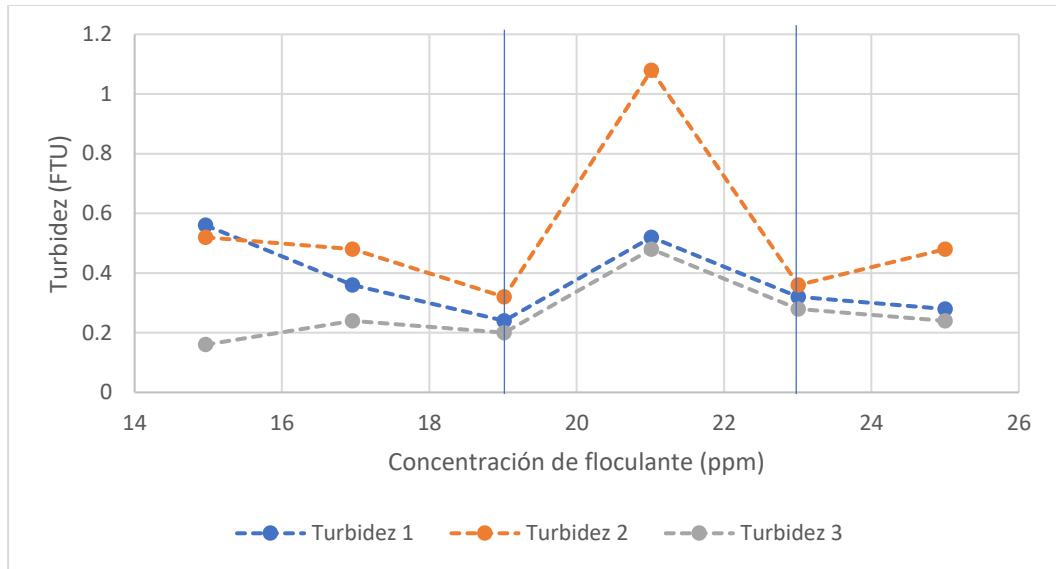


Figura 18. Comportamiento de la turbidez al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 358 ppm

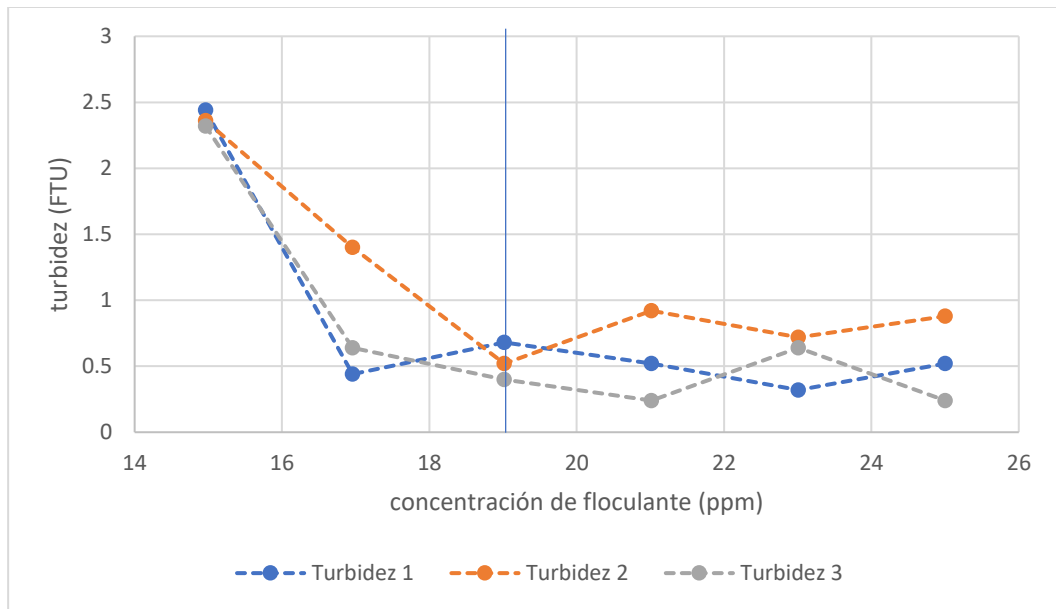


Figura 19. Comportamiento de la turbidez al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 378 ppm

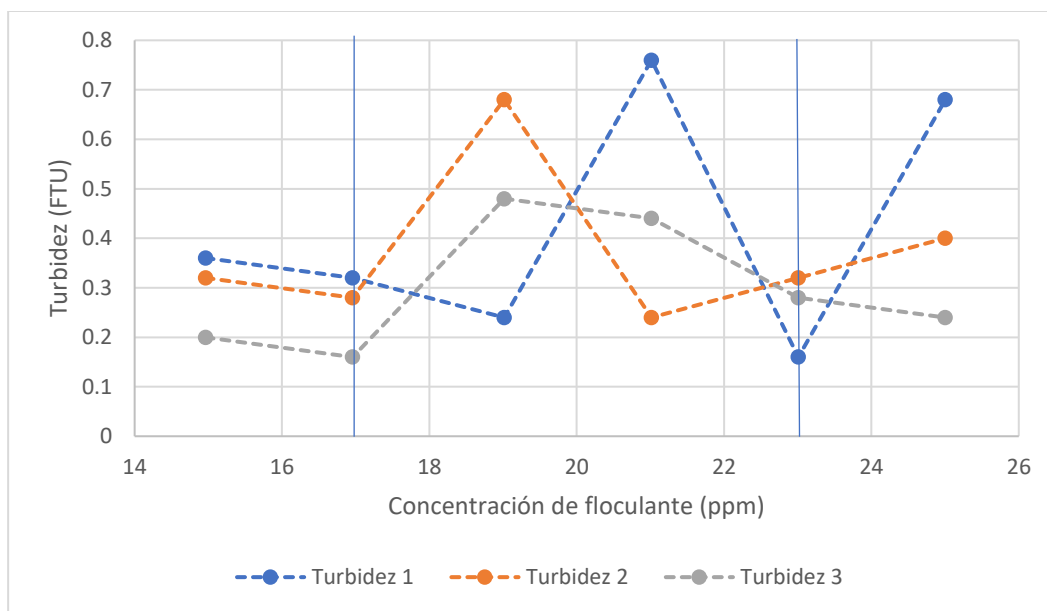


Figura 20. Comportamiento de la turbidez al variar la concentración de floculante y mantener el coagulante en 398 ppm

E. Resultados de alcalinidad, desviación estándar, turbidez y pH.

Cuadro 13. Análisis estadístico del agua cruda utilizada para las pruebas con 338 ppm

| Dureza Media | ± | Desviación estándar | Alcalinidad Media | ± | Desviación estándar | Turbidez Media (FTU) | ± | Desviación estándar | pH | ± | Desviación estándar |
|--------------|-----|---------------------|-------------------|-----|---------------------|----------------------|------|---------------------|-------|------|---------------------|
| 113 | 2.6 | 9.45 | 132 | 2.9 | 6 | 0.24 | 0.05 | 0.16 | 7.447 | 0.05 | 0.07 |

Cuadro 14. Análisis estadístico de las propiedades obtenida al comparar los resultados con las mismas concentraciones para las pruebas a 338 ppm de coagulante.

| Concentración (ppm) | Dureza Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Alcalinidad Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Alcalinidad P Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Turbidez Media (FTU) | ± | Desviación estándar |
|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|-------|---------------------|
| 14.96 | 70 | 7.21 | 28.7 | 3.06 | 71 | 10.1 | 0.480 | 0.036 | 0.08 |
| 16.96 | 70 | 4.00 | 28.7 | 1.15 | 71 | 3.6 | 0.507 | 0.043 | 0.21 |
| 19.02 | 65 | 6.11 | 27.3 | 2.31 | 66 | 6.9 | 0.467 | 0.044 | 0.10 |
| 21.01 | 65 | 4.62 | 27.3 | 1.15 | 70 | 6.5 | 0.507 | 0.037 | 0.13 |
| 23.01 | 59 | 1.15 | 24.7 | 1.15 | 59 | 7.0 | 0.333 | 0.035 | 0.05 |
| 25.00 | 61 | 1.15 | 25.3 | 1.15 | 66 | 1.5 | 0.520 | 0.049 | 0.25 |

Cuadro 15. Análisis estadístico del agua cruda utilizada para las pruebas con 358 ppm

| Dureza Media | ± | Desviación estándar | Alcalinidad M Media | ± | Desviación estándar | Turbidez Mediana (FTU) | ± | Desviación estándar | pH | ± | Desviación estándar |
|--------------|-----|---------------------|---------------------|-----|---------------------|------------------------|------|---------------------|-------|------|---------------------|
| 110 | 2.6 | 4 | 143 | 3.0 | 7.57 | 0.080 | 0.03 | 0.05 | 7.645 | 0.05 | 0.23 |

Cuadro 16. Análisis estadístico de las propiedades obtenidas al comparar los resultados con las mismas concentraciones para las pruebas a 358 ppm de coagulante

| Concentración (ppm) | Dureza Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Alcalinidad Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Alcalinidad P Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Turbidez Media (FTU) | ± | Desviación estándar |
|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|-------|---------------------|
| 14.96 | 73 | 11.55 | 26 | 3.46 | 73 | 8.54 | 0.413 | 0.056 | 0.22 |
| 16.96 | 73 | 8.33 | 28 | 2.00 | 75 | 13.61 | 0.360 | 0.039 | 0.12 |
| 19.02 | 69 | 9.45 | 25 | 3.06 | 72 | 11.14 | 0.253 | 0.037 | 0.06 |
| 21.01 | 67 | 9.45 | 25 | 5.03 | 72 | 13.05 | 0.693 | 0.041 | 0.34 |
| 23.01 | 61 | 6.43 | 23 | 1.15 | 65 | 9.87 | 0.320 | 0.035 | 0.04 |
| 25.00 | 65 | 6.43 | 24 | 2 | 69 | 10.15 | 0.333 | 0.039 | 0.13 |

Cuadro 17. Análisis estadístico del agua cruda utilizada para las pruebas con 378 ppm

| Dureza Media | ± | Desviación estándar | Alcalinidad M Media | ± | Desviación estándar | Turbidez Mediana (FTU) | ± | Desviación estándar | pH | ± | Desviación estándar |
|--------------|-----|---------------------|---------------------|-----|---------------------|------------------------|-------|---------------------|-------|------|---------------------|
| 129 | 2.8 | 2.31 | 157 | 3.2 | 5.77 | 0.080 | 0.031 | 0.02 | 7.556 | 0.05 | 0.07 |

Cuadro 18. Análisis estadístico de las propiedades obtenidas al comparar los resultados con las mismas concentraciones para las pruebas a 378 ppm de coagulante.

| Concentración (ppm) | Dureza Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Alcalinidad Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Alcalinidad P Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Turbidez Media (FTU) | ± | Desviación estándar |
|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|-------|---------------------|
| 14.96 | 92 | 2.52 | 33 | 1.15 | 79 | 8.5 | 2.373 | 0.035 | 0.06 |
| 16.96 | 85 | 4.62 | 33 | 3.06 | 83 | 8.7 | 0.827 | 0.047 | 0.51 |
| 19.02 | 71 | 1.15 | 29 | 1.15 | 72 | 6.7 | 0.533 | 0.037 | 0.14 |
| 21.01 | 72 | 3.46 | 31 | 4.16 | 72 | 4.5 | 0.560 | 0.053 | 0.34 |
| 23.01 | 71 | 3.06 | 30 | 5.29 | 68 | 2.0 | 0.560 | 0.042 | 0.21 |
| 25.00 | 68 | 3.46 | 30 | 7.21 | 67 | 6.1 | 0.547 | 0.052 | 0.32 |

Cuadro 19. Análisis estadístico del agua cruda utilizada para las pruebas con 398 ppm

| Dureza Media | ± | Desviación estándar | Alcalinidad M Media | ± | Desviación estándar | Turbidez Mediana (FTU) | ± | Desviación estándar | pH | ± | Desviación estándar |
|--------------|-----|---------------------|---------------------|-----|---------------------|------------------------|-------|---------------------|----------|------|---------------------|
| 113 | 2.6 | 3.06 | 140 | 1.7 | 5.29 | 0.120 | 0.064 | 0.1 | 7.764667 | 0.05 | 0.02 |

Cuadro 20. Análisis estadístico de las propiedades obtenidas al comparar los resultados con las mismas concentraciones para las pruebas a 398 ppm de coagulante

| Concentración (ppm) | Dureza Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Alcalinidad Media (ppm) ±2 | Desviación estándar | Alcalinidad P Media (ppm) ±2.5 | Desviación estándar | Turbidez Media (FTU) | ± | Desviación estándar |
|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------|-------|---------------------|
| 14.96 | 95 | 11.37 | 22 | 2.89 | 110 | 12.0 | 0.293 | 0.038 | 0.08 |
| 16.96 | 92 | 10.58 | 23 | 1.15 | 101 | 7.9 | 0.253 | 0.040 | 0.08 |
| 19.02 | 83 | 10.07 | 20 | 1.53 | 95 | 10.3 | 0.467 | 0.046 | 0.22 |
| 21.01 | 92 | 4 | 23 | 1.15 | 105 | 7.9 | 0.480 | 0.047 | 0.26 |
| 23.01 | 96 | 6.93 | 23 | 2.31 | 106 | 6.9 | 0.253 | 0.040 | 0.08 |
| 25.00 | 92 | 4 | 22 | 0 | 111 | 6.1 | 0.440 | 0.045 | 0.22 |

Cuadro 21. Análisis estadístico para todas las aguas crudas utilizadas en todas las pruebas.

| Dureza media (ppm) | desviación estándar | Alcalinidad media (ppm) | desviación estándar | pH medio (ppm) | desviación estándar | turbidez media (FTU) | desviación estándar |
|--------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 117 | 9.35 | 144 | 10.88 | 8 | 0.17 | 0.142 | 0.112 |

F. Dureza y alcalinidad removida

Cuadro 22. Dureza y alcalinidad removidas en (ppm) para la prueba con 338 ppm de cal.

| mg/L polímero | Alcalinidad removida promedio (ppm) | ± | Dureza removida promedio (ppm) | ± |
|---------------|-------------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 15 ppm | 33 | 3.4 | 43 | 3.4 |
| 17 ppm | 32 | 3.4 | 43 | 3.4 |
| 19 ppm | 39 | 3.4 | 48 | 3.4 |
| 21 ppm | 35 | 3.4 | 49 | 3.3 |
| 23 ppm | 49 | 3.4 | 54 | 3.3 |
| 25 ppm | 40 | 3.4 | 52 | 3.3 |

Cuadro 23. Dureza y alcalinidad removidas en (ppm) para la prueba con 358 ppm de cal.

| mg/L polímero | Alcalinidad removida promedio (ppm) | ± | Dureza removida promedio (ppm) | ± |
|------------------|--|-----|---|-----|
| 15 ppm | 44 | 3.5 | 37 | 3.4 |
| 17 ppm | 40 | 3.5 | 37 | 3.4 |
| 19 ppm | 46 | 3.5 | 41 | 3.3 |
| 21 ppm | 45 | 3.5 | 43 | 3.3 |
| 23 ppm | 55 | 3.5 | 49 | 3.3 |
| 25 ppm | 50 | 3.5 | 45 | 3.3 |

Cuadro 24. Dureza y alcalinidad removidas en (ppm) para la prueba con 378 ppm de cal.

| mg/L polímero | Alcalinidad removida promedio (ppm) | ± | Dureza removida promedio (ppm) | ± |
|------------------|--|-----|---|-----|
| 15 ppm | 46 | 3.7 | 38 | 3.7 |
| 17 ppm | 41 | 3.7 | 44 | 3.6 |
| 19 ppm | 56 | 3.7 | 59 | 3.5 |
| 21 ppm | 55 | 3.7 | 57 | 3.5 |
| 23 ppm | 59 | 3.7 | 58 | 3.5 |
| 25 ppm | 61 | 3.8 | 61 | 3.5 |

Cuadro 25. Dureza y alcalinidad removidas en (ppm) para la prueba con 398 ppm de cal.

| mg/L polímero | Alcalinidad removida promedio (ppm) | ± | Dureza removida promedio (ppm) | ± |
|------------------|--|-----|---|-----|
| 15 ppm | 8 | 2.2 | 18 | 3.6 |
| 17 ppm | 16 | 2.2 | 21 | 3.5 |
| 19 ppm | 25 | 2.2 | 30 | 3.5 |
| 21 ppm | 12 | 2.2 | 21 | 3.5 |
| 23 ppm | 11 | 2.2 | 17 | 3.6 |
| 25 ppm | 7 | 2.2 | 21 | 3.5 |

G. Comparación agua cruda y agua tratada

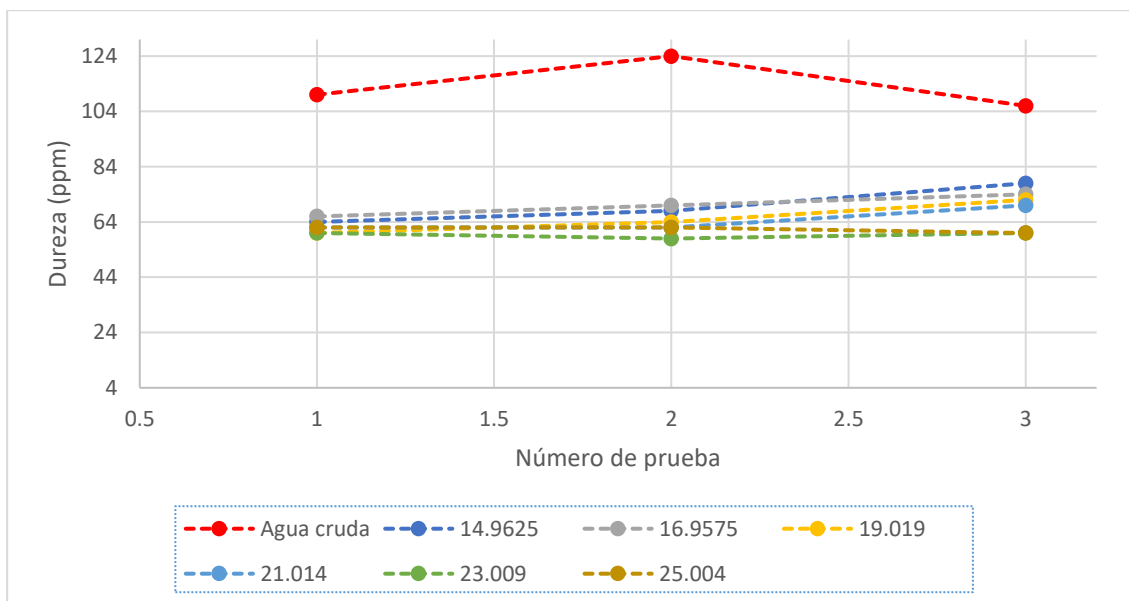


Figura 21. Comparación de la dureza del agua cruda con la del agua tratada 338 ppm de coagulante.

