

**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES APROPIADAS DE
PREPARACIÓN DE UN FLOCULANTE COMO COMPONENTE
FUNDAMENTAL EN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DE JUGO EN
RIOPAILA CASTILLA S.A, PLANTA RIOPAILA**

LAURA VIVIANA MARÍN OCAMPO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
TECNOLOGÍA QUÍMICA
PEREIRA, RISARALDA
NOVIEMBRE, 2012**

**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES APROPIADAS DE
PREPARACIÓN DE UN FLOCULANTE COMO COMPONENTE
FUNDAMENTAL EN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DE JUGO EN
RIOPAILA CASTILLA S.A, PLANTA RIOPAILA**

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR

Químico M.Sc. Nelson Contreras