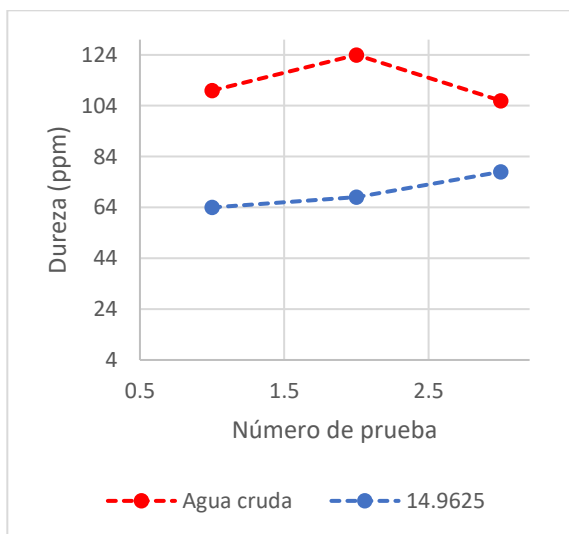


Figura 22. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

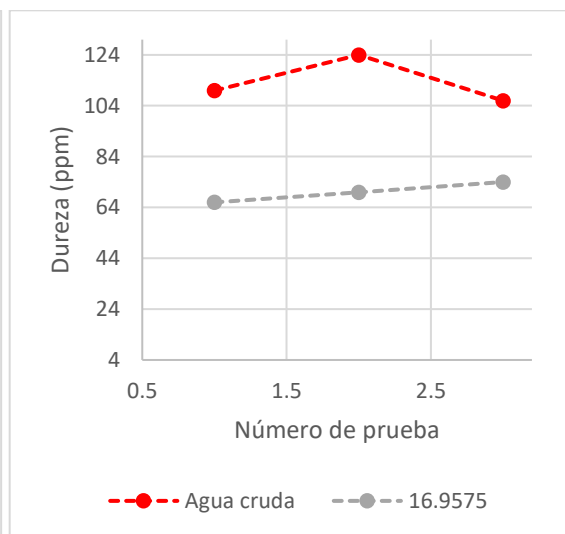


Figura 23. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

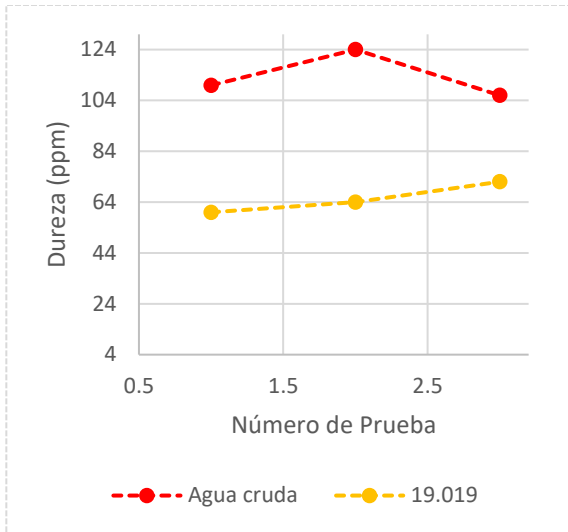


Figura 24. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

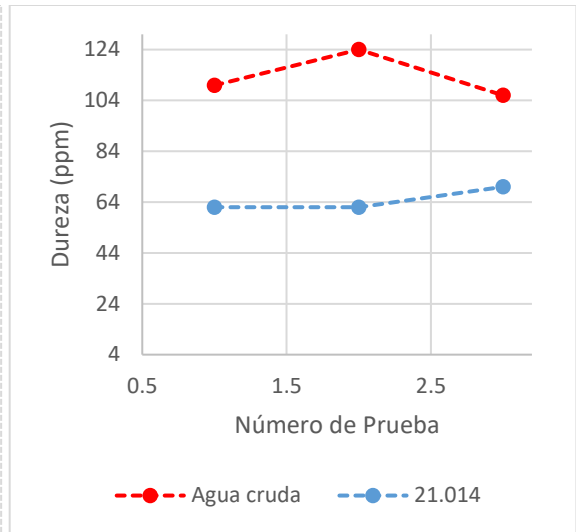


Figura 25. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

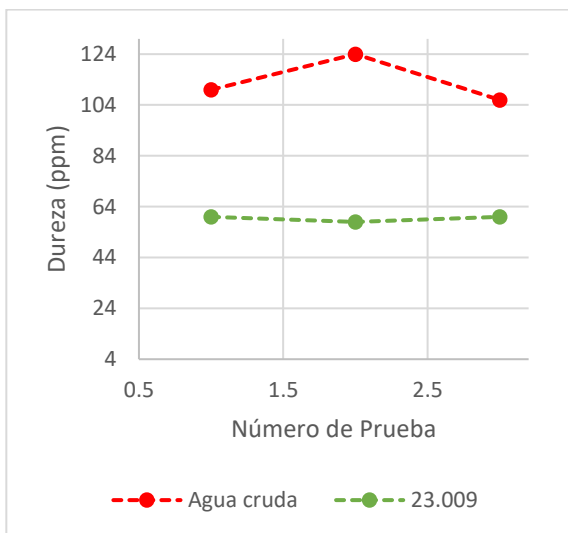


Figura 26. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

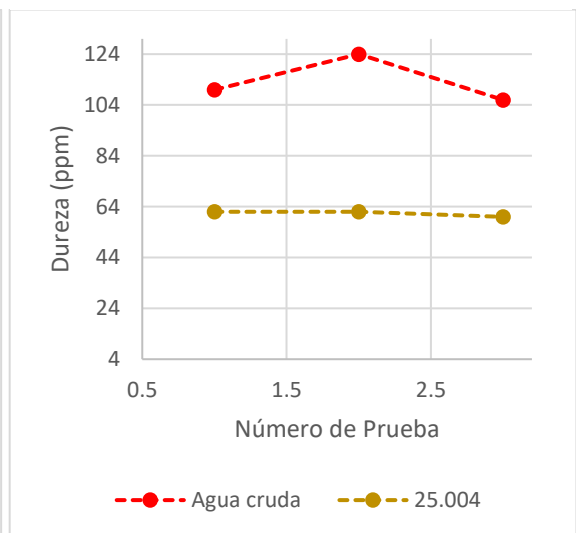


Figura 27. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

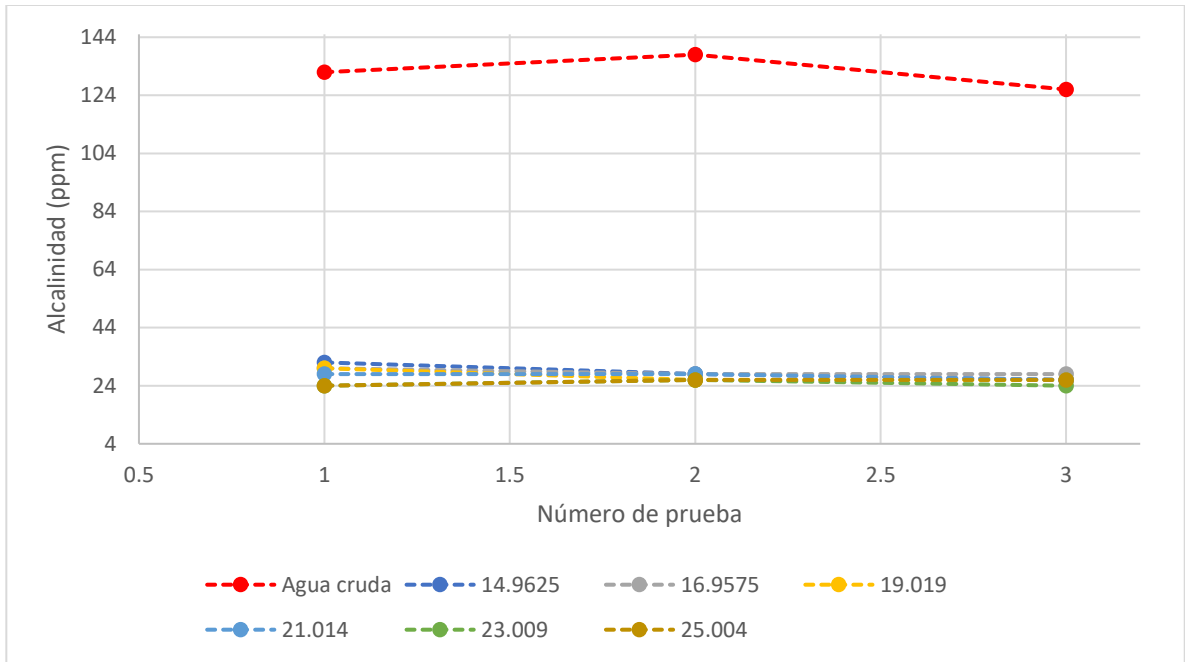


Figura 28. Comparación de la alcalinidad del agua cruda con la del agua tratada 338 ppm de coagulante.

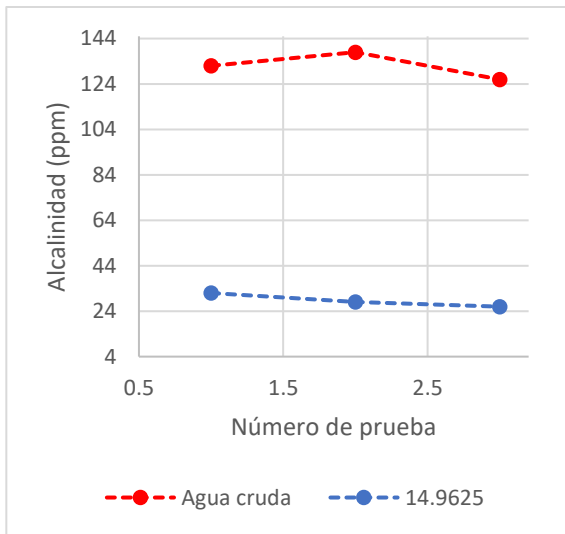


Figura 29. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

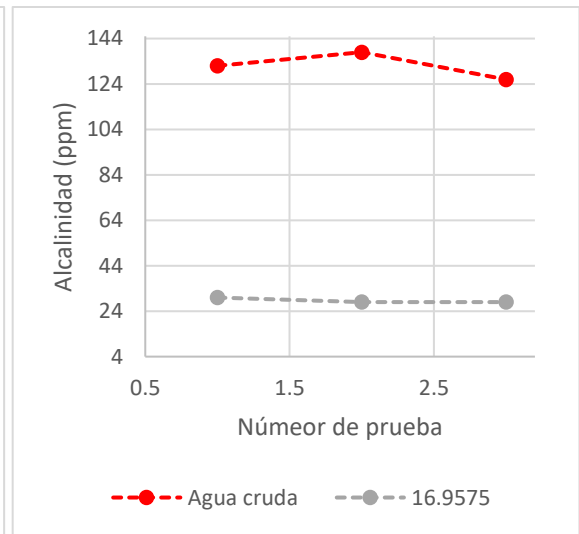


Figura 30. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

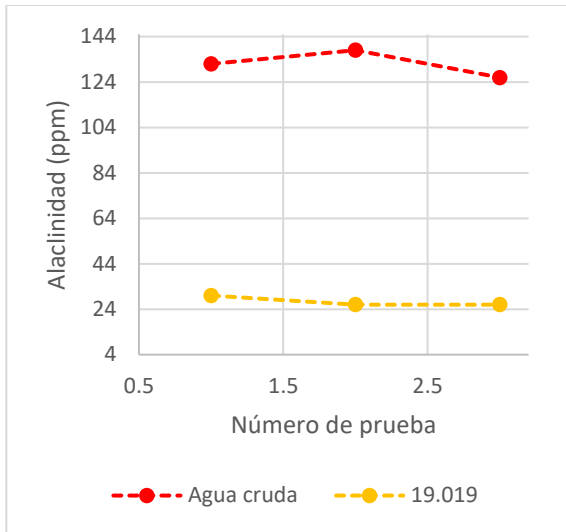


Figura 31. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

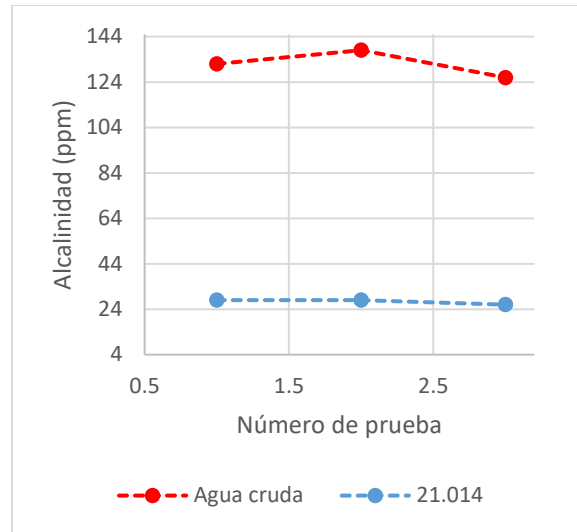


Figura 32. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

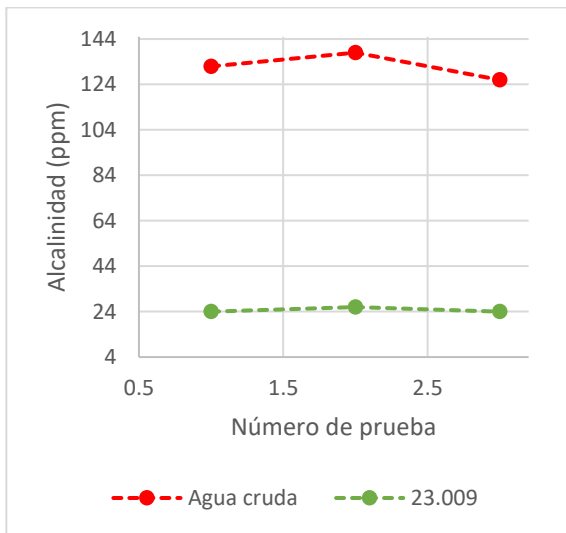


Figura 33. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

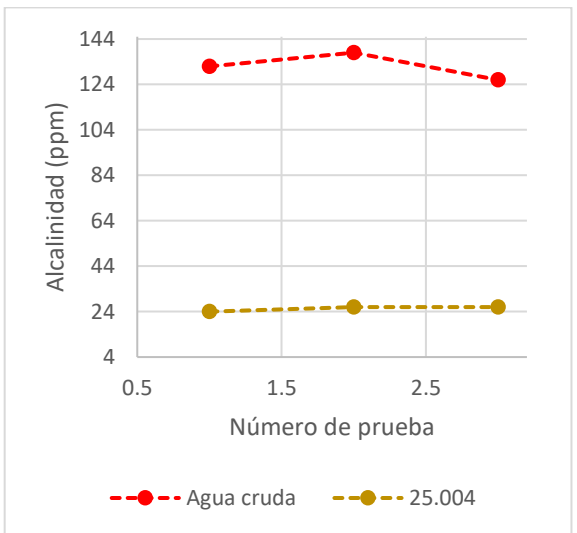


Figura 34. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 338 ppm de coagulante

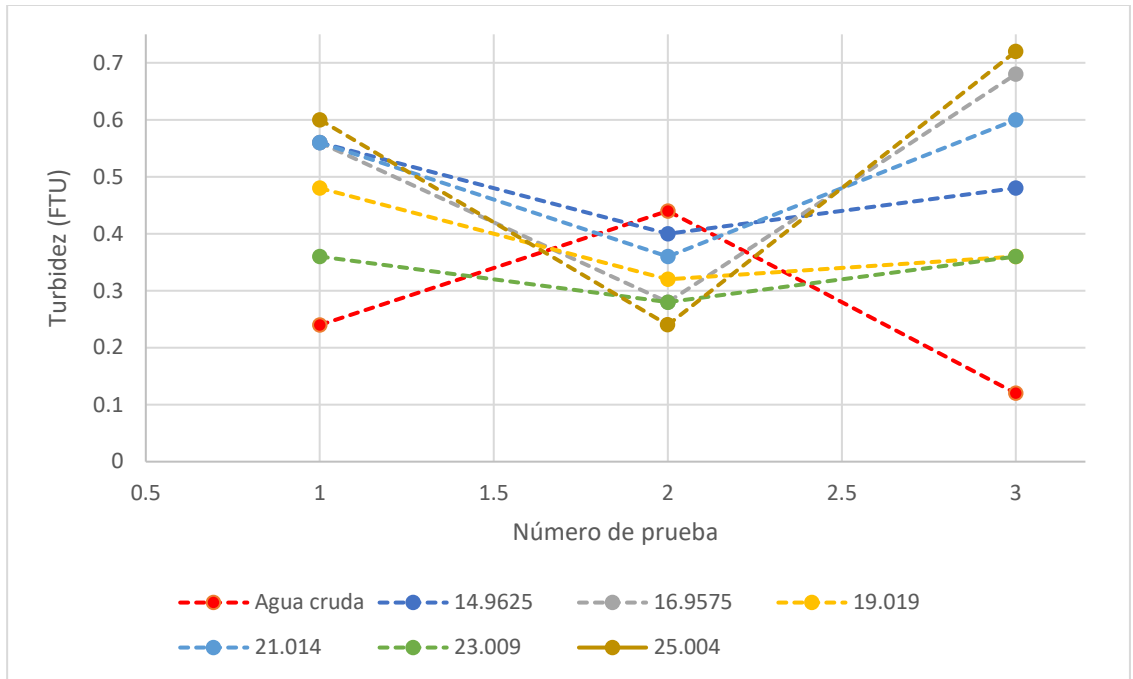


Figura 35. Comparación de la turbidez del agua cruda con la del agua tratada 338 ppm de coagulante.

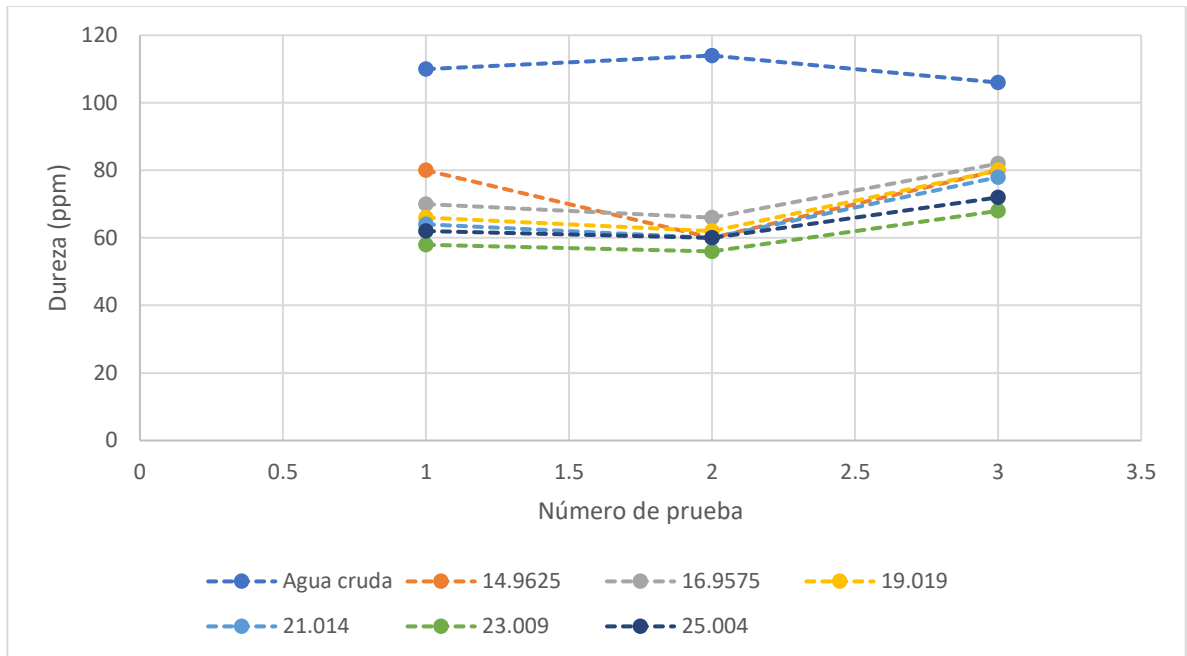


Figura 36. Comparación de la dureza del agua cruda con la del agua tratada 358 ppm de coagulante.

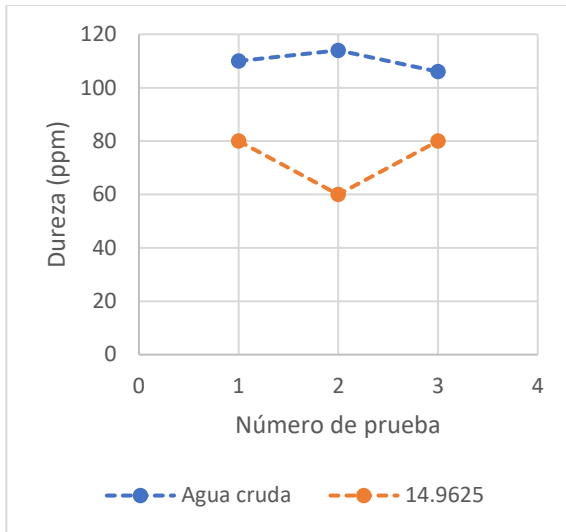


Figura 37. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

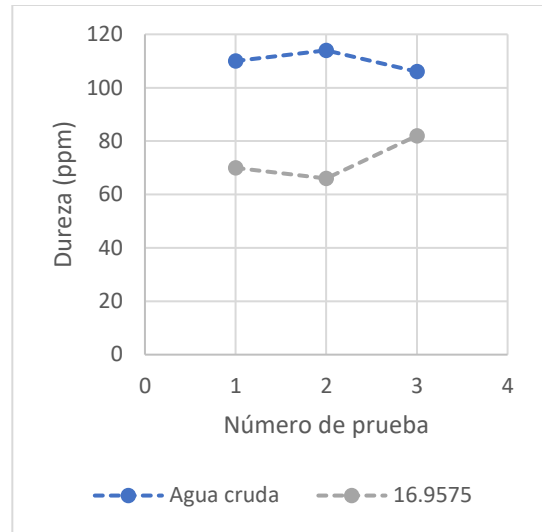


Figura 38. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

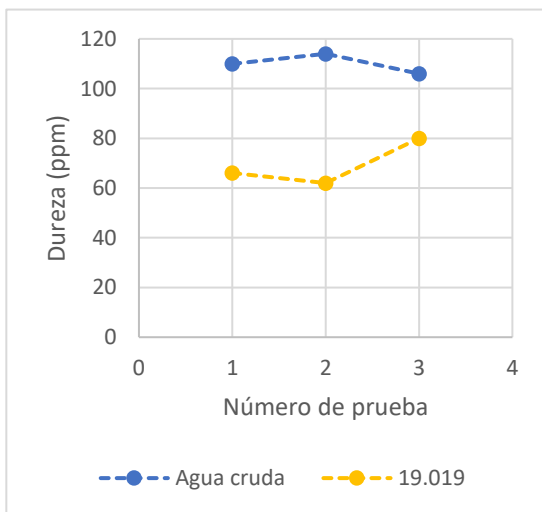


Figura 39. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

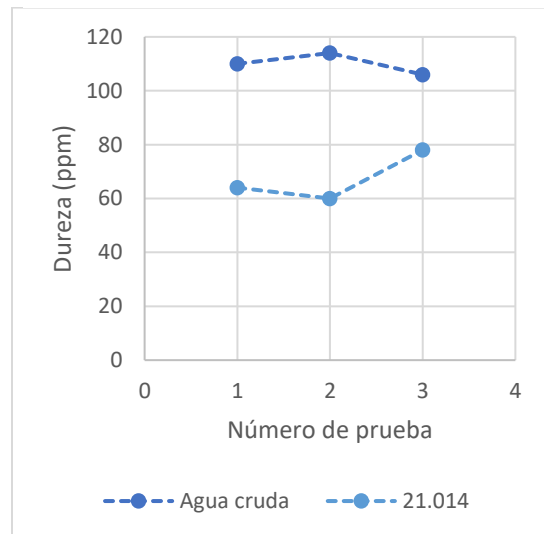


Figura 40. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

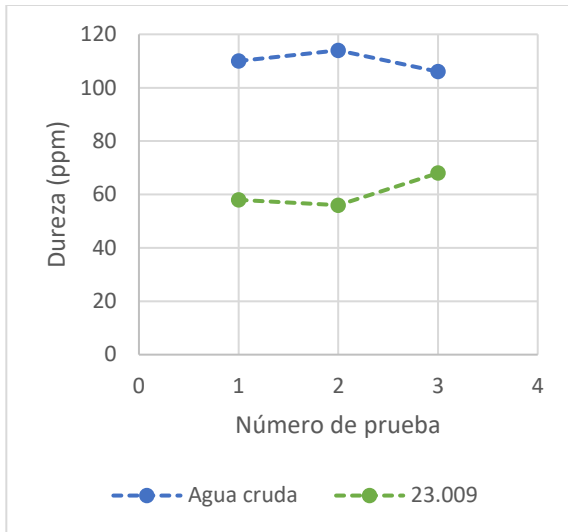


Figura 41. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

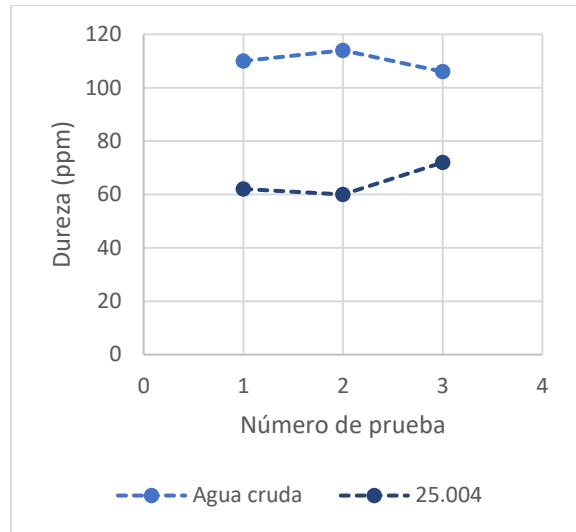


Figura 42. Comparación dureza entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

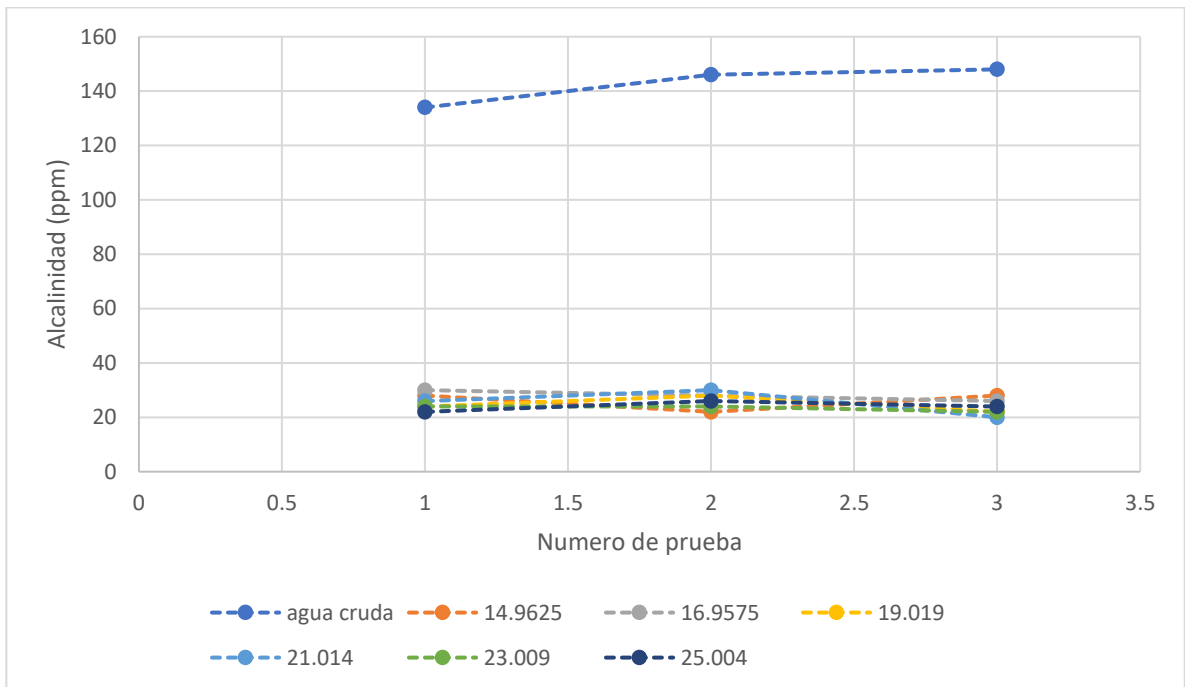


Figura 43. Comparación de la alcalinidad del agua cruda con la del agua tratada 358 ppm de coagulante.

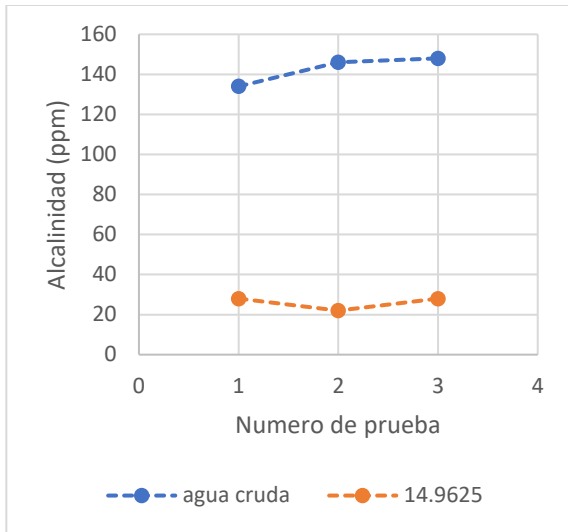


Figura 44. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

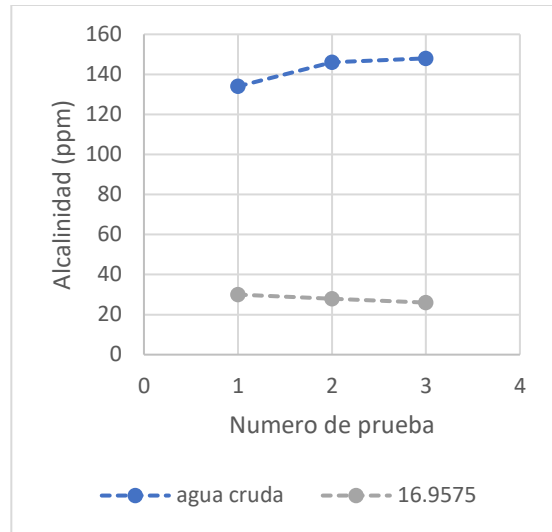


Figura 45. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

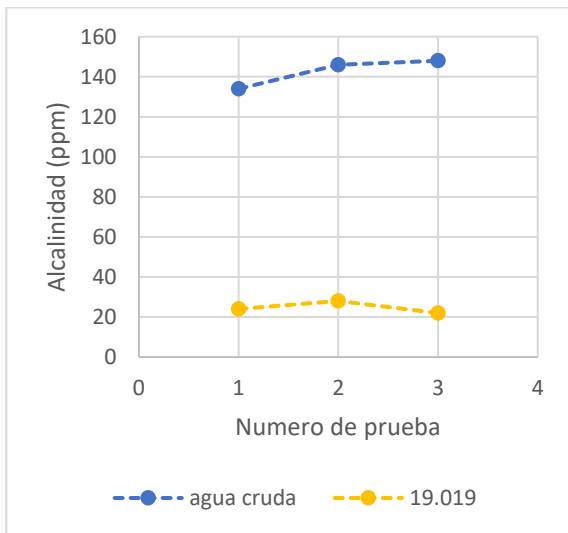


Figura 46. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

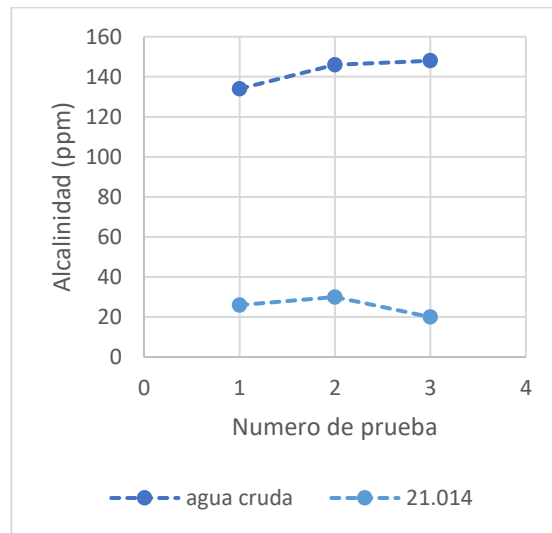


Figura 47. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

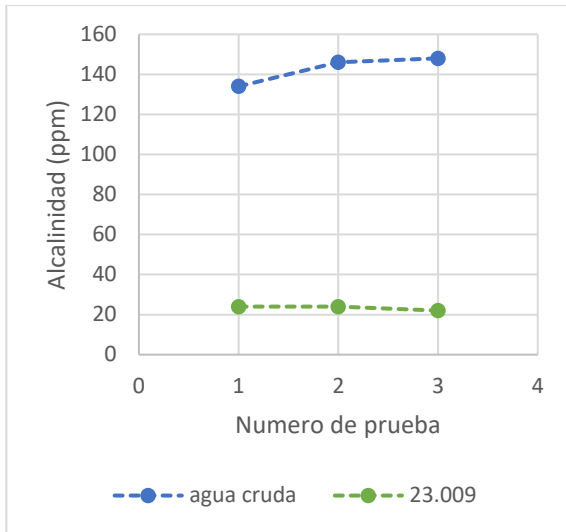


Figura 48. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

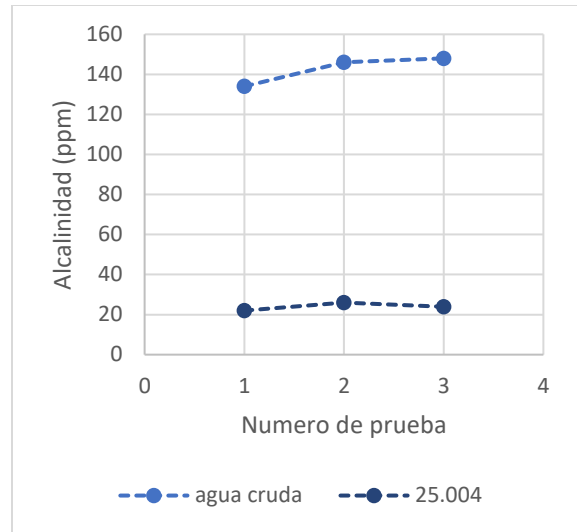


Figura 49. Comparación alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 358 ppm de coagulante

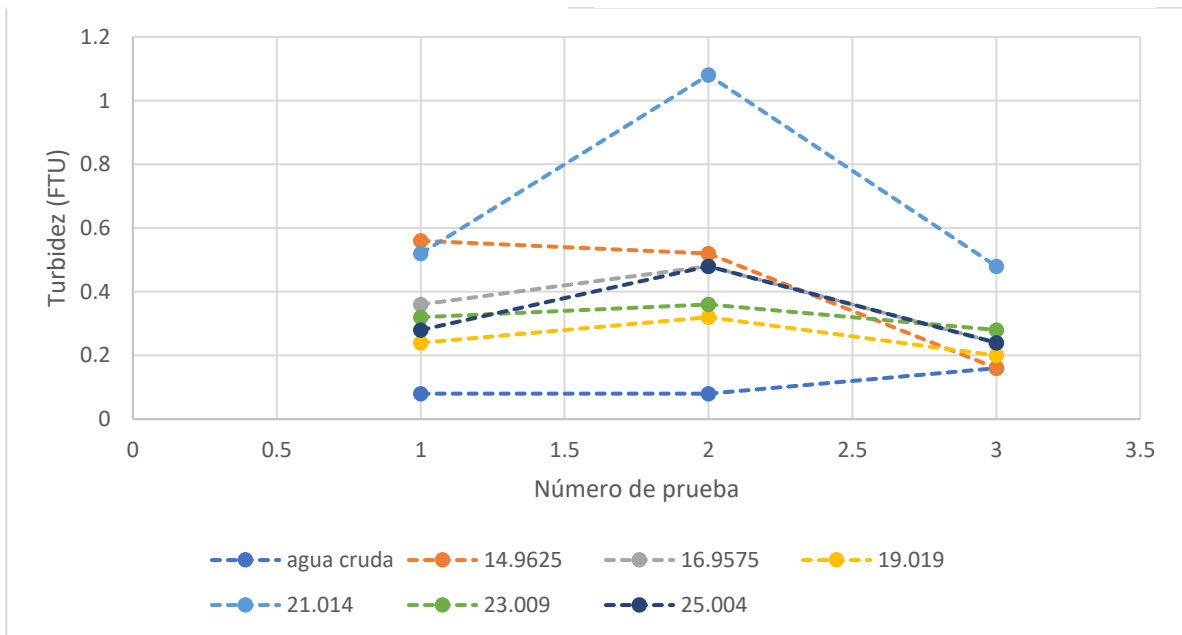


Figura 50. Comparación de la turbidez del agua cruda con la del agua tratada 358 ppm de coagulante.

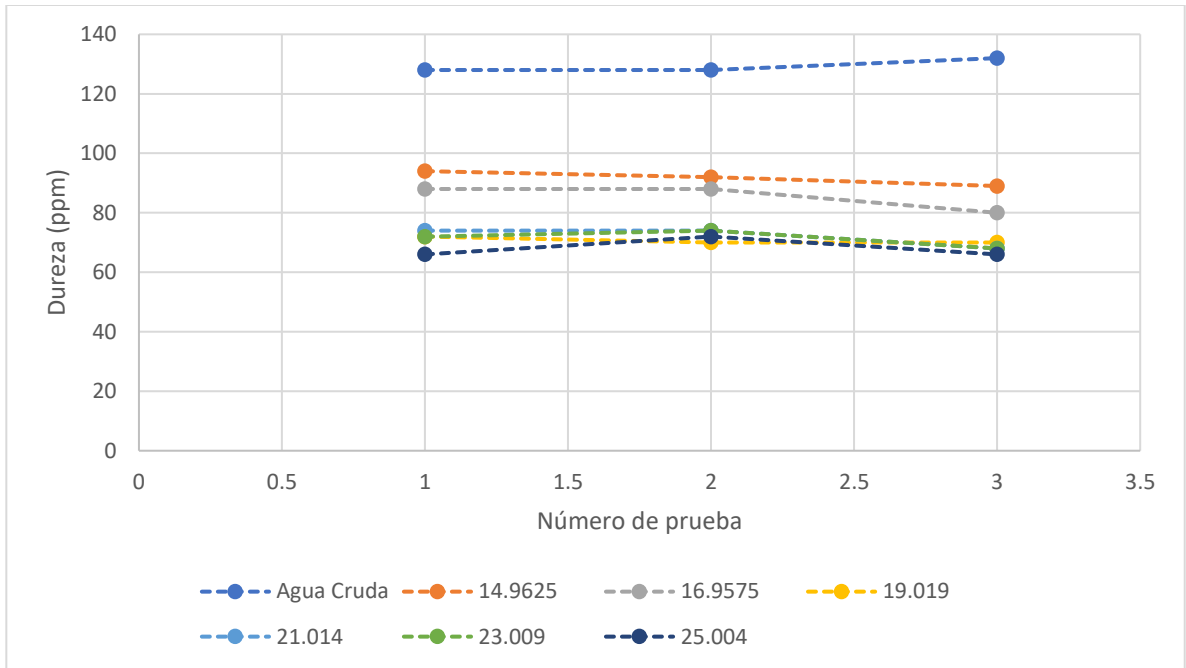


Figura 51. Comparación de la dureza del agua cruda con la del agua tratada 378 ppm de coagulante.

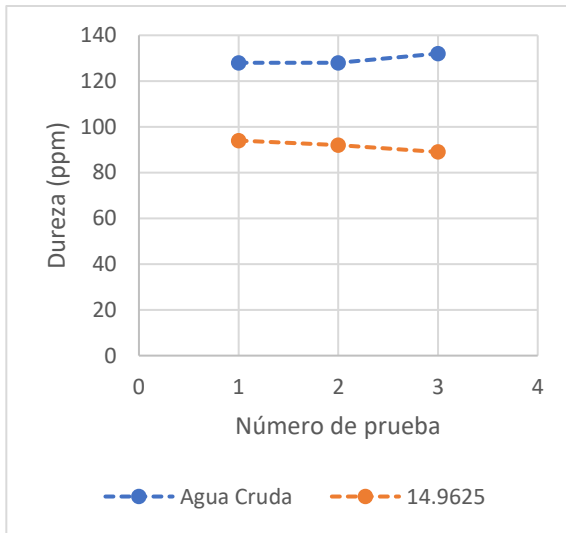


Figura 52. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

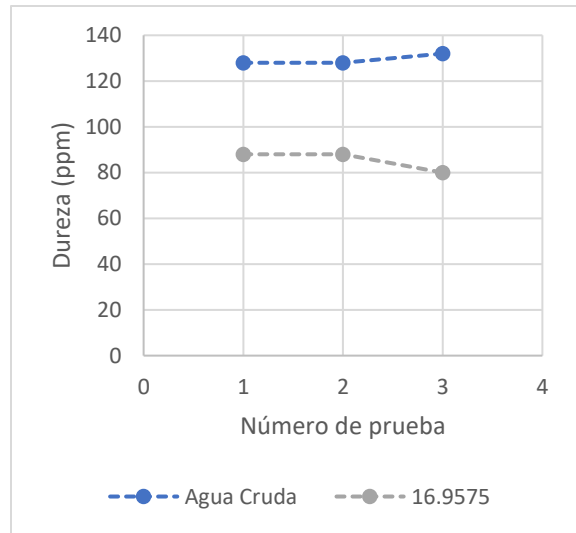


Figura 53. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

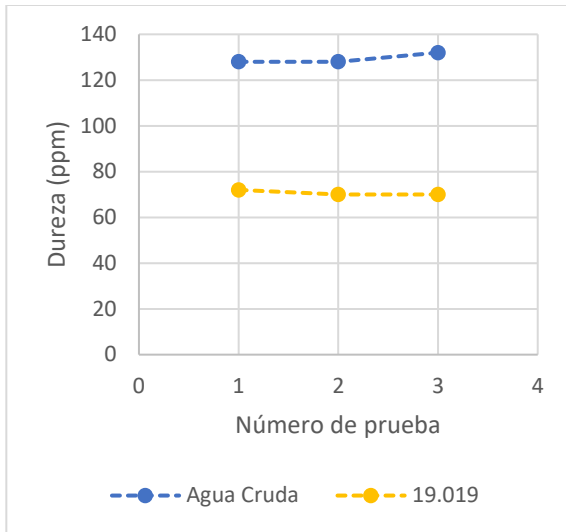


Figura 54. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

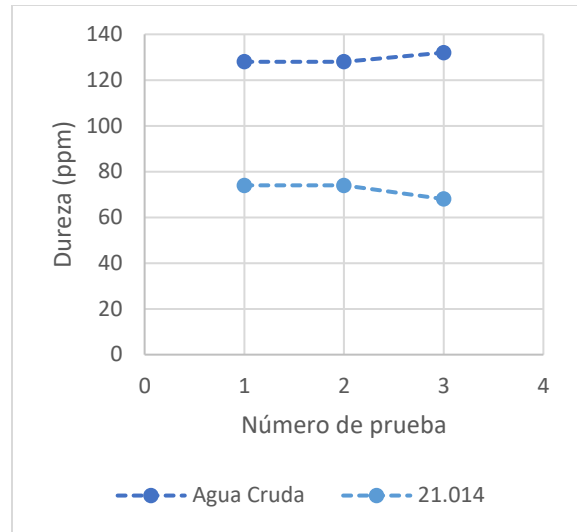


Figura 55. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

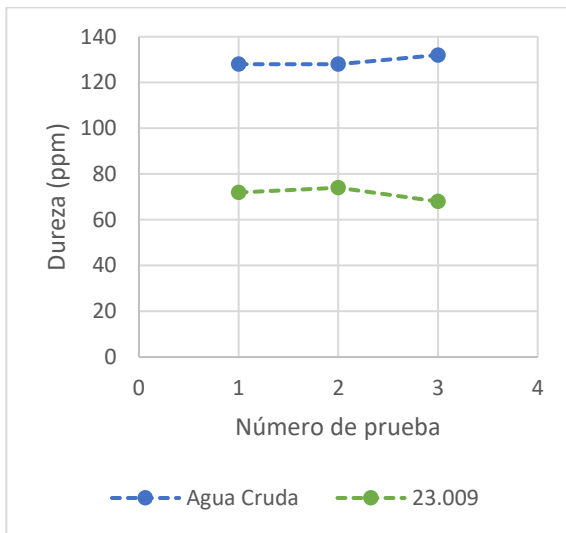


Figura 56. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

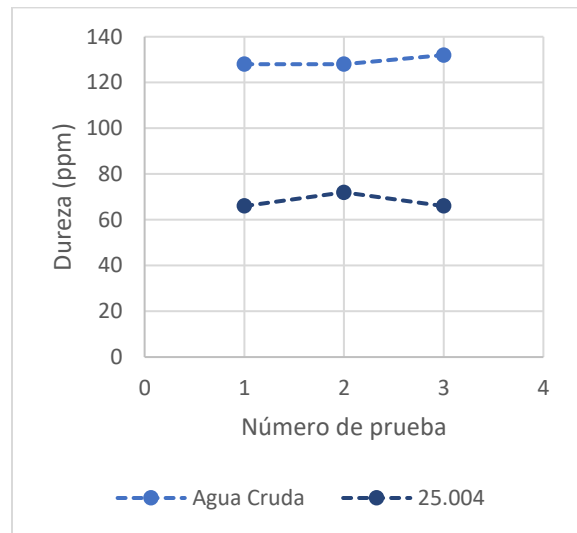


Figura 57. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

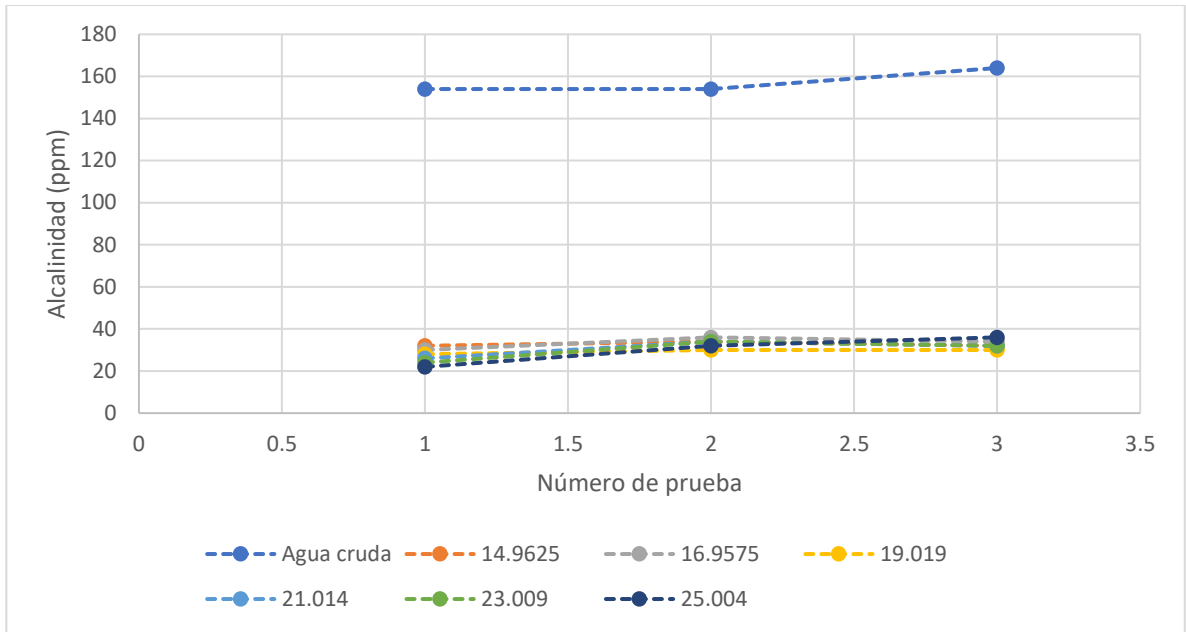


Figura 58. Comparación de la alcalinidad del agua cruda con la del agua tratada 378 ppm de coagulante.

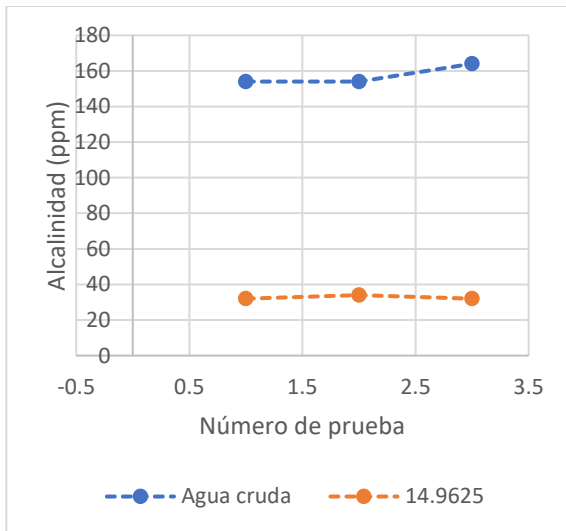


Figura 59. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

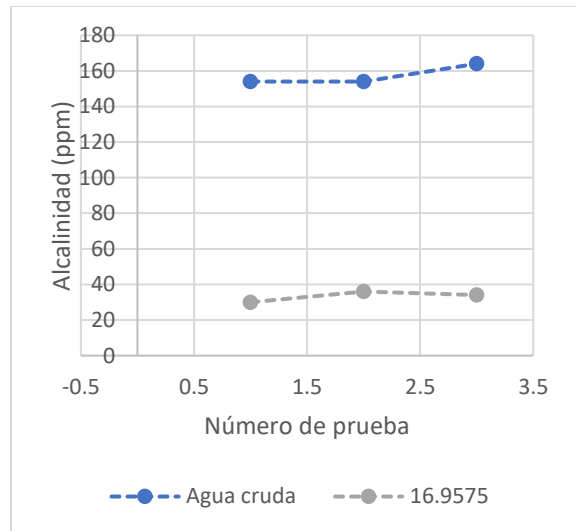


Figura 60. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

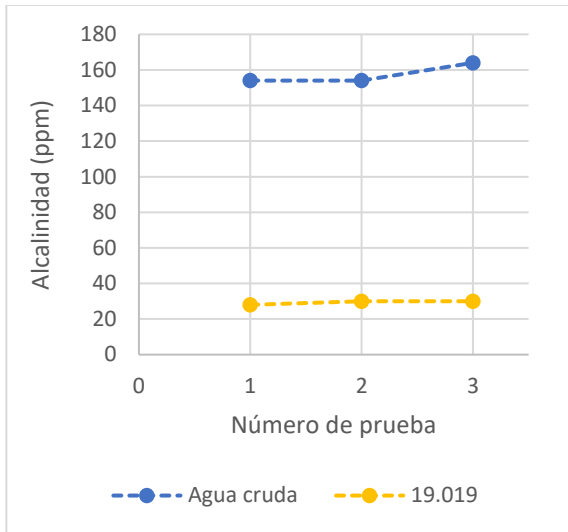


Figura 61. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

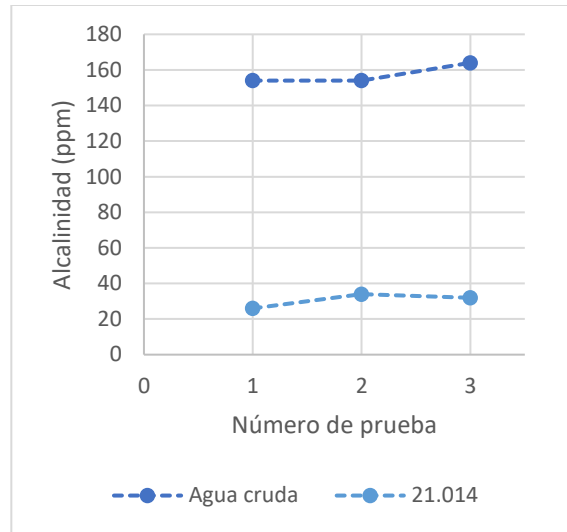


Figura 62. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

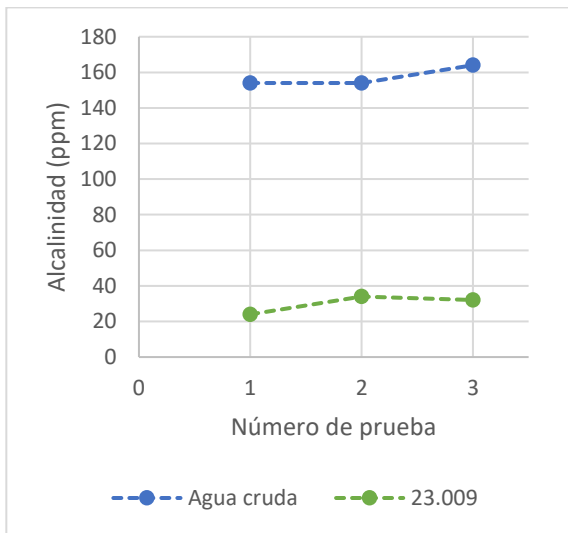


Figura 63. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

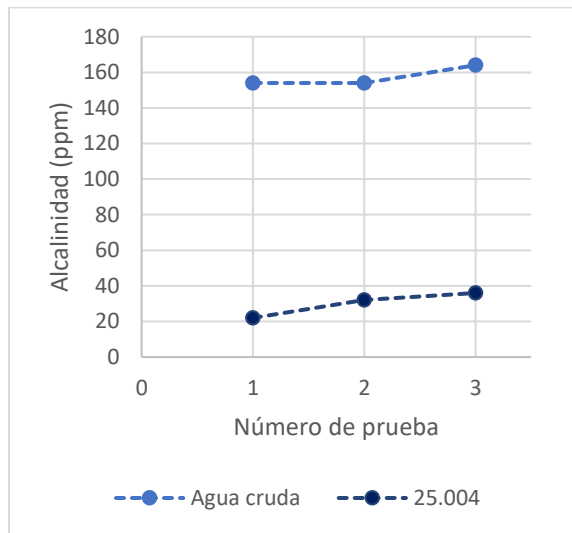


Figura 64. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 378 ppm de coagulante

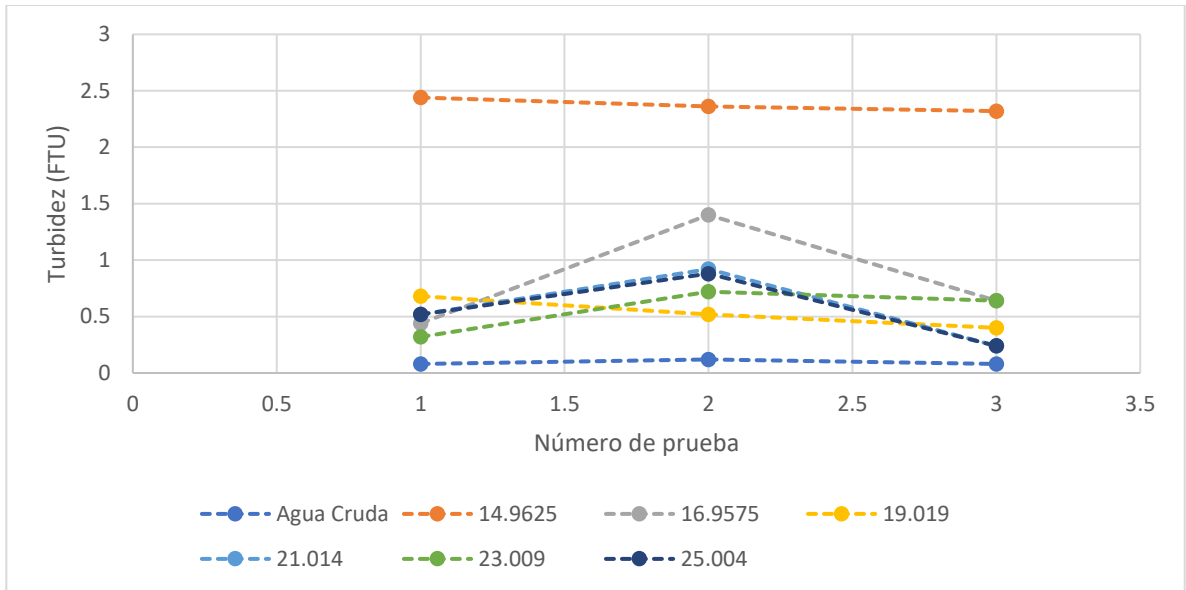


Figura 65. Comparación de la turbidez del agua cruda con la del agua tratada 378 ppm de coagulante.

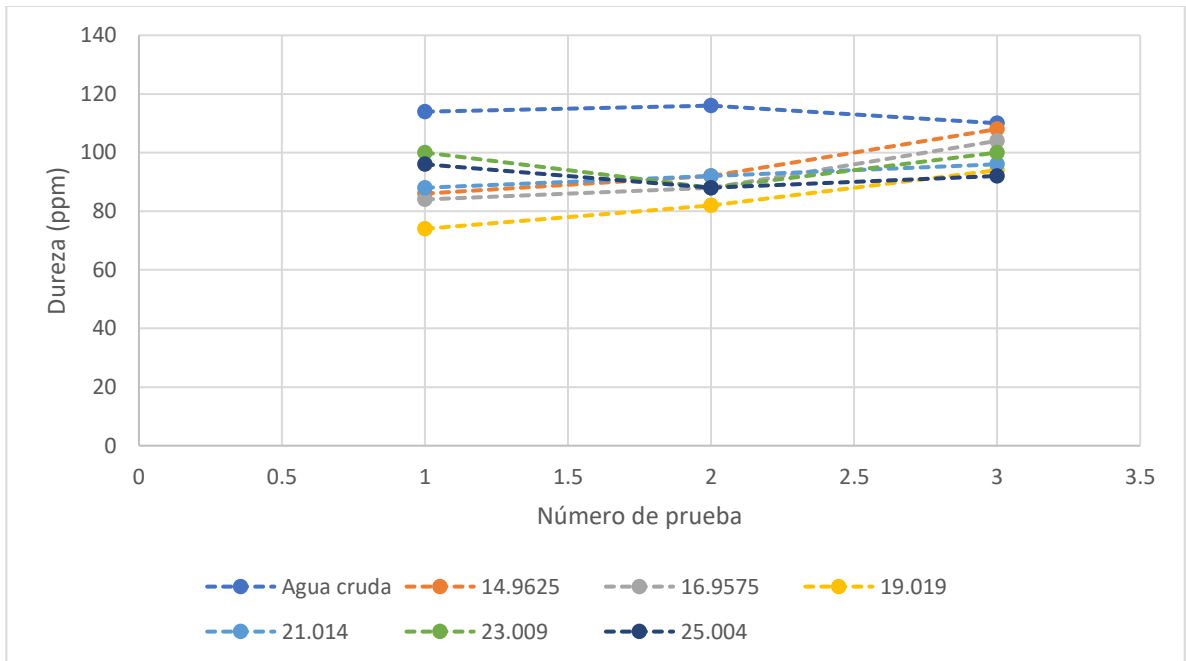


Figura 66. Comparación de la dureza del agua cruda con la del agua tratada 398 ppm de coagulante.

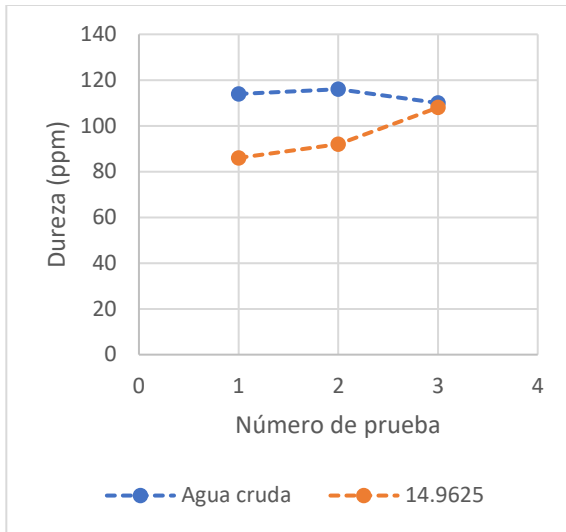


Figura 67. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

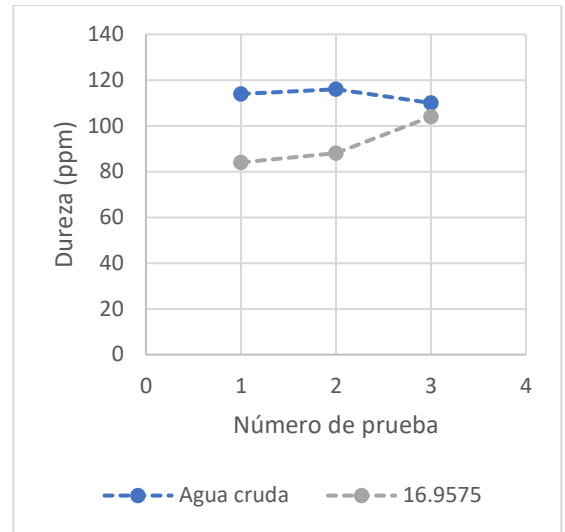


Figura 68. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

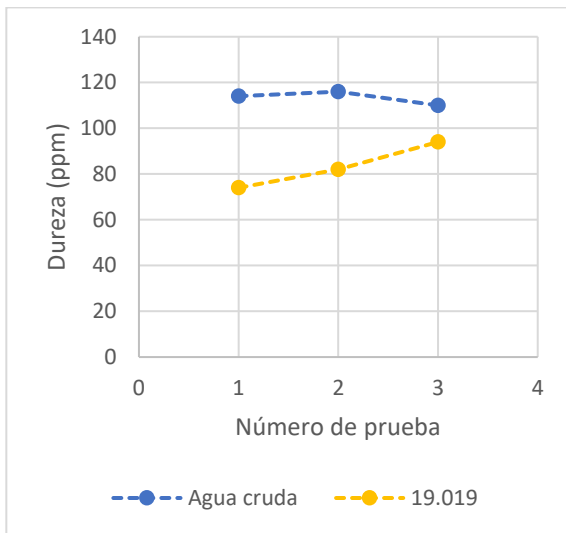


Figura 69. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

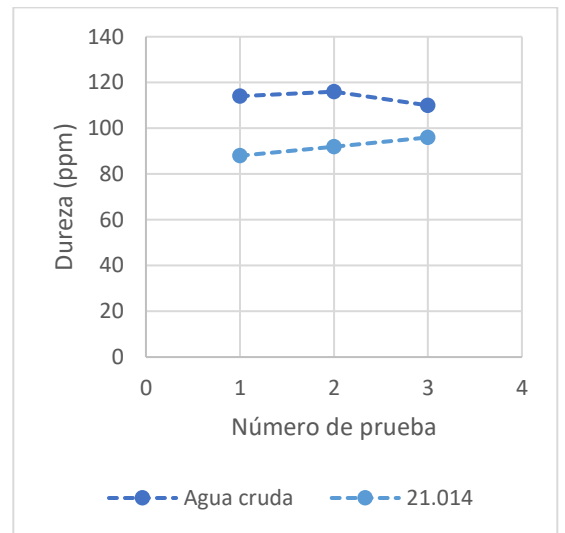


Figura 70. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

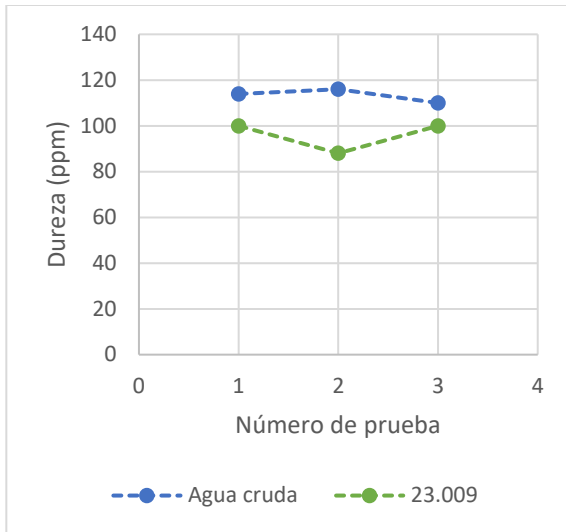


Figura 71. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

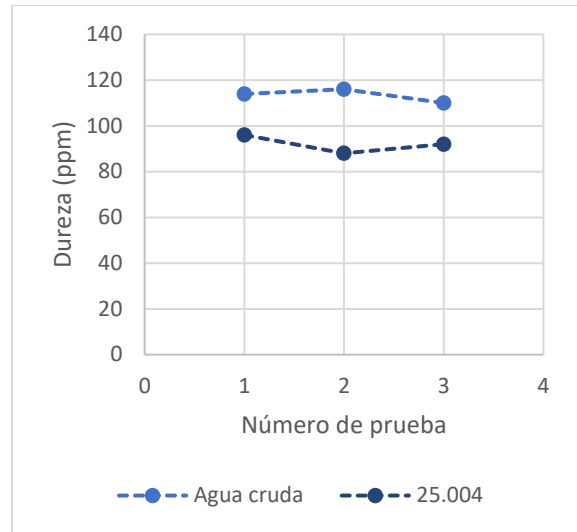


Figura 72. Comparación de dureza entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

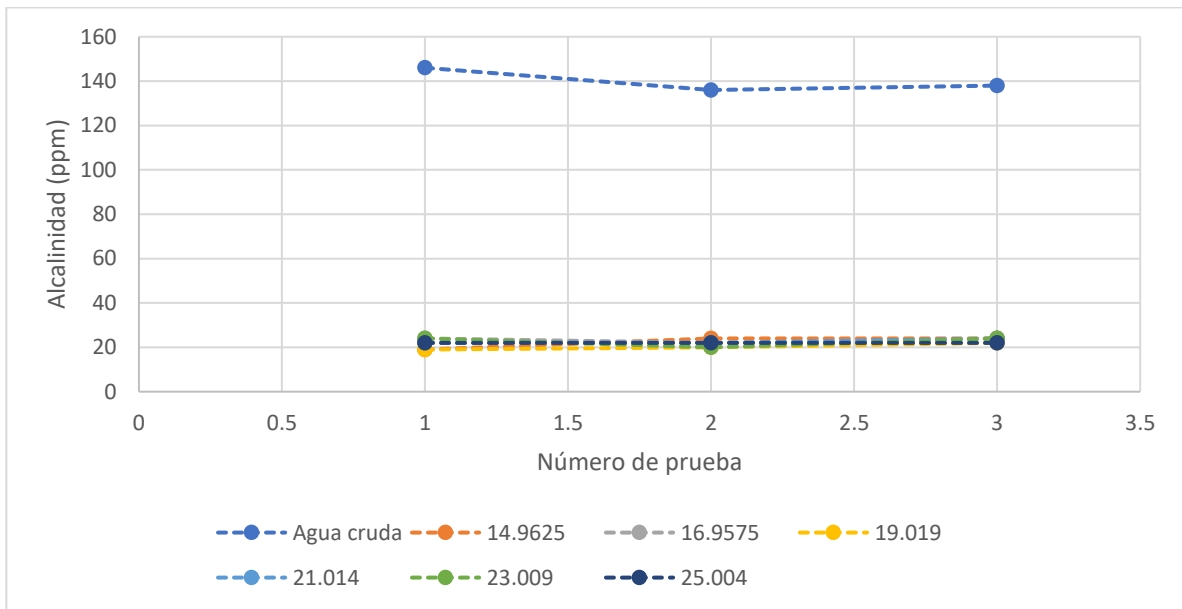


Figura 73. Comparación de la alcalinidad del agua cruda con la del agua tratada 398 ppm de coagulante.

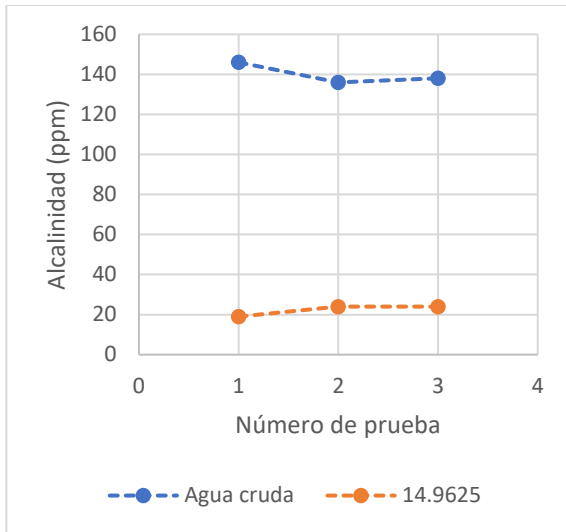


Figura 74. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 15 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

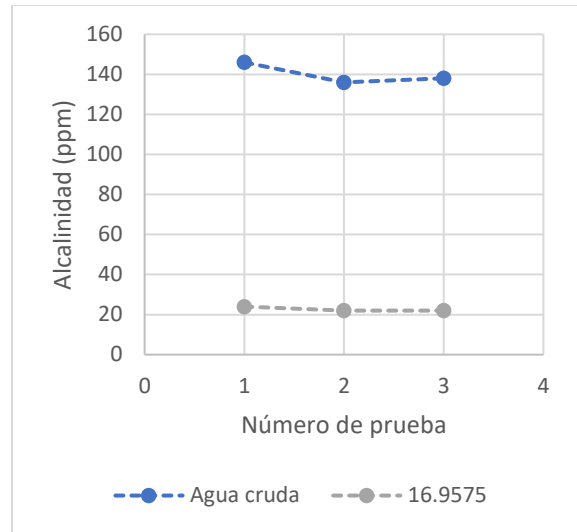


Figura 75. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 17 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

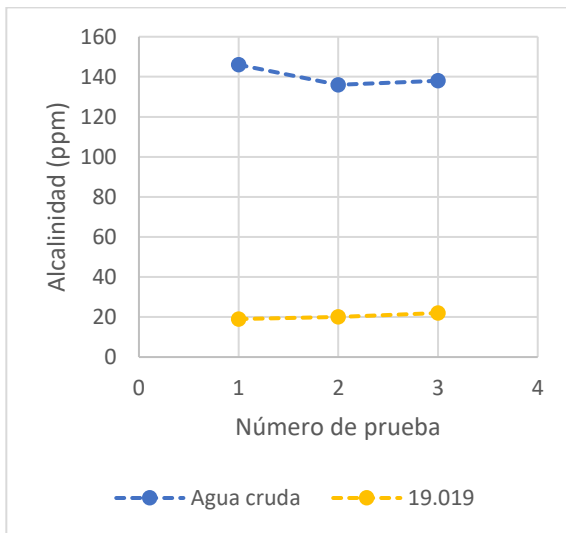


Figura 76. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 19 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

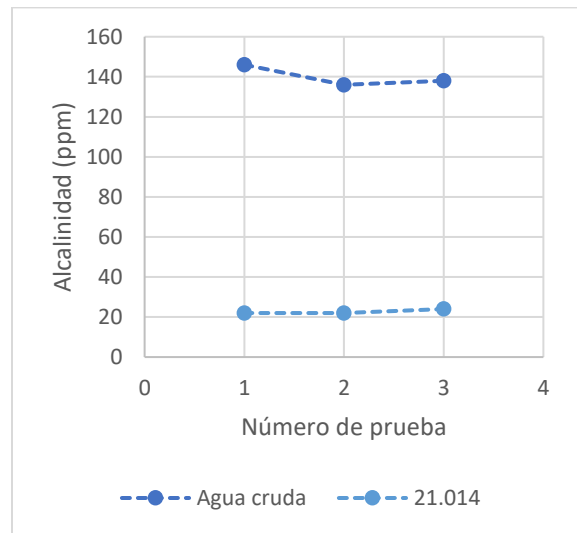


Figura 77. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 21 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

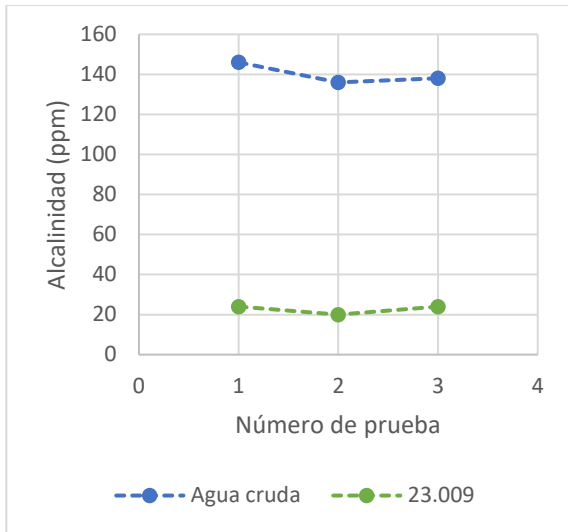


Figura 78. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 23 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

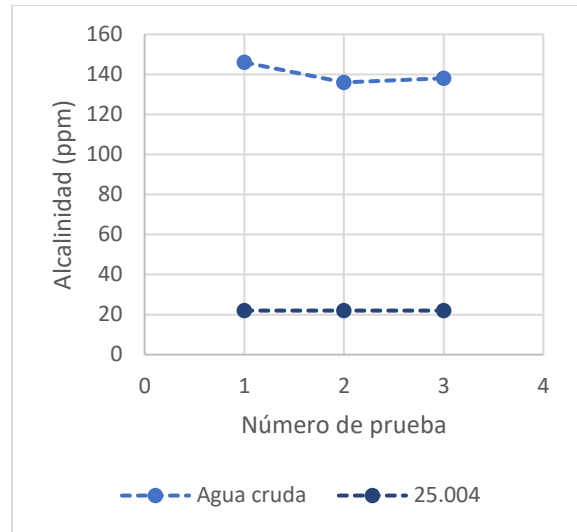


Figura 79. Comparación de alcalinidad entre agua cruda y agua tratada con 25 ppm de floculante y 398 ppm de coagulante

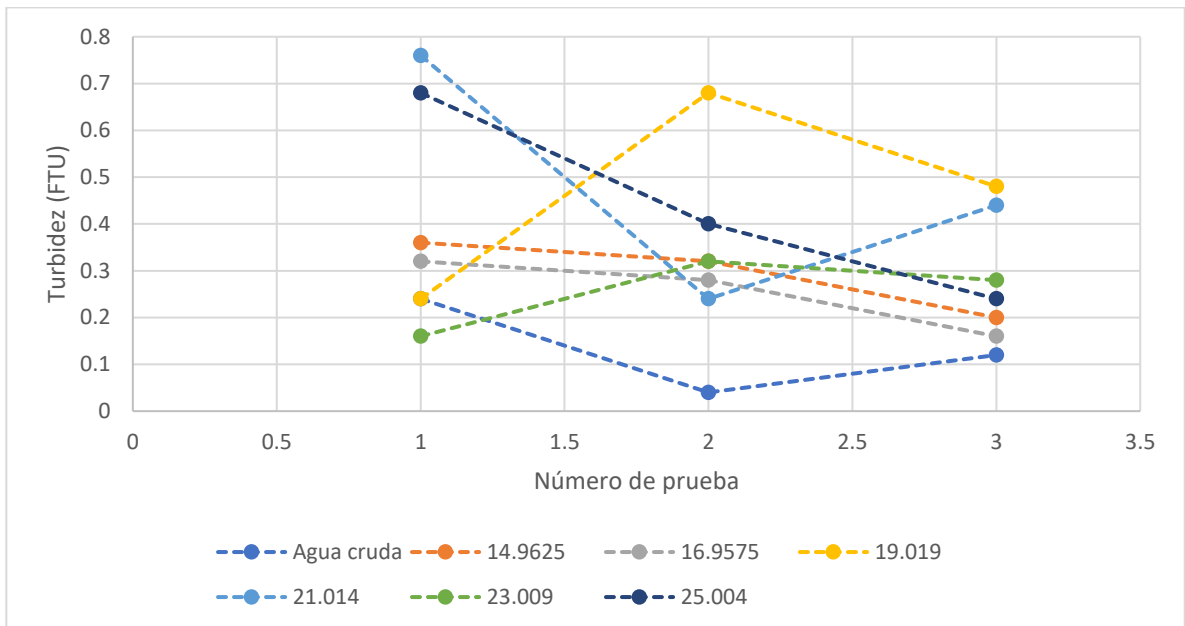


Figura 80. Comparación de la turbidez del agua cruda con la del agua tratada 398 ppm de coagulante.

H. Análisis de costos

Cuadro 26. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 338 ppm y 21 ppm.

| compuesto | Actualmente | 338 ppm de cal y 21 ppm de polímero | Diferencia en costos |
|-------------------|----------------|-------------------------------------|----------------------|
| Polímero | -Q185,538.42 | -Q205,068.78 | -Q19,530.36 |
| Cal | -Q409,141.14 | -Q365,845.78 | Q43,295.36 |
| Ácido Clorhídrico | -Q767,879.63 | -Q739,570.70 | Q28,308.93 |
| total | -Q1,362,559.18 | -Q1,310,485.26 | Q52,073.93 |

Cuadro 27. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 338 ppm y 23 ppm.

| compuesto | Actualmente | 338 ppm de cal y 23 ppm de polímero | Diferencia en costos |
|-------------------|----------------|-------------------------------------|----------------------|
| Polímero | -Q185,538.42 | -Q224,599.14 | -Q39,061 |
| Cal | -Q409,141.14 | -Q365,845.78 | Q43,295 |
| Ácido Clorhídrico | -Q767,879.63 | -Q622,796.38 | Q145,083.25 |
| total | -Q1,362,559.18 | -Q1,213,241.29 | Q149,317.89 |

Cuadro 28. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 358 ppm y 21 ppm.

| compuesto | Actualmente | 358 ppm de cal y 21 ppm de polímero | Diferencia en costos |
|-------------------|----------------|-------------------------------------|----------------------|
| Polímero | -Q185,538.42 | -Q205,068.78 | -Q19,530.36 |
| Cal | -Q409,141.14 | -Q387,493.46 | Q21,647.68 |
| Ácido Clorhídrico | -Q767,879.63 | -Q767,879.63 | Q0.00 |
| total | -Q1,362,559.18 | -Q1,360,441.86 | Q2,117.32 |

Cuadro 29. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 358 ppm y 23 ppm.

| compuesto | Actualmente | 358 ppm de cal y 23 ppm de polímero | Diferencia en costos |
|-------------------|----------------|-------------------------------------|----------------------|
| Polímero | -Q185,538.42 | -Q224,599.14 | -Q39,060.72 |
| Cal | -Q409,141.14 | -Q387,493.46 | Q21,647.68 |
| Ácido Clorhídrico | -Q767,879.63 | -Q686,491.47 | Q81,388.16 |
| total | -Q1,362,559.18 | -Q1,298,584.06 | Q63,975.12 |

Cuadro 30. Comparación de costos de las condiciones actuales, 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero y la prueba con 398 ppm y 23 ppm.

| compuesto | Actualmente | 398 ppm de cal y 19 ppm de polímero | Diferencia en costos |
|-------------------|----------------|-------------------------------------|----------------------|
| Polímero | -Q185,538.42 | -Q185,538.42 | Q0.00 |
| Cal | -Q409,141.14 | -Q430,788.82 | -Q21,647.68 |
| Ácido Clorhídrico | -Q767,879.63 | -Q1,004,966.89 | -Q237,087.26 |
| total | -Q1,362,559.18 | -Q1,621,294.12 | -Q258,734.94 |

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo principal del presente trabajo fue determinar la mejor proporción de concentraciones de coagulante y floculante en el tratamiento de agua de proceso para la elaboración de cerveza a modo que esta cumpla con los estándares de calidad, mediante pruebas de jarras y la variación de concentraciones de los reactivos. Para esto se midieron las propiedades de dureza del agua, alcalinidad total, pH y turbidez, teniendo en cuenta los límites recomendados de estos parámetros para la elaboración de cerveza, siendo estos de 50 a 80 ppm para la dureza, menos de 40 ppm para la alcalinidad residual, pH de entre 8.5 a 9 y turbidez menor a 0.2 NTU, según el libro “tecnología de cerveceros y malteros”.

Se emplearon los mismos reactivos que se utilizan en el proceso escalado y se determinaron las concentraciones de operación actuales. Estas se encuentran en el Cuadro 53 en la sección de anexos, el reactor más utilizado opera con 19.78 ppm de policloruro de aluminio y 378.07 ppm de hidróxido de calcio. Se partió de estas concentraciones para determinar las distintas utilizadas en las pruebas.

El coagulante, hidróxido de calcio hidratado, varió desde 338ppm hasta 398ppm con cambios de 20 ppm entre cada concentración. Así mismo se cambió la concentración del floculante, en este caso un polímero PAC (policloruro de aluminio), desde 15ppm hasta 25 ppm con una diferencia de 2ppm entre cada concentración. Se realizaron pruebas de Jarras como se explica en el procedimiento, haciendo triplicado de cada una de ellas para poder tener resultados comparables.

Para asemejar las pruebas al proceso industrial, al terminar la floculación, se realizó la estandarización del agua para alcanzar un pH entre 8.3 a 8.4 y una alcalinidad de hidróxidos y carbonatos (alcalinidad P) igual a 0. Por lo que las gráficas de alcalinidad P y pH mostradas en la sección de resultados, muestran únicamente la cantidad de ácido requerida en cada uno de los casos. Además, se simuló la operación unitaria de filtración utilizando un papel filtro, sin embargo este último no fue tan efectivo, ya que el utilizado no era capaz de retener los flóculos más pequeños como se nota en los resultados de turbidez. Sin embargo, el filtro utilizado en el proceso escalado es de grava, por lo que se sabe que este si puede retener los flóculos de menor tamaño.

Como se puede observar en la sección de resultados se graficaron los datos obtenidos de cada una de las pruebas realizadas, teniendo en las gráficas 1 – 12 la dureza y alcalinidad obtenidas para cada jarra. Luego en las gráficas 13-16 se muestra el pH obtenido antes de la estandarización y de la 17 – 20 la turbidez. Sabiendo que las especies que se desean flocular son carbonato de calcio y carbonato de magnesio, estas partículas deben tener una densidad de carga negativa, ya que el floculante que se utilizó es catiónico, por lo que se agrega hidróxido de calcio en exceso para tener un medio cargado negativamente. Por lo tanto, los resultados de las pruebas dependieron, no únicamente de las cantidades de reactivos agregada, sino también de las condiciones del agua cruda utilizada, las cuales se pueden observar en los cuadros 1-12 en la sección de resultados. También depende de la interacción de las fuerzas moleculares como la de van der Waals, la densidad de carga de cada partícula y los choques entre los carbonatos de calcio y el polímero. Debido a esto se generaron variaciones en los resultados y no fue posible asignarles un modelo matemático, sin embargo, se pueden observar tendencias en las gráficas donde se nota que se alcanzan valores mínimos de los parámetros medidos para cierta proporción de los reactivos.

En las gráficas 1-3 se muestran las pruebas realizadas con 338 ppm de hidróxido de calcio y las diferentes concentraciones de floculante por cada jarra, en las gráficas 4-6 se muestran los mismos resultados, pero con 358 ppm, de la 7-9 utilizando 378 ppm y de la 10-12 usando 398 ppm de polímero. Como se mencionó, se analizarán únicamente las tendencias, para cada una de las pruebas, por lo que se puede observar en las gráficas una línea recta que es la que indica la jarra en la que se obtuvo una coincidencia de valores mínimos de los parámetros medidos en la prueba.

Para la primera prueba con 338 ppm de cal podemos notar que los parámetros tuvieron sus valores mínimos en la jarra con 23 ppm de policloruro de aluminio. Al haber realizado un triplicado se determinó que la media de la alcalinidad residual para la jara con 23 ppm de polímero fue de 24.7 ppm con una desviación estándar de 1.15ppm, la dureza de la misma jarra tuvo una mediana de 59 ppm y una desviación estándar de 1.15ppm, mientras que la alcalinidad P media, es decir la alcalinidad por carbonatos disueltos, para esa jarra fue de 59 ppm con una desviación estándar de 7ppm. Con las desviaciones estándar se determinó que los resultados obtenidos fueron precisos. Estos datos se pueden observar en el Cuadro 14 de la sección de resultados.

Además, se analizó que para esta prueba la remoción de dureza estuvo entre 43 a 54 ppm, mientras que para la alcalinidad se logró remover entre 32 a 49 ppm. Como se mencionaba la mayor remoción de dureza se dio en la Jarra con 23 ppm, al igual que para la alcalinidad, por lo que se determinó que con esta concentración de cal utilizada el polímero actúa de mejor manera al agregar 23 ppm. Al analizar las jarras con menor concentración de floculante para esta prueba se observa que los resultados quedan dentro del rango recomendado para la elaboración de cerveza. La remoción que tiene la jarra con 21 ppm de floculante se asemeja a la anteriormente mencionada, por lo que económicamente se podría justificar su uso, lo que se mencionará más adelante. El resto proveen una remoción más baja que podría no ser suficiente si las condiciones del agua cruda cambiaran.

En la Gráfica 13 se puede observar el comportamiento del pH, antes de realizar la estandarización con ácido clorhídrico, está en un rango de 11 a 10.45 en la escala de pH, lo que indica que se encuentra en el área básica. Nuevamente se nota la tendencia que en la jarra con 23 ppm se obtienen valores mínimos de pH, lo que concuerda con las propiedades previamente analizadas. Así mismo, en la Gráfica 17 se muestra el comportamiento de la turbidez, que va desde 0.24 hasta 0.72, como se mencionó la turbidez fue removida con papel filtro, por lo que al tener partículas muy pequeñas no fue posible removerlas. Sin embargo, también se puede ver la tendencia que en la jarra 23 fue donde menor turbidez se obtuvo con 0.33 con una desviación estándar de 0.05, por lo que se puede decir que los flóculos formados en esa jarra eran más grandes y consistentes, que en el resto de las jarras donde la turbidez fue mayor.

Para la prueba donde se trabajó con 358 ppm de hidróxido de calcio, se obtuvo que la coincidencia de los resultados mínimos de las propiedades analizadas, también se encontraron en la jarra con 23 ppm de floculante. Como se puede observar en el Cuadro 16 la alcalinidad residual media obtenida en esta jarra fue de 23 ppm con una desviación estándar de 1.15ppm, una dureza media de 61 ppm con una desviación estándar de 6.43 ppm y una alcalinidad P media de 65 ppm con una desviación estándar de 9.87ppm. Como se puede notar las desviaciones estándar subieron siendo mayores a las del agua cruda utilizada que se presenta en el Cuadro 15, por lo que se dice que la precisión de los datos bajo, lo que se puede deber a la variación en la densidad de cargas de los compuestos debido a una la mayor presencia de hidróxido de calcio, lo que afecta la carga de la solución, por lo que altera lo iones que rodean las partículas modificando la doble capa de estas.

La remoción lograda en esta prueba para la dureza fue de 37 hasta 49 ppm, lo que fue menor a la prueba anterior. Para la alcalinidad total removida el rango estuvo entre 40 a 55 ppm, siendo mayor a la prueba anterior. Nuevamente la mayor remoción se dio en la jarra con 23 ppm para ambas propiedades. Al analizar el resto de las jarras se puede observar que la remoción disminuyó, aunque los parámetros obtenidos aún quedan dentro de los parámetros aceptados para la elaboración de cerveza, por lo que se puede evaluar económica si es conveniente utilizar una concentración menor, aunque se debe tener en cuenta que, al cambiar las condiciones del agua cruda, puede que las concentraciones menores ya no remuevan lo suficiente para producir agua aceptable para la producción de cerveza.

En la Gráfica 14 se presenta el comportamiento obtenido del pH antes de la estandarización, donde se puede observar que la tendencia del menor valor se encuentra al tener 23 ppm para dos de las pruebas, mientras que en la otra el mínimo se encuentra en la jarra con 21 ppm. Esto se puede deber a las propiedades del agua cruda utilizada. Por otro lado, en la Gráfica 18 se observan los resultados obtenidos de la turbidez, los cuales va desde 0.16 hasta 1.08 FTU, en este caso podemos observar 2 puntos de mejor remoción de turbidez. El primero se dio en la jarra con 19 ppm y se debe a una rápida aglutinación de los coloides, mientras que el segundo, en la jarra con 23 ppm, es la saturación de los coloides donde se da un efecto de barrido y se eliminan la turbidez. En el segundo punto mínimo el valor fue de 0.32 ± 0.03 . Se puede notar que en este punto el resultado fue similar a la prueba anterior, sin embargo, en general se tuvo una menor remoción

en esta prueba. Esto se debe a que hubo jarras donde los coloides se re estabilizaron, por lo que la aglomeración fue menor. Las partículas formadas eran de menor tamaño y no se podían filtrar con el papel utilizado. Este es otro parámetro para considerar si se desea utilizar menores concentraciones.

Para la prueba utilizando 378 ppm de cal se obtuvo una coincidencia de valores mínimos en la jarra con 19 ppm de floculante, lo que concuerda con las condiciones de operación actuales del reactor más utilizado. En el Cuadro 18 se puede observar la media de las propiedades obtenidas y sus desviaciones estándar para esta jarra. De alcalinidad se tuvo 29 ppm con una desviación de 1.15 ppm, para la dureza fue de 71 ppm y una desviación de 1.15 ppm, mientras que para la alcalinidad P la media fue de 72 ppm y la desviación de 6.66 ppm. Las desviaciones estándar de esta prueba fueron bajas por lo que se puede decir que los datos obtenidos fueron precisos. Los resultados obtenidos de las jarras con menor concentración de 19 ppm de floculante proporcionaron valores de dureza que salen del rango aceptable para la elaboración de cerveza, por lo que no es recomendable utilizarlas en estas condiciones. Por otro lado, al agregar más floculante se alcanzan resultados similares, incluso al agregar 25 ppm de floculante se podrían obtener resultados mejores, sin embargo, económicamente no sería recomendable agregar 6 ppm más, para obtener un resultado ligeramente menor. Por lo tanto, es preferible utilizar 19 ppm con esta concentración de cal.

La remoción que se puede observar en esta prueba ha sido la mayor de las 3 ya analizadas, el rango de dureza retirar fue de 38 a 61 ppm. Para la alcalinidad total la remoción estuvo dentro de 41 a 61 ppm. En este caso la jarra con mayor remoción fue la que contenía 25 ppm de polímero, sin embargo, al analizar las jarras anteriores, las que contenían 23, 21 y 19 ppm aun proveyeron resultados dentro del rango aceptado y fueron ligeramente mayores a los valores menores obtenidos. Por lo tanto, económicamente es mejor utilizar 19 ppm de polímero con esta concentración de hidróxido de calcio, ya que el resultado será aceptable. Sin embargo, al tener otro tipo de agua, con otras condiciones de dureza y alcalinidad es posible que la cantidad de polímero deba aumentar.

En la Gráfica 15 se muestra el comportamiento del pH para esta prueba, donde se nota que a partir de la jarra con 19 ppm las 3 pruebas tendieron un valor similar. En las jarras siguientes se

pueden ver comportamientos distintos para las 3 pruebas, en 2 de ellas se alcanza otro valor mínimo en la jarra con 25 ppm, mientras que en la otra prueba el mínimo fue alcanzado en la jarra con 21 ppm. Los valores obtenidos no varían significativamente por lo que se puede justificar el uso de 19 ppm, para así disminuir costos de reactivo. Por otro lado, en la Gráfica 19 se puede observar el comportamiento de la turbidez para esta prueba, donde nuevamente las tres pruebas tienden al mismo valor, luego se nota cómo se tienen variaciones y no se puede generalizar en un mínimo común. Los valores de turbidez van de 2.44 a 0.24 FTU, mientras que la turbidez en la jarra con 19 ppm estuvo en 0.533 con una desviación de 0.14 FTU.

Al analizar la última prueba utilizando 398 ppm de hidróxido de calcio se puede notar como los resultados más bajos para las propiedades medidas se alcanzaron en la jarra con 19 ppm, sin embargo, ninguno de los resultados de dureza entra en el rango aceptado para la elaboración de cerveza. Se observa en el Cuadro 20 que la dureza media mínima obtenida fue de 83 ppm con una desviación de 10 ppm, mientras que para la alcalinidad residual la media fue de 20 ppm con una desviación de 2 ppm y para la alcalinidad P la media mínima fue de 95 ppm con una desviación de 10 ppm. Claramente la alcalinidad obtenida fue la menor, esto se debe a que al agregar un exceso de cal la reacción entre esta y los carbonatos se favoreció, creando una gran cantidad de carbonato de calcio. El polímero agregado ya no fue suficiente para poder saturar todas las partículas y flocularlas aumentando así la dureza y sacando los valores del rango aceptado. Por lo tanto, no se recomienda utilizar estas proporciones con este tipo de agua, puede que con un agua con una dureza inicial menor o una alcalinidad menor si sea lo adecuado. Si se da el caso se recomienda prestarle atención a la jarra con 19 ppm, que es donde se determinó que el floculante actuó de la mejor manera.

Al momento de analizar la remoción de compuestos es claro que esta fue la prueba con los rangos de remoción más bajos en todas las realizadas, lo que se debe a lo comentado en el párrafo anterior. La remoción de dureza fue de entre 17 a 30 ppm, mientras que para la alcalinidad total únicamente se logró remover de 7 a 25 ppm. Nuevamente la mayor remoción se dio en la jarra con 19 ppm, siendo esta la única que se asemejó más a los estándares requeridos para la cerveza, sin embargo, la dureza aún queda fuera de ellos.

Por otro lado, al analizar la Gráfica 16 se observa la tendencia de obtener un valor mínimo de pH igualmente en la jarra con 19 ppm, lo que cumple con el comportamiento anteriormente mencionado. Sin embargo, los valores de pH para esta prueba fueron mayores que para las 3 anteriores. Así mismo, en la Gráfica 20 se puede ver el comportamiento de la turbidez para esta prueba, que es similar a la de prueba 2 donde se utilizaron 358 ppm de cal, ya que cuenta con 2 mínimos, uno en la jarra con 19 ppm y otro en la de 23 ppm de polímero. El rango de turbidez para esta prueba fue de entre 0.16 FTU a 0.76 FTU siendo el menor en la jarra con 23 ppm, como se puede notar el Cuadro 20, con un valor de 0.253 FTU con una desviación de 0.08 FTU, siendo esta la menor turbidez obtenida en todas las pruebas.

Se ha mencionado a lo largo de la discusión los valores medios de la alcalinidad P en las pruebas y como comenté al inicio esta debe ser 0 al momento de entrar al proceso. Esta es la alcalinidad que se debe a los hidróxidos y carbonatos disueltos en el agua, aumentando así el pH, por lo que en el proceso industrial se le agrega cierta cantidad de ácido clorhídrico para alcanzar el pH de 8.3 requerido y así neutralizar todos los carbonatos disueltos. Como se sabe del equilibrio carbónico se determina que en el pH de 8.3 a 8.5 todos los carbonatos ya han pasado a ser una sal disuelta en el agua, la cual ya no afecta el pH de esta. Por lo tanto, estas graficas van relacionadas con las del pH e indican que tanto ácido fue requerido para lograr estandarizar la solución. La prueba con la menor concentración de alcalinidad P, fue en la que se utilizaron 338 ppm de cal y 23 ppm de floculante con un valor de 59 ppm, lo que se traduce a $5.87 \cdot 10^{-5}$ kg/ L de ácido clorhídrico puro, estos resultados se pueden observar en el Cuadro 81 en la sección de anexos, donde se muestra también los costos por el ácido clorhídrico. Por lo tanto, es importante también tener en cuenta que se debe escoger una combinación de reactivos que no aumente mucho la alcalinidad P, para no aumentar los costos de ácido.

Las gráficas 21 a 80 muestran una comparación de los resultados obtenidos en los triplicados de cada una de las pruebas con las condiciones iniciales del agua cruda, es decir se muestra como variaron los resultados de los diferentes parámetros medidos con respecto a las concentraciones iniciales de las especies en el agua cruda utilizada. Como se puede observar en los cuadros 13, 15, 17 y 19, se nota que las agua utilizadas en las pruebas contaron con desviaciones estándar de entre 2.6 a 2.8 ppm para la dureza, 1.7 ppm a 3.2 ppm para la alcalinidad M, 0.2 a 0.02 para el pH

y 0.03 FTU a 0.06 FTU para la turbidez. Por lo que se puede decir que las aguas utilizadas fueron similares, mas no iguales por lo que se realizó un análisis para ver esta influencia en los resultados.

En las gráficas 22 a la 27 se muestra la dureza del agua cruda utilizada para la prueba con 338 ppm al igual que los resultados para la dureza después de las pruebas. Se nota una tendencia al tener una mayor dureza inicial se provee una mayor remoción. En las gráficas 29 a 34 se puede observar el comportamiento de la alcalinidad del agua cruda y tratada que fue similar a la de dureza. Por último, en la Gráfica 35 se nota el comportamiento de la turbidez tanto para el agua cruda como para el agua tratada, que tuvo el mismo comportamiento ya mencionado. Este comportamiento de las tres propiedades muestra que donde se tuvo el mayor valor, se obtuvo una mayor remoción, por lo que se dice que las cantidades agregadas de cal y floculante actuaron de manera efectiva en los compuestos. Sin embargo, en este caso el efecto de las propiedades del agua cruda no generó mayor variación en los resultados obtenidos, lo que se nota también en las desviaciones estándar de los resultados que fueron bajas.

En las gráficas 37 a la 42 se presentan los resultados de la dureza y las condiciones de la dureza para el agua cruda en las pruebas donde se utilizaron 358 ppm de cal. El comportamiento encontrado fue el mismo que el mencionado para la prueba anterior. Para las gráficas 44 a la 49 se muestra el comportamiento de la alcalinidad residual de las pruebas y la alcalinidad total del agua cruda, la tendencia obtenida fue que a mayor alcalinidad inicial mayor remoción, siendo así iguales a la prueba anterior. En la Gráfica 50 se puede observar el comportamiento de la turbidez de las pruebas y la del agua cruda, donde se nota que los resultados tuvieron una mayor turbidez que el agua inicial, lo que se debe al tipo de filtro utilizado. Como se observa en este caso también se mantuvo bastante lineal el comportamiento de los resultados por lo que se obtuvieron desviaciones estándar bajas, concluyendo así que las características del agua no crearon una variación significativa de los datos obtenidos. Cabe mencionar que en las gráficas de dureza se puede observar cómo se reduce la capacidad de remoción, lo que se puede deber a la mayor cantidad de hidróxido de calcio agregado, lo que promueve la generación de carbonato de calcio el cual ya no puede ser removido por completo al utilizar las mismas cantidades de floculante.

Los resultados de dureza y la dureza del agua cruda para la prueba con 378 ppm de cal se muestran en las gráficas 52 a 57, donde se nota que se obtuvo el mismo comportamiento

mencionado. En las gráficas 59 a 64 se muestra la alcalinidad de los resultados y la del agua cruda, se ve que el comportamiento es igualmente el mencionado con anterioridad. En la Gráfica 65 se presenta el comportamiento de la turbidez tuvo una menor variación tanto para el agua cruda que para el tratada.

La dureza de las pruebas y del agua cruda en las últimas pruebas donde se utilizaron 398 ppm de hidróxido de calcio se presentan en las gráficas 67 a 72, donde se puede observar que igualmente cumple con la tendencia observada en las pruebas anteriores. La alcalinidad del agua tratada y del agua cruda se muestra en las gráficas 74 a 79 donde se puede observar que la tendencia del agua se comporta como las pruebas anteriores. La turbidez se presenta en la Gráfica 80 donde los resultados para el agua cruda tienen una mayor variación con respecto a las pruebas anteriores, reflejando esto en los resultados del agua tratada. Esta prueba sigue la misma tendencia que la anterior, pero es más evidente ya que la cantidad de cal agregada fue incluso mayor, por lo que el polímero agregado ya no fue suficiente para remover el exceso de carbonato de calcio producido.

La tendencia a tener una mayor remoción de dureza al tener una mayor dureza inicial se debe a que el polímero entra en contacto con el medio al mismo tiempo que el hidróxido de calcio, por lo que este comienza a actuar con la dureza presente en el agua mientras la reacción comienza a suceder. Al tener una mayor presencia de carbonato de calcio inicial se aprovecha de una mejor manera los espacios positivos en el polímero, sin embargo, al tener una menor presencia de la especie algunos sitios activos quedarán desaprovechados y al avanzar la reacción con el hidróxido de calcio el carbonato de calcio producido ya no podrá aprovechar los sitios positivos del polímero, quedado así en la solución y aumentando la dureza final.

El efecto de una mayor remoción al tener una mayor alcalinidad inicial se debe al principio de Le'Chatelier, ya que esta depende únicamente de la reacción entre el hidróxido de calcio agregado y el bicarbonato de calcio presente en la muestra. Al dejar constante el hidróxido de calcio la única variación en la reacción era el carbonato de calcio inicial, por lo que al aumentar su concentración se favorece el consumo de los reactivos y la producción de productos.

Analizando la parte económicos se sabe que el precio del hidróxido de calcio hidratado es de 1.02 Q/ kg de reactivo, el del polímero utilizado es de 9.20 Q/kg de reactivo y el del ácido clorhídrico al 25% m/m es de 3.43 Q/kg de reactivo. En el Cuadro 79 se muestran los costos que se generan para las diferentes concentraciones de polímero utilizando los caudales comunes en la industria y asumiendo que la planta opera 24 horas al día por 365 días al año. En el Cuadro 80 se presentan los costos generados por las diferentes concentraciones de cal hidratada. En los cuadros 81-84, se indican los costos generados por el ácido clorhídrico para las diferentes alcalinidades carbónicas obtenidas en las pruebas realizadas. Para el análisis de costos se tomaron en cuenta únicamente estos, ya que se asume que el resto como: mantenimiento, equipo y operación es independiente de esta variación.

En los cuadros cuadro 26-30 se presenta la comparación entre las pruebas realizadas y las condiciones actuales de operación. Al usar 338 ppm de cal y 21 ppm de polímero se observa un ahorro de Q52,074, para la prueba con 338 ppm de cal y 23 ppm de policloruro de aluminio se sabe que el ahorro es de Q 149,318. Si se usan 358 ppm de cal y 21 ppm de polímero se ahorran únicamente Q2,117, mientras que, si se utilizan 358 ppm de cal y 23 ppm de polímero se logra ahorrar Q63, 975. Para la prueba con 378 ppm de cal y 19 ppm de polímero se tiene un costo total de Q1, 362, 559. Por último, para la última prueba con 398 ppm de cal y 19 ppm de polímero no se presenta un ahorro sino un aumento en el costo de Q258, 735. Se realizó este análisis únicamente para las combinaciones de cal y polímero que mostraron proveer las mejores condiciones en su prueba.

Con el análisis realizado se demostró que para un agua cruda con una dureza media inicial de 117 ppm con una desviación de 9.3 ppm, alcalinidad total media de 114 ppm con una desviación de 10.8 ppm y un pH inicial medio de 7.61 pH con una desviación de 0.16, las mejores proporciones de cal y floculante son 338 ppm de hidróxido de calcio hidratado y 23 ppm de policloruro de aluminio. Esto ya que estas condiciones proporcionaron resultados dentro de aceptado para la elaboración de cerveza y además generan el mayor ahorro entre todas las propuesta.

VIII. MANUAL

A. Inventario del equipo “agitador para floculación Jar test”

1. Gabinete de lámina de acero de carbono con sistema de agitación, pantalla para regular velocidades y tiempos de agitación, sistema de iluminación e interruptor para accionamiento del equipo.
2. 1 cable con adaptador, que conecta al equipo con la corriente.
3. 6 paletas de acero inoxidable graduadas con motor DC y con capacidad de movimiento axial manual.
4. 6 jarras graduadas de acrílico con sistema de toma muestra y boquilla de acero inoxidable de 2L de capacidad.
5. 1 placa de metal inferior para sostener los contenedores de muestreo, con 12 espacios disponibles.
6. 1 soporte de metal para sostener la placa metálica no está ensamblado al gabinete y permite que esta placa se deslice horizontalmente.
7. 1 barra metálica giratoria con pinzas para sostener las boquillas metálicas del sistema de muestreo de las jarras y un tornillo para graduar su movimiento.
8. 1 placa metálica giratoria frontal para dosificación, con 12 espacios para colocar tubos de cristal.
9. 1 placa metálica posterior para dosificación, con 6 espacios para colocar tubos de cristal. (últimos dos espacios de la derecha más grandes que los anteriores.)
10. 16 tubos cilíndricos de cristal de la misma capacidad, para la dosificación, de 59 ml de capacidad.
11. 6 tubos de cristal cilíndricos de una capacidad mayor, para la dosificación en la parte posterior del equipo
12. 36 empaques negros para sostener los tubos de dosificación
13. 12 contenedores cúbicos pequeños para el muestreo de 57 ml de capacidad.

B. Procedimiento para la operación del equipo

- a. Mover el eje de las paletas agitadoras hacia arriba y retirar el toma muestras de la prensa donde se encuentra sostenida, para poder retirar la jara vacía, realizar lo mismo con cada jarra.



- b. Llenar las 6 jarras con la muestra que se desea analizar, todas con el **mismo volumen** de muestra, es decir 2 Litros de agua del chorro, medidos con probeta.



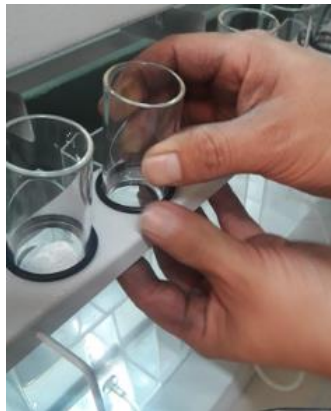
- c. Volver a colocar las jarras llenas en su sitio, con cuidado sin botar la muestra, bajar nuevamente las paletas agitadoras y colocar nuevamente el toma muestra en su lugar.



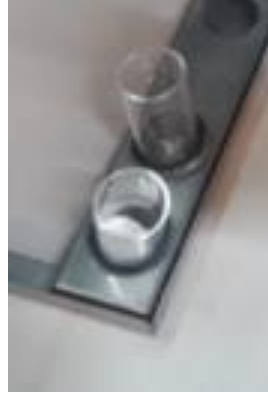
- d. Asegurar la placa rotatoria para dosificación con tape, para evitar que esta se voltee antes de tiempo. Además, asegurar la barra inferior con los toma muestras en los tornillos de los extremos para evitar que esta gire y bote la muestra de agua.



- e. Retirar los 12 tubos de dosificación removiendo el hule negro que se encuentra por debajo de la placa de metal que los sostiene.



- f. Colocar los tubos en la base metálica que se encuentra debajo



- g. Para cada una de las jarras se encuentran 2 tubos de cristal, se debe llenar uno con la cantidad de cal deseada y otro con el polímero, tener en cuenta la concentración en ppm de cada uno de ellos que se está agregando. Lo mejor es numerar la jarra y conocer la concentración para cada número.

Al agregar el polímero diluir primero con un poco del agua de la jarra extraída con el toma muestra el contenido del embace, para asegurarse que todo el polímero haya pasado al tubo. Al agregar la cal asegurarse que toda la muestra pase al tubo incluso la que se queda en el fondo y en las paredes del recipiente donde se encuentre.



- h. Volver a colocar los tubos y verificar que estén colocados de manera tal que, al inclinarlos, su contenido si logre caer dentro de la jarra. (**Tener cuidado de no voltear la placa antes de iniciar la prueba**)



- i. Conectar el equipo con el cable a la corriente y conectar este en el panel eléctrico más cercano.



- j. Accionar el equipo con el botón negro, que se encuentra justo arriba de la conexión.

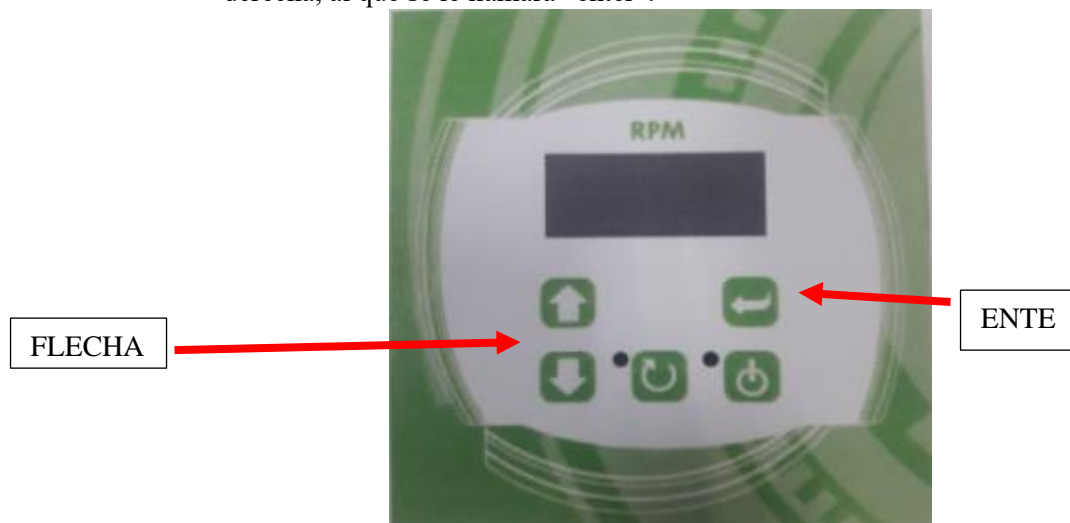


- k. Para programar los programas de agitación: (el programa 1 es estándar, los programas 2,3 y 4 pueden ser programados)

- 1) Presionar el botón inferior del medio, para que despliegan los programas.



- 2) Con las flecha de la izquierda se puede cambiar de programa, moviéndose hacia arriba con la flecha superior o hacia abajo con la flecha inferior, de este modo se escoge alguno y se selecciona con el botón de la esquina superior derecha, al que se le llamará “enter”.



- 3) La pantalla desplegara arriba: "Programa X" y debajo: Iniciar; se debe mover una de las flechas de la izquierda para que debajo se despliegue la palabra: "Editar" y se debe presionar enter para editar.



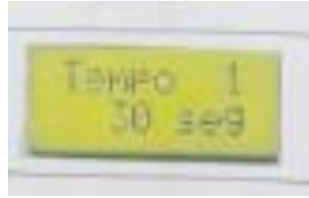
- 4) Aparecerá la opción de editar la cantidad de segmentos de agitación (N. Seg. x), mover el número con las flechas de la izquierda y programarlo en **2**, luego presionar enter, para grabar el número de segmentos.



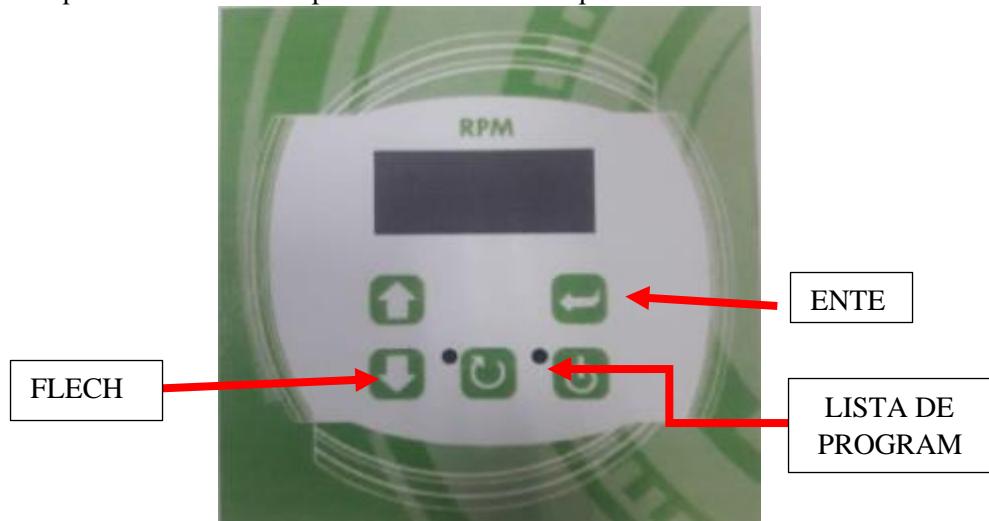
- 5) Luego se programan las revoluciones por minuto, para el primer segmento, colocar 120 rpm presionando las flechas de la izquierda y presionar enter para guardar los cambios. (Fotografía únicamente como ejemplo no tomar en cuenta ese dato)



- 6) Después se debe configurar el tiempo, presionando las flechas de la izquierda, para el primer segmento colocar 1 minuto y presionar enter para guardar los cambios. (Fotografía únicamente como ejemplo no tomar en cuenta ese dato)



- 7) Luego se desplegará la opción de configurar el segundo segmento, para este se deben colocar 35 rpm realizando lo mismo que en el paso 11.5.
 - 8) Después se debe configurar el tiempo del segundo segmento justo como en el paso 11.6., pero para este segmento colocar 15 minutos. Luego de presionar enter se desplegará la pantalla principal.
1. Para inicial el programa editado se debe presionar el botón inferior del medio para desplegar las listas de programas, mover las flechas de la izquierda hasta llegar al programa editado, presionar enter para seleccionarlo, luego mover las flechas de la izquierda hasta tener la palabra "Iniciar" en la pantalla.



- m. **Antes de presionar enter** y dar inicio al programa, asegurarse de que todo esté colocado como debe.

- n. **Al mismo tiempo** que se presiona enter, dejar caer la dosificación de cal y polímero.



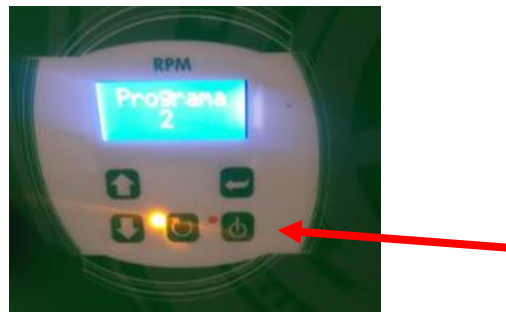
- o. Colocar los 12 contenedores toma muestra en la placa de metal.



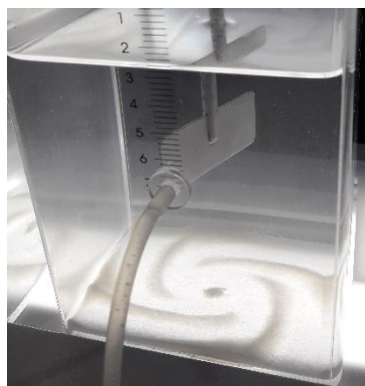
- p. Esperar a que pasen los segmentos de agitación.



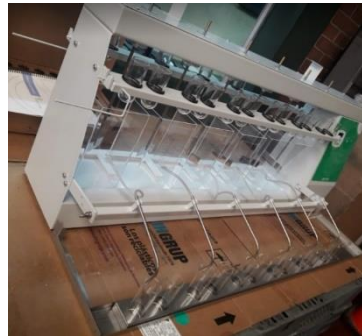
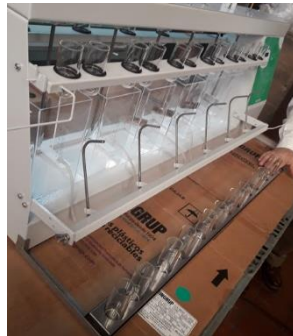
- q. En caso de querer la prueba por alguna emergencia o por algún error se debe presionar el botón de la esquina inferior de la derecha.



- r. Esperar 15 minutos al finalizar la prueba para que se asiente la muestra, en el fondo se deben observar los sólidos suspendidos como en la siguiente imagen.



- s. Inclinar la barra inferior de los toma muestra asegurando que queden dentro de los contenedores y tomar la muestra requerida.



- t. Al terminar la prueba y entregar las muestras para su análisis se deben lavar las jarras y los tubos de ensayo para guardar cada parte en sus respectivas cajas.

IX. CONCLUSIONES

1. La mejor relación de concentraciones a utilizar para el agua cruda analizada son 338 ppm de hidróxido de calcio hidratado y 23 ppm de policloruro de aluminio, ya que no solo proveen los mejores resultados de las propiedades analizadas, sino que también genera el mayor ahorro al compararlo con los costos del proceso actual, siendo este de Q 149,318 anual.
2. La concentración media de bicarbonato presente en el agua cruda fue de 114 ppm con una desviación estándar de 11 ppm. No se encontró presencia de carbonatos disueltos en el agua cruda utilizada, la dureza tuvo un valor medio de 117 ppm con una desviación estándar de 9 ppm. Por otro lado, el pH medio del agua cruda fue de 7.61 con una desviación de 0.16, mientras que la turbidez media fue de 0.142 FTU con una desviación de 0.112 FTU. La influencia de las condiciones iniciales del agua muestra como a mayor concentración inicial de dureza y alcalinidad mayor será la remoción, aunque el efecto es ligero como.
3. Se logró medir los parámetros propuestos después del tratamiento de agua, siendo los mejores resultados obtenidos de 59 ppm de dureza con 1 ppm de desviación estándar, 25 ppm de alcalinidad m con una desviación estándar de 1, 59 ppm de alcalinidad p con 7 ppm de desviación estándar, un pH previo a la estandarización de 10.6 y una turbidez media de 0.333 FTU con una desviación estándar de 0.050 FTU. Las pruebas lograron proveer resultados dentro de los parámetros aceptados para la elaboración de cerveza para la primer y segunda prueba, a partir de la tercera se observa como algunos de los resultados llegan a salir del rango aceptado.
4. Al analizar distintos escenarios se determinó que la relación de concentraciones que provee los menores costos fue de 338 ppm de cal y 23 ppm de policloruro de aluminio, con un costo final anual de Q 1, 213, 241.29, tomando en cuenta el costo del ácido clorhídrico requerido para la estandarización del pH, al compararlo con los costos anuales actuales de Q 1, 362, 559. 18 se sabe que se podrá tener un ahorro de casi Q 150, 000 anuales.

5. Se realizó un manual con el inventario del quipo, ilustrado y señalado, que cuenta con 20 instrucciones de debidamente ilustradas y señalizadas para facilitar su comprensión.

X. RECOMENDACIONES

1. Realizar más pruebas de jarras como lo indica el manual presentado y la metodología, si el agua cruda a utilizar se encontrara fuera de los rangos establecidos, para determinar la nueva mejor relación de concentraciones para el proceso.
2. Realizar pruebas con una menor concentración de cal, por ejemplo 328 ppm para determinar si aún se pueden obtener buenos resultados con menor cantidad de reactivos y realizar un análisis de costos para lo mismo.
3. Realizar pruebas con otro tipo de floculante, como lo puede ser el PAX-18, siendo este una variante para el policloruro de aluminio. Otra opción pueden ser los sulfatos de aluminio los cuales también son utilizados en la industria de alimentos para la purificación de agua. Por otro lado, también se recomienda hacer pruebas con floculante de origen natural como lo es el *Echinopsis pachanoi* para determinar si puede ser una opción para la industria alimenticia, ya que sus residuos son menos dañinos para el ambiente.
4. En lugar de utilizar cal, proponer el uso de algún coadyuvante para la coagulación que provea con flóculos de mayor tamaño y estabilidad.
5. Determinar la influencia de la agitación en la reacción, determinar si es necesario variar la agitación en el proceso escalado y su influencia en el análisis económico
6. Realizar un análisis de la influencia de los tiempos de mezclado para determinar su influencia en el mecanismo de coagulación y floculación y así verificar la influencia que tiene esto sobre el proceso escalado.
7. Replicar la prueba a escala laboratorio con un filtro de menor porosidad, como los filtros de jeringa.
8. Determinar la influencia de la temperatura en la reacción, para definir si se requiere mantener esta constante.
9. Hacer un análisis de dispersión fotométrica y un escaneo microscópico de electrones para tener un mejor acercamiento a la formación de flóculos y poder proponer un modelo matemático para ello, y comenzar una línea de investigación para determinar la cinética de la reacción

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Adachi, Y.; Koayashi, A. y M; (2011). *Structure of colloidal flocs in relation to the dynamic properties of unstable suspension*. Ibaraki, Japon. International Journal of Polymer Science.2012 (574878)14.
2. Agbovi, H.; Wilson, L., (2017). *Flocculation optimization of orthophosphate with FeCl₃ and alginate using the Box-Behnken response surface methodology*. Canada, Industrial & Engineering Chemistry Research. 12, 3145-3155.
3. Ahmad, A.; Ismail, S.; Bathia, S., (2005). *Optimization of Coagulation-Flocculation Process for Palm Oil Mill Effluent Using Response Surface Methodology*. Malasia, Environmental Science and Technology, Industrial & Engineering Chemistry Research, 39, 2828-2834.
4. Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. Lima, Sedapal.
5. Baird, C. (2014). *Química Ambiental. 5ta. edición*. Western Ontario. Págs. 409-455.
6. Broughton, G.; (2000). *Colloidal and Surface phenomena*, Engineering, Design and Process development. Nueva York, Industrial and engineering chemistry, 46, 5, 898-915.
7. Chengzhihu, H.; Huijuan, L.; Jiuhui, Q.; Dongsheng, W.; Jia, R., (2006). *Coagulation Behavior of Aluminum Salts in Eutrophic Water: Significance of All3 Species and pH Control*. Environmental Science and Technology. Beijing, Industrial & Engineering Chemistry Research, 40,325-331.
8. Cárdenas, Y. (2000). *Tratamiento de Agua Coagulación y floculación*. Sedapal, Lima.
9. Calderón, A.; González, I. (2017). *Some Hardware and Instrumentation Aspects of the Development of an Automation System for Jar Tests in Drinking Water Treatment*. Badajoz, Journal Sensors, 17, 2305.
10. Cronwell, D.; Bishop, M. (1983). *Determining velocity gradients in laboratory and full-scale systems*. Michigan, Journal AWWA, 75, 9, 470-475.
11. Dirección de Medio Ambiente, (1999). *Manejo ambiental adecuado de lodos provenientes de las plantas de tratamiento*. Quito.
12. Gaudreault, R.; Di Cesare, N.; van de Ven, T; Weitz, A. (2009). *The structure and strength of flocs of precipitated calcium carbonate induced by various polymers used in papermaking*. Cambridge, Anson edition, 1193-1219
13. Gaudreault, R.; DiCesare, N.; Weitz, D.; van de Ven, T.; (2009). *Flocculation kinetics of precipitated calcium carbonate*. Cambridge, Elsevier, 340,56-65.
14. Harrison, R.; Todd, P.; Rudge, S.; Petrides D. (2003). *Bioseparations Science and Engineering*. 3 era. edición. New York, Pags. 92-100
15. Kunze, W., (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros*. Berlin, VELB.
16. Ning, L.; Chengzhi, H.; Huachun, L.; Ruiping, L; Huijuan, L; Jiuhui, Q., *Enhanced Production of in Situ Keggin Al₁₃+ Polymer by a Combined Fe-Al Coagulation Process for*

17. *the Treatment of High Alkalinity Water*. Beijing, Environmental Science and Technology, Industrial & Engineering Chemistry Research, 7, 9544–9552.
18. Martin, J.; Winslow, S.; Munch, D.; (2007). A new approach to drinking water quality data: Lowest Concentration Minimum reporting level. Estados Unidos, American Chemical Society, 677-681.
19. Mertens, J.;(2011). Al nanoclusters in coagulants and granulates: application in arsenic removal from water. Zürich, Environ science biotechnol, 10, 111-117.
20. Peng, P.; Garnier, G.; (2012) *Effect of cationic polyacrylamide on precipitated calcium carbonate flocculation: Kinetics, charge density and ionic strength*. Clayton, Elsevier, 408, 32-39.
21. Rivas-Romero, S.; Menes, G.; Rómulo, A.; (2017) *Tratamiento por coagulación-floculación a efluente de la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara*. Habana, Centro de investigación de níquel, 173-183.
22. Roberson, A.; (2010) *What's next after 40 years of drinking water regulation*. Washington, American Chemical Society, 45, 1, 154-160.
23. Shin, J.; Spinette, R.; O'melia, C., 2007. *Stoichiometry of Coagulation*. Baltimore, *Environmental Science and Technology*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 42, 2582–2589.
24. Skoog, D, West, D., Holler, F., Crouch, S., 2014. *Fundamentos de química analítica*. Ciudad de Mexico, Cengages Learning, 196-400.
25. Valderrama, P. (2013). *Factibilidad de aprovechamiento de lodos de la ptar del municipio de Chinativa*. Colombia, Universidad de Manisales.
26. Yang, C.; Budima, P.; Yee, K.; Wu, T.; (2016). Recent advancement of coagulation-flocculation and its application in wastewater treatment. Jalan, American Chemical Society, 1-101.
27. Yamuna, S.; Vadasarukkai, A.; Graham, A., (2017). *Influence of the Mixing Energy Consumption Affecting Coagulation and Floc Aggregation*. Nueva Escocia, *Environmental Science and Technology*, 51, 3480–3489.

XII. APÉNDICE

A. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Determinación de las condiciones actuales de operación para el coagulante en un reactor de 3000L, utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Coagulante (ppm)} = \frac{\left(\frac{\text{peso agregado (mg)}}{\text{tiempo de vaciado (h)}} \right)}{\text{flujo del reactor } \left(\frac{\text{L}}{\text{h}} \right)} = \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\text{Coagulante (ppm)} = \frac{\frac{24000000 \text{ mg}}{0.5833 \text{ h}}}{125000 \left(\frac{\text{L}}{\text{h}} \right)} = 329.14 \text{ ppm}$$

*Se realizó el mismo cálculo para los datos de cuadro 64, utilizando los datos del cuadro 32

Cálculo 2. Determinación de las condiciones actuales de operación para el floculante en un reactor de 3000L, utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Floculante (ppm)} = \frac{\text{Flujo } \left(\frac{\text{ml}}{\text{h}} \right) * \text{Densidad floculante } \left(\frac{\text{g}}{\text{ml}} \right) * 1000 \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right)}{\text{flujo del reactor } \left(\frac{\text{L}}{\text{h}} \right)}$$

$$\text{Floculante (ppm)} = \frac{1872 \left(\frac{\text{ml}}{\text{h}} \right) * 1.33 \left(\frac{\text{g}}{\text{ml}} \right) * 1000 \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right)}{125000 \left(\frac{\text{L}}{\text{h}} \right)} = 19.28 \text{ ppm}$$

*Se realizó el mismo cálculo para los datos del Cuadro 64, utilizando los datos del Cuadro 32

Cálculo 3. Masa requerida de cal para una concentración determinada, en un volumen de 2 L de muestra, utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{peso cal (g)} = \text{Concentración } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) * \text{Vol(L)} * \frac{1\text{g}}{1000 \text{ mg}}$$

$$\text{peso cal (g)} = 338 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) * 2 \text{ (L)} * \frac{1\text{g}}{1000 \text{ mg}} = 0.676$$

*Se realizó el mismo cálculo para todos los datos del Cuadro 65

Cálculo 4. Volumen de floculante requerida para alcanzar una concentración determinada en un volumen de 2L a partir de 10 ml de una alícuota madre de 100 ml, utilizando las siguientes ecuaciones

$$C1(ppm) * V1(L) = C2(ppm) * V2(L)$$

$$flocutante (ml) = \frac{Volumen (L) * Concentración \left(\frac{mg}{L}\right)}{Densidad \left(\frac{g}{ml}\right) * 1000 \left(\frac{mg}{g}\right)}$$

$$C2(ppm) = \frac{2L * 15 ppm}{0.01L} = 3000 ppm$$

$$floculante ml = \frac{0.1(L) * 3000 \left(\frac{mg}{L}\right)}{1.33 \left(\frac{g}{ml}\right) * 1000 \left(\frac{mg}{g}\right)} = 0.23 ml$$

*Se realizó el mismo cálculo para los datos de Cuadro 66.

Cálculo 5. Concentración de dureza en la muestra a partir de los ml utilizados de EDTA, utilizando la ecuación # del marco teórico.

$$Dureza total \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{3.2 ml EDTA \pm 0.05 * 0.02 N * 1000 * 50}{50 ml \pm 0.5} = 64 \pm 1.47 \left(\frac{mg}{L}\right)$$

*Se realizó el mismo cálculo para los datos de los cuadros 67-78

Cálculo 6. Concentración de alcalinidad M en la muestra a partir de los ml utilizados de ácido clorhídrico, utilizando la ecuación # del marco teórico.

$$Alcalinidad M \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{1.6 ml \pm 0.05 * 0.02 N * 50000}{50 ml \pm 0.5} = 32 \pm 1.03 \left(\frac{mg}{L}\right)$$

*Se realizó el mismo cálculo para los datos de los cuadros 67-78

Cálculo 7. Concentración de alcalinidad P en la muestra a partir de los ml utilizados de ácido clorhídrico

$$Alcalinidad P \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{3 ml \pm 0.05 * 0.02N * 50000}{50 ml \pm 0.5} = 60 \pm 1.58 \left(\frac{mg}{L}\right)$$

*Se realizó el mismo cálculo para los datos de los cuadros 67-78

Cálculo 8. Media de las propiedades en las pruebas en triplicado con las mismas concentraciones, utilizando la misma fórmula para todos

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

\bar{x} es la media aritmética, n es la cantidad de datos muestrales y x_i son los datos

$$\bar{x} = \frac{64ppm (\pm 1.19 ppm) + 68ppm (\pm 1.21 ppm) + 78 ppm (\pm 1.27 ppm)}{3} = 70 ppm \pm 2$$

*Se utilizó el mismo cálculo para los datos de los cuadros 13 – 21, utilizando los de los cuadros 67-78.

Cálculo 9. Desviación estándar de los parámetros analizados en las pruebas en triplicado, utilizando la misma fórmula.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(64 - 70)^2 + (68 - 70)^2 + (78 - 70)^2}{3}} = 7.2$$

*Se utilizó el mismo cálculo para los datos de los cuadros 13 – 21, utilizando los de los cuadros 67-78.

Cálculo 10. Determinación de la cantidad de dureza removida con la floculación realizada.

$$\text{Dureza agua cruda (ppm)} - \text{Dureza agua tratada (ppm)} = (\text{ppm}) \text{ removidos}$$

$$113 ppm (\pm 2.6 ppm) - 70 (\pm 2 ppm) = 43 \pm 3.4$$

*Se utilizaron los datos de los cuadros 13 al 22 y se realizó el mismo cálculo para los cuadros 22 a 25.

Cálculo 11. Determinación de la cantidad de alcalinidad removida con la floculación

$$\text{Alcalinidad agua cruda (ppm)} - (\text{Alcalinidad M (ppm)} + \text{Alcalinidad P (ppm)})$$

$$= \text{Alcalinidad removida (ppm)}$$

$$132 ppm (\pm 2.9 ppm) - (28.7 ppm (\pm 2 ppm) + 71 (\pm 2 ppm)) = 33 ppm \pm 3.4$$

*Se utilizaron los datos de los cuadros 13 al 22 y se realizó el mismo cálculo para los cuadros 22 a 25.

Cálculo 12. Cantidad de solución de ácido clorhídrico requerida para neutralizar la alcalinidad producida por carbonatos disueltos en las diferentes pruebas.

$$70 \frac{mg}{L} CaCO_3 * \frac{1g}{1000mg} * \frac{1 mol CaCO_3}{100.09 g CaCO_3} * \frac{2 mol HCl}{1 mol CaCO_3} * \frac{36.46g HCl}{1 mol HCl} * \frac{1kg}{1000g}$$

$$* \frac{100 kg solución}{25 kg HCl} = 0.000206 kg solución al 25\% \frac{m}{m} HCl$$

*Se realizó el mismo cálculo para todos los datos en los cuadros, 81-84.

Cálculo 13. Costos por reactivo para el diferente consumo dependiendo de las concentraciones, utilizando el flujo de los reactores sumado y asumiendo un tiempo de operación de 15 horas diarias por 365 días al año.

$$15 \frac{mg}{L} * \frac{1 kg}{10^6 mg} * 9.19 \frac{Q}{kg} * 193000 \frac{L}{h} * \frac{15 h}{1 d} * \frac{365 d}{1 año} = Q 146,477.70/año$$

*Se realizó el mismo cálculo para los cuadros 79-84, para determinar los costos de los reactivos se utilizaron los precios mostrados en el Cuadro 63.

Cálculo 14. Diferencia de costos entre la combinación de concentraciones propuesta y la actual.

$$\begin{aligned} & (-\text{Costo polímero} - \text{Costo cal} - \text{Costo solución de ácido})_{\text{condiciones actuales}} \\ & + (-\text{Costo polímero} - \text{Costo cal} \\ & - \text{Costo solución de ácido})_{\text{condiciones propuestas}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (-Q 185,538.42 - Q 409,141.14 - Q 767,879.63) \\ & + (-Q 205,068.78 - Q 365,845.78 - Q - 739,570.70) = Q 52,073.93 \end{aligned}$$

*Se realizó el mismo cálculo para los cuadros 26-30

B. Análisis de error

Cálculo 15. Propagación de error para los cálculos con multiplicación y/o división.

$$\Delta q = q * \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2}$$

$$\Delta ppm = 64 ppm * \sqrt{\left(\frac{0.05}{3.2 ml}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{50 ml}\right)^2} = 1.19 ppm$$

*Se realizó el mismo cálculo para los datos con incertidumbre de este tipo

Cálculo 16. Propagación de error para los cálculos con suma y/o resta.

$$\Delta y = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta c^2}$$

$$\Delta ppm = \sqrt{(2.6 ppm)^2 + (2 ppm)^2} = 3.4 ppm$$

*Se realizó el mismo cálculo para todos los datos con incertidumbre de este tipo

C. Datos originales

Cuadro 31. Densidad del floculante y coagulante

| compuesto | densidad (g/ml) |
|--------------------------|-----------------|
| cal | 2.24 |
| polímero | 1.33 |
| Ácido clorhídrico 25% | 1.12 |

Cuadro 32. Variables medidas del proceso actual

| | Reactor 1 | Reactor 2 |
|-----------------------|------------|-----------|
| Volumen(L) | 3000 | 3000 |
| tiempo vaciado (h) | 0.95833333 | 0.5833 |
| Dosificación (mg) | 25000000 | 24000000 |
| Flujo polímero (ml/h) | 1000.02 | 1872 |
| flujo reactor 1 (L/h) | 69000 | 125000 |

Cuadro 33. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 38 ppm de coagulante

| Muestra | ml ±0.05 EDTA | ml ±0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|---------------------|--------------------|-------|--------------------------|
| Cruda | 5.5 | 6.6 | 7.488 | 0.06 |

Cuadro 34. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 338 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocal (ml) | Concentración (ppm) | ml ±0.05 EDTA | ml ±0.05 HCl alcalinidad M | ml HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|-----------------|-------------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------------|-------|--------------------------|
| 1 | 0.68 | 0.02 | 14.96 | 3.20 | 1.60 | 3.00 | 10.55 | 0.14 |
| 2 | 0.68 | 0.03 | 16.96 | 3.30 | 1.50 | 3.35 | 10.70 | 0.14 |
| 3 | 0.68 | 0.03 | 19.02 | 3.00 | 1.50 | 3.10 | 10.74 | 0.12 |
| 4 | 0.68 | 0.03 | 21.01 | 3.10 | 1.40 | 3.15 | 10.80 | 0.14 |
| 5 | 0.68 | 0.03 | 23.01 | 3.00 | 1.20 | 2.90 | 10.64 | 0.09 |
| 6 | 0.68 | 0.04 | 25.00 | 3.10 | 1.20 | 3.25 | 10.79 | 0.15 |

Cuadro 35. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 338 ppm de coagulante

| Muestra | ml ±0.05 EDTA | ml ±0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|---------------------|--------------------|-------|--------------------------|
| Cruda | 6.2 | 6.9 | 7.488 | 0.11 |

Cuadro 36. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 338 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocal (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | Ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|--------------------|
| 1.00 | 0.68 | 0.02 | 14.96 | 3.40 | 1.40 | 3.60 | 10.77 | 0.10 |
| 2.00 | 0.68 | 0.03 | 16.96 | 3.50 | 1.40 | 3.60 | 10.87 | 0.07 |
| 3.00 | 0.68 | 0.03 | 19.02 | 3.20 | 1.30 | 3.70 | 10.93 | 0.08 |
| 4.00 | 0.68 | 0.03 | 21.01 | 3.10 | 1.40 | 3.50 | 10.80 | 0.09 |
| 5.00 | 0.68 | 0.03 | 23.01 | 2.90 | 1.30 | 3.30 | 10.76 | 0.07 |
| 6.00 | 0.68 | 0.04 | 25.00 | 3.10 | 1.30 | 3.40 | 10.74 | 0.06 |

Cuadro 37. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 338 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 5.3 | 6.3 | 7.365 | 0.03 |

Cuadro 38. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 338 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocal (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.676 | 0.0225 | 14.9625 | 3.9 | 1.3 | 4 | 10.995 | 0.12 |
| 2 | 0.676 | 0.0255 | 16.9575 | 3.7 | 1.4 | 3.7 | 10.904 | 0.17 |
| 3 | 0.676 | 0.0286 | 19.019 | 3.6 | 1.3 | 3.1 | 10.698 | 0.09 |
| 4 | 0.676 | 0.0316 | 21.014 | 3.5 | 1.3 | 3.8 | 10.916 | 0.15 |
| 5 | 0.676 | 0.0346 | 23.009 | 3 | 1.2 | 2.6 | 10.445 | 0.09 |
| 6 | 0.676 | 0.0376 | 25.004 | 3 | 1.3 | 3.3 | 10.822 | 0.18 |

Cuadro 39. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 358 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 5.5 | 6.7 | 7.533 | 0.02 |

Cuadro 40. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 358 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocal (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.72 | 0.0225 | 14.9625 | 4 | 1.4 | 3.6 | 10.802 | 0.14 |
| 2 | 0.72 | 0.0255 | 16.9575 | 3.5 | 1.5 | 3.5 | 10.936 | 0.09 |
| 3 | 0.72 | 0.0286 | 19.019 | 3.3 | 1.2 | 3.5 | 10.878 | 0.06 |
| 4 | 0.72 | 0.0316 | 21.014 | 3.2 | 1.3 | 3.55 | 10.777 | 0.13 |
| 5 | 0.72 | 0.0346 | 23.009 | 2.9 | 1.2 | 3 | 10.776 | 0.08 |
| 6 | 0.72 | 0.0376 | 25.004 | 3.1 | 1.1 | 3.35 | 10.83 | 0.07 |

Cuadro 41. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 358 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 5.7 | 7.3 | 7.493 | 0.02 |

Cuadro 42. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 358 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocal (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.72 | 0.0225 | 14.9625 | 3 | 1.1 | 3.25 | 10.924 | 0.13 |
| 2 | 0.72 | 0.0255 | 16.9575 | 3.3 | 1.4 | 3.2 | 10.791 | 0.12 |
| 3 | 0.72 | 0.0286 | 19.019 | 3.1 | 1.4 | 3.1 | 10.644 | 0.08 |
| 4 | 0.72 | 0.0316 | 21.014 | 3 | 1.5 | 3 | 10.544 | 0.27 |
| 5 | 0.72 | 0.0346 | 23.009 | 2.8 | 1.2 | 2.9 | 10.806 | 0.09 |
| 6 | 0.72 | 0.0376 | 25.004 | 3 | 1.3 | 3 | 10.8 | 0.12 |

Cuadro 43. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 358 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|------|--------------------|
| Cruda | 5.3 | 7.4 | 7.91 | 0.04 |

Cuadro 44. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 358 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocual (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.72 | 0.0225 | 14.9625 | 4 | 1.4 | 4.1 | 11.01 | 0.04 |
| 2 | 0.72 | 0.0255 | 16.9575 | 4.1 | 1.3 | 4.5 | 11.086 | 0.06 |
| 3 | 0.72 | 0.0286 | 19.019 | 4 | 1.1 | 4.2 | 10.974 | 0.05 |
| 4 | 0.72 | 0.0316 | 21.014 | 3.9 | 1 | 4.3 | 11.12 | 0.12 |
| 5 | 0.72 | 0.0346 | 23.009 | 3.4 | 1.1 | 3.8 | 10.927 | 0.07 |
| 6 | 0.72 | 0.0376 | 25.004 | 3.6 | 1.2 | 4 | 11.075 | 0.06 |

Cuadro 45. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 378 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 6.4 | 7.7 | 7.473 | 0.02 |

Cuadro 46. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 378 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocual (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.76 | 0.0225 | 14.9625 | 4.7 | 1.6 | 4.1 | 11.412 | 0.61 |
| 2 | 0.76 | 0.0255 | 16.9575 | 4.4 | 1.5 | 4.4 | 11.141 | 0.11 |
| 3 | 0.76 | 0.0286 | 19.019 | 3.6 | 1.4 | 3.7 | 10.834 | 0.17 |
| 4 | 0.76 | 0.0316 | 21.014 | 3.7 | 1.3 | 3.6 | 10.75 | 0.13 |
| 5 | 0.76 | 0.0346 | 23.009 | 3.6 | 1.2 | 3.4 | 11.101 | 0.08 |
| 6 | 0.76 | 0.0376 | 25.004 | 3.3 | 1.1 | 3.4 | 10.518 | 0.13 |

Cuadro 47. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 378 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 6.4 | 7.7 | 7.593 | 0.03 |

Cuadro 48. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 378 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocual (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | MI ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.76 | 0.0225 | 14.9625 | 4.6 | 1.7 | 4.25 | 10.95 | 0.59 |
| 2 | 0.76 | 0.0255 | 16.9575 | 4.4 | 1.8 | 4.4 | 10.981 | 0.35 |
| 3 | 0.76 | 0.0286 | 19.019 | 3.5 | 1.5 | 3.9 | 10.887 | 0.13 |
| 4 | 0.76 | 0.0316 | 21.014 | 3.7 | 1.7 | 3.8 | 10.735 | 0.23 |
| 5 | 0.76 | 0.0346 | 23.009 | 3.7 | 1.7 | 3.5 | 10.861 | 0.18 |
| 6 | 0.76 | 0.0376 | 25.004 | 3.6 | 1.6 | 3.6 | 10.888 | 0.22 |

Cuadro 49. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 378 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 6.6 | 8.2 | 7.602 | 0.02 |

Cuadro 50. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 378 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocual (ml) | Concentración (ppm) | MI ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.76 | 0.0225 | 14.9625 | 4.45 | 1.6 | 3.45 | 10.835 | 0.58 |
| 2 | 0.76 | 0.0255 | 16.9575 | 4 | 1.7 | 3.65 | 10.826 | 0.16 |
| 3 | 0.76 | 0.0286 | 19.019 | 3.5 | 1.5 | 3.25 | 10.815 | 0.1 |
| 4 | 0.76 | 0.0316 | 21.014 | 3.4 | 1.6 | 3.35 | 10.646 | 0.06 |
| 5 | 0.76 | 0.0346 | 23.009 | 3.4 | 1.6 | 3.3 | 10.549 | 0.16 |
| 6 | 0.76 | 0.0376 | 25.004 | 3.3 | 1.8 | 3 | 10.462 | 0.06 |

Cuadro 51. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 398 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 5.7 | 7.3 | 7.747 | 0.06 |

Cuadro 52. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocal (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.796 | 0.0225 | 14.9625 | 4.3 | 0.95 | 4.9 | 11.207 | 0.09 |
| 2 | 0.796 | 0.0255 | 16.9575 | 4.2 | 1.2 | 4.75 | 11.175 | 0.08 |
| 3 | 0.796 | 0.0286 | 19.019 | 3.7 | 0.95 | 4.3 | 11.097 | 0.06 |
| 4 | 0.796 | 0.0316 | 21.014 | 4.4 | 1.1 | 4.8 | 11.261 | 0.19 |
| 5 | 0.796 | 0.0346 | 23.009 | 5 | 1.2 | 5.1 | 11.316 | 0.04 |
| 6 | 0.796 | 0.0376 | 25.004 | 4.8 | 1.1 | 5.6 | 11.294 | 0.17 |

Cuadro 53. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 398 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 5.8 | 6.8 | 7.784 | 0.01 |

Cuadro 54. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocal (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.796 | 0.0225 | 14.9625 | 4.6 | 1.2 | 5.45 | 11.178 | 0.08 |
| 2 | 0.796 | 0.0255 | 16.9575 | 4.4 | 1.1 | 4.9 | 11.137 | 0.07 |
| 3 | 0.796 | 0.0286 | 19.019 | 4.1 | 1 | 4.6 | 11.174 | 0.17 |
| 4 | 0.796 | 0.0316 | 21.014 | 4.6 | 1.1 | 5.4 | 11.234 | 0.06 |
| 5 | 0.796 | 0.0346 | 23.009 | 4.4 | 1 | 5.1 | 11.218 | 0.08 |
| 6 | 0.796 | 0.0376 | 25.004 | 4.4 | 1.1 | 5.2 | 11.206 | 0.1 |

Cuadro 55. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 398 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 5.5 | 6.9 | 7.763 | 0.03 |

Cuadro 56. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocual (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.796 | 0.0225 | 14.9625 | 5.4 | 1.2 | 6.1 | 11.42 | 0.05 |
| 2 | 0.796 | 0.0255 | 16.9575 | 5.2 | 1.1 | 5.5 | 11.347 | 0.04 |
| 3 | 0.796 | 0.0286 | 19.019 | 4.7 | 1.1 | 5.3 | 11.261 | 0.12 |
| 4 | 0.796 | 0.0316 | 21.014 | 4.8 | 1.2 | 5.55 | 11.293 | 0.11 |
| 5 | 0.796 | 0.0346 | 23.009 | 5 | 1.2 | 5.7 | 11.29 | 0.07 |
| 6 | 0.796 | 0.0376 | 25.004 | 4.6 | 1.1 | 5.8 | 11.286 | 0.06 |

Cuadro 57. Análisis de agua cruda para la primera prueba de 418 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 4.8 | 6 | 7.442 | 0.08 |

Cuadro 58. Análisis de la primera prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocual (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.84 | 0.0225 | 14.9625 | 4 | 1.6 | 3 | 10.878 | 0.4 |
| 2 | 0.84 | 0.0255 | 16.9575 | 4.5 | 1.6 | 4.1 | 10.923 | 1.17 |
| 3 | 0.84 | 0.0286 | 19.019 | 5.1 | 1.7 | 5 | 10.288 | 0.97 |
| 4 | 0.84 | 0.0316 | 21.014 | 4.1 | 1.7 | 3.5 | 10.79 | 0.54 |
| 5 | 0.84 | 0.0346 | 23.009 | 4.5 | 1.6 | 4.6 | 11.193 | 0.99 |
| 6 | 0.84 | 0.0376 | 25.004 | 4.8 | 1.6 | 4.8 | 11.184 | 0.7 |

Cuadro 59. Análisis de agua cruda para la segunda prueba de 418 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 5.2 | 6.3 | 7.401 | 0.05 |

Cuadro 60. Análisis de la segunda prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocal (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.84 | 0.0225 | 14.9625 | 3.95 | 1.4 | 4 | 11.562 | 0.27 |
| 2 | 0.84 | 0.0255 | 16.9575 | 6.1 | 1.2 | 6.6 | 11.405 | 0.16 |
| 3 | 0.84 | 0.0286 | 19.019 | 6.3 | 1.4 | 7.1 | 11.472 | 0.11 |
| 4 | 0.84 | 0.0316 | 21.014 | 7.6 | 1.4 | 8.5 | 11.533 | 0.17 |
| 5 | 0.84 | 0.0346 | 23.009 | 5 | 1.3 | 5.2 | 11.234 | 0.06 |
| 6 | 0.84 | 0.0376 | 25.004 | 5.2 | 1.3 | 5.3 | 11.291 | 0.05 |

Cuadro 61. Análisis de agua cruda para la tercera prueba de 418 ppm de coagulante

| Muestra | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------------|-------------------|-------|--------------------|
| Cruda | 5.25 | 6.2 | 7.437 | 0.06 |

Cuadro 62. Análisis de la tercera prueba de agua tratada con 398 ppm de coagulante

| Muestra | Peso cal (g) | Volumen poliflocal (ml) | Concentración (ppm) | ml ± 0.05 EDTA | ml ± 0.05 HCl alcalinidad M | ml ± 0.05 HCl alcalinidad P | pH | Turbidez 90° (EBC) |
|---------|--------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 0.84 | 0.0225 | 14.9625 | 4.25 | 1.1 | 4.75 | 11.432 | 0.2 |
| 2 | 0.84 | 0.0255 | 16.9575 | 6.5 | 1.2 | 7.2 | 11.301 | 0.89 |
| 3 | 0.84 | 0.0286 | 19.019 | 6.6 | 1.2 | 8.4 | 11.556 | 0.7 |
| 4 | 0.84 | 0.0316 | 21.014 | 7.4 | 1.4 | 9.4 | 11.7 | 0.5 |
| 5 | 0.84 | 0.0346 | 23.009 | 5.5 | 1.3 | 5.8 | 11.104 | 1.06 |
| 6 | 0.84 | 0.0376 | 25.004 | 5.3 | 1.2 | 5.4 | 11.309 | 0.67 |

Cuadro 63. Precio de los reactivos utilizados en Q/ kg de reactivo

| Compuesto | Quetzales / Kg |
|-------------------------|----------------|
| Policloruro de aluminio | Q 9.19 |
| Hidróxido de calcio | Q 1.02 |
| ácido clorhídrico | Q 3.43 |

D. Datos calculados

Cuadro 64. Condiciones de operación actuales de cada reactor

| Concentración(ppm) | Reactor 1 | Reactor 2 |
|--------------------|-----------|-----------|
| Floculante | 19.28 | 19.92 |
| Coagulante | 378.07 | 329.14 |

Cuadro 65. Peso requerido de coagulante para cada concentración

| Volumen (L) | Concentración (ppm) | peso (g) |
|-------------|---------------------|----------|
| 2 | 338 | 0.676 |
| 2 | 358 | 0.716 |
| 2 | 378 | 0.756 |
| 2 | 398 | 0.796 |
| 2 | 418 | 0.836 |

Cuadro 66. Volumen de floculante requerido para cada concentración y para alícuota madre de 100 ml

| Volumen (L) | Concentración (ppm) | Concentración (ppm) alícuota 10 ml | volumen para alícuota de 100 ml |
|-------------|---------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 2 | 15 | 3000 | 0.23 |
| 2 | 17 | 3400 | 0.26 |
| 2 | 19 | 3800 | 0.29 |
| 2 | 21 | 4200 | 0.32 |
| 2 | 23 | 4600 | 0.35 |
| 2 | 25 | 5000 | 0.38 |

Cuadro 67. Propiedades del agua tratada primera prueba de 338 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.96 | 64.00 | 1.19 | 32.00 | 1.05 | 60.00 | 1.17 | 10.55 | 0.56 | 0.02 |
| 2 | 16.96 | 66.00 | 1.20 | 30.00 | 1.04 | 67.00 | 1.20 | 10.70 | 0.56 | 0.02 |
| 3 | 19.02 | 60.00 | 1.17 | 30.00 | 1.04 | 62.00 | 1.18 | 10.74 | 0.48 | 0.02 |
| 4 | 21.01 | 62.00 | 1.18 | 28.00 | 1.04 | 63.00 | 1.18 | 10.80 | 0.56 | 0.02 |
| 5 | 23.01 | 60.00 | 1.17 | 24.00 | 1.03 | 58.00 | 1.16 | 10.64 | 0.36 | 0.02 |
| 6 | 25.00 | 62.00 | 1.18 | 24.00 | 1.03 | 65.00 | 1.19 | 10.79 | 0.60 | 0.02 |

Cuadro 68. Propiedades del agua tratada segunda prueba de 338 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1.00 | 14.96 | 68.00 | 1.21 | 28.00 | 1.04 | 72.00 | 1.23 | 10.77 | 0.40 | 0.02 |
| 2.00 | 16.96 | 70.00 | 1.22 | 28.00 | 1.04 | 72.00 | 1.23 | 10.87 | 0.28 | 0.02 |
| 3.00 | 19.02 | 64.00 | 1.19 | 26.00 | 1.03 | 74.00 | 1.24 | 10.93 | 0.32 | 0.02 |
| 4.00 | 21.01 | 62.00 | 1.18 | 28.00 | 1.04 | 70.00 | 1.22 | 10.80 | 0.36 | 0.02 |
| 5.00 | 23.01 | 58.00 | 1.16 | 26.00 | 1.03 | 66.00 | 1.20 | 10.76 | 0.28 | 0.02 |
| 6.00 | 25.00 | 62.00 | 1.18 | 26.00 | 1.03 | 68.00 | 1.21 | 10.74 | 0.24 | 0.02 |

Cuadro 69. Propiedades del agua tratada tercera prueba de 338 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 78 | 1.27 | 26 | 1.03 | 80 | 1.28 | 10.995 | 0.48 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 74 | 1.24 | 28 | 1.04 | 74 | 1.24 | 10.904 | 0.68 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 72 | 1.23 | 26 | 1.03 | 62 | 1.18 | 10.698 | 0.36 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 70 | 1.22 | 26 | 1.03 | 76 | 1.26 | 10.916 | 0.6 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 60 | 1.17 | 24 | 1.03 | 52 | 1.13 | 10.445 | 0.36 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 60 | 1.17 | 26 | 1.03 | 66 | 1.20 | 10.822 | 0.72 | 0.02 |

Cuadro 70. Propiedades del agua tratada primera prueba de 358 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 80 | 1.28 | 28 | 1.04 | 72 | 1.23 | 10.802 | 0.56 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 70 | 1.22 | 30 | 1.04 | 70 | 1.22 | 10.936 | 0.36 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 66 | 1.20 | 24 | 1.03 | 70 | 1.22 | 10.878 | 0.24 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 64 | 1.19 | 26 | 1.03 | 71 | 1.23 | 10.777 | 0.52 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 58 | 1.16 | 24 | 1.03 | 60 | 1.17 | 10.776 | 0.32 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 62 | 1.18 | 22 | 1.02 | 67 | 1.20 | 10.83 | 0.28 | 0.02 |

Cuadro 71. Propiedades del agua tratada segunda prueba de 358 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 60 | 1.17 | 22 | 1.02 | 65 | 1.19 | 10.924 | 0.52 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 66 | 1.20 | 28 | 1.04 | 64 | 1.19 | 10.791 | 0.48 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 62 | 1.18 | 28 | 1.04 | 62 | 1.18 | 10.644 | 0.32 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 60 | 1.17 | 30 | 1.04 | 60 | 1.17 | 10.544 | 1.08 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 56 | 1.15 | 24 | 1.03 | 58 | 1.16 | 10.806 | 0.36 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 60 | 1.17 | 26 | 1.03 | 60 | 1.17 | 10.8 | 0.48 | 0.02 |

Cuadro 72. Propiedades del agua tratada tercera prueba de 358 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 80 | 1.28 | 28 | 1.04 | 82 | 1.29 | 11.01 | 0.16 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 82 | 1.29 | 26 | 1.03 | 90 | 1.35 | 11.086 | 0.24 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 80 | 1.28 | 22 | 1.02 | 84 | 1.31 | 10.974 | 0.2 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 78 | 1.27 | 20 | 1.02 | 86 | 1.32 | 11.12 | 0.48 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 68 | 1.21 | 22 | 1.02 | 76 | 1.26 | 10.927 | 0.28 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 72 | 1.23 | 24 | 1.03 | 80 | 1.28 | 11.075 | 0.24 | 0.02 |

Cuadro 73. Propiedades del agua tratada primera prueba de 378 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 94 | 1.37 | 32 | 1.05 | 82 | 1.29 | 11.412 | 2.44 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 88 | 1.33 | 30 | 1.04 | 88 | 1.33 | 11.141 | 0.44 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 72 | 1.23 | 28 | 1.04 | 74 | 1.24 | 10.834 | 0.68 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 74 | 1.24 | 26 | 1.03 | 72 | 1.23 | 10.75 | 0.52 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 72 | 1.23 | 24 | 1.03 | 68 | 1.21 | 11.101 | 0.32 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 66 | 1.20 | 22 | 1.02 | 68 | 1.21 | 10.518 | 0.52 | 0.02 |

Cuadro 74. Propiedades del agua tratada segunda prueba de 378 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 92 | 1.36 | 34 | 1.06 | 85 | 1.31 | 10.95 | 2.36 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 88 | 1.33 | 36 | 1.06 | 88 | 1.33 | 10.981 | 1.4 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 70 | 1.22 | 30 | 1.04 | 78 | 1.27 | 10.887 | 0.52 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 74 | 1.24 | 34 | 1.06 | 76 | 1.26 | 10.735 | 0.92 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 74 | 1.24 | 34 | 1.06 | 70 | 1.22 | 10.861 | 0.72 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 72 | 1.23 | 32 | 1.05 | 72 | 1.23 | 10.888 | 0.88 | 0.02 |

Cuadro 75. Propiedades del agua tratada tercera prueba de 378 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 89 | 1.34 | 32 | 1.05 | 69 | 1.21 | 10.835 | 2.32 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 80 | 1.28 | 34 | 1.06 | 73 | 1.24 | 10.826 | 0.64 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 70 | 1.22 | 30 | 1.04 | 65 | 1.19 | 10.815 | 0.4 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 68 | 1.21 | 32 | 1.05 | 67 | 1.20 | 10.646 | 0.24 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 68 | 1.21 | 32 | 1.05 | 66 | 1.20 | 10.549 | 0.64 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 66 | 1.20 | 36 | 1.06 | 60 | 1.17 | 10.462 | 0.24 | 0.02 |

Cuadro 76. Propiedades del agua tratada primera prueba de 398 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 86 | 1.32 | 19 | 1.02 | 98 | 1.40 | 11.207 | 0.36 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 84 | 1.31 | 24 | 1.03 | 95 | 1.38 | 11.175 | 0.32 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 74 | 1.24 | 19 | 1.02 | 86 | 1.32 | 11.097 | 0.24 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 88 | 1.33 | 22 | 1.02 | 96 | 1.39 | 11.261 | 0.76 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 100 | 1.41 | 24 | 1.03 | 102 | 1.43 | 11.316 | 0.16 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 96 | 1.39 | 22 | 1.02 | 112 | 1.50 | 11.294 | 0.68 | 0.02 |

Cuadro 77. Propiedades del agua tratada segunda prueba de 398 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 92 | 1.36 | 24 | 1.03 | 109 | 1.48 | 11.178 | 0.32 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 88 | 1.33 | 22 | 1.02 | 98 | 1.40 | 11.137 | 0.28 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 82 | 1.29 | 20 | 1.02 | 92 | 1.36 | 11.174 | 0.68 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 92 | 1.36 | 22 | 1.02 | 108 | 1.47 | 11.234 | 0.24 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 88 | 1.33 | 20 | 1.02 | 102 | 1.43 | 11.218 | 0.32 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 88 | 1.33 | 22 | 1.02 | 104 | 1.44 | 11.206 | 0.4 | 0.02 |

Cuadro 78. Propiedades del agua tratada tercera prueba de 398 de coagulante

| Muestra | Concentración (ppm) | Dureza (ppm) | ± | Alcalinidad M(ppm) | ± | Alcalinidad P(ppm) | ± | pH ±0.05 | Turbidez (FTU) | ± |
|---------|---------------------|--------------|------|--------------------|------|--------------------|------|----------|----------------|------|
| 1 | 14.9625 | 108 | 1.47 | 24 | 1.03 | 122 | 1.58 | 11.42 | 0.2 | 0.02 |
| 2 | 16.9575 | 104 | 1.44 | 22 | 1.02 | 110 | 1.49 | 11.347 | 0.16 | 0.02 |
| 3 | 19.019 | 94 | 1.37 | 22 | 1.02 | 106 | 1.46 | 11.261 | 0.48 | 0.02 |
| 4 | 21.014 | 96 | 1.39 | 24 | 1.03 | 111 | 1.49 | 11.293 | 0.44 | 0.02 |
| 5 | 23.009 | 100 | 1.41 | 24 | 1.03 | 114 | 1.52 | 11.29 | 0.28 | 0.02 |
| 6 | 25.004 | 92 | 1.36 | 22 | 1.02 | 116 | 1.53 | 11.286 | 0.24 | 0.02 |

Cuadro 79. Costos generados para las diferentes concentraciones de polímero para un año de producción, utilizando los flujos de los reactores y asumiendo que se producirá agua tratada 15 horas al día 365 días al año.

| PAC (mg/L) | Kg/L | Q / Litro | Q/ hora | Q/ año |
|------------|----------|-----------|---------|--------------|
| 15 | 0.000015 | -0.000138 | -Q26.75 | -Q146,477.70 |
| 17 | 0.000017 | -0.000156 | -Q30.32 | -Q166,008.06 |
| 19 | 0.000019 | -0.000175 | -Q33.89 | -Q185,538.42 |
| 21 | 0.000021 | -0.000193 | -Q37.46 | -Q205,068.78 |
| 23 | 0.000023 | -0.000211 | -Q41.02 | -Q224,599.14 |
| 25 | 0.000025 | -0.000230 | -Q44.59 | -Q244,129.49 |

Cuadro 80. Costos generados para las diferentes concentraciones de cal hidratada para un año de producción, utilizando los flujos de los reactores y asumiendo que se producirá agua tratada 15 horas al día 365 días al año.

| Ca (OH) ₂ (mg/L) | Kg/L | Q / Litro | Q/ hora | Q/ año |
|-----------------------------|----------|-----------|---------|--------------|
| 338 | 0.000338 | -0.000344 | -Q66.82 | -Q365,845.78 |
| 358 | 0.000358 | -0.000365 | -Q70.78 | -Q387,493.46 |
| 378 | 0.000378 | -0.000385 | -Q74.73 | -Q409,141.14 |
| 398 | 0.000398 | -0.000406 | -Q78.68 | -Q430,788.82 |

Cuadro 81. Costos generados por el uso de una solución de ácido clorhídrico al 25% m/m para neutralizar los carbonatos disueltos en el agua, después del tratamiento, para las pruebas trabajadas con 338 ppm de cal.

| (mg/L) | HCl Kg/L | Q / Litro | Q/ hora | Q/ año |
|--------|----------|------------|----------|--------------|
| 15 ppm | 0.000206 | -0.0007063 | -Q137.02 | -Q750,186.55 |
| 17 ppm | 0.000207 | -0.0007096 | -Q137.67 | -Q753,725.17 |
| 19 ppm | 0.000192 | -0.0006596 | -Q127.97 | -Q700,645.93 |
| 21 ppm | 0.000203 | -0.0006963 | -Q135.08 | -Q739,570.70 |
| 23 ppm | 0.000171 | -0.0005864 | -Q113.75 | -Q622,796.38 |
| 25 ppm | 0.000193 | -0.0006630 | -Q128.62 | -Q704,184.55 |

Cuadro 82. Costos generados por el uso de una solución de ácido clorhídrico al 25% m/m para neutralizar los carbonatos disueltos en el agua, después del tratamiento, para las pruebas trabajadas con 358 ppm de cal.

| HCl (mg/L) | HCl Kg/L | Q / Litro | Q/ hora | Q/ año |
|------------|----------|------------|----------|--------------|
| 15 ppm | 0.000213 | -0.0007296 | -Q141.54 | -Q774,956.86 |
| 17 ppm | 0.000218 | -0.0007463 | -Q144.78 | -Q792,649.94 |
| 19 ppm | 0.000210 | -0.0007196 | -Q139.61 | -Q764,341.01 |
| 21 ppm | 0.000211 | -0.0007229 | -Q140.25 | -Q767,879.63 |
| 23 ppm | 0.000188 | -0.0006463 | -Q125.39 | -Q686,491.47 |
| 25 ppm | 0.000201 | -0.0006896 | -Q133.79 | -Q732,493.47 |

Cuadro 83. Costos generados por el uso de una solución de ácido clorhídrico al 25% m/m para neutralizar los carbonatos disueltos en el agua, después del tratamiento, para las pruebas trabajadas con 378 ppm de cal.

| HCl (mg/L) | HCl Kg/L | Q / Litro | Q/ hora | Q/ año |
|------------|----------|------------|----------|--------------|
| 15 ppm | 0.000229 | -0.0007862 | -Q152.53 | -Q835,113.33 |
| 17 ppm | 0.000242 | -0.0008296 | -Q160.93 | -Q881,115.34 |
| 19 ppm | 0.000211 | -0.0007229 | -Q140.25 | -Q767,879.63 |
| 21 ppm | 0.000209 | -0.0007163 | -Q138.96 | -Q760,802.40 |
| 23 ppm | 0.000198 | -0.0006796 | -Q131.85 | -Q721,877.62 |
| 25 ppm | 0.000194 | -0.0006663 | -Q129.26 | -Q707,723.16 |

Cuadro 84. Costos generados por el uso de una solución de ácido clorhídrico al 25% m/m para neutralizar los carbonatos disueltos en el agua, después del tratamiento, para las pruebas trabajadas con 398 ppm de cal.

| HCl (mg/L) | HCl Kg/L | Q / Litro | Q/ hora | Q/ año |
|------------|----------|------------|----------|----------------|
| 15 ppm | 0.000320 | -0.0010961 | -Q212.64 | -Q1,164,204.60 |
| 17 ppm | 0.000294 | -0.0010095 | -Q195.84 | -Q1,072,200.59 |
| 19 ppm | 0.000276 | -0.0009462 | -Q183.56 | -Q1,004,966.89 |
| 21 ppm | 0.000306 | -0.0010494 | -Q203.59 | -Q1,114,663.98 |
| 23 ppm | 0.000309 | -0.0010594 | -Q205.53 | -Q1,125,279.83 |
| 25 ppm | 0.000322 | -0.0011061 | -Q214.58 | -Q1,174,820.45 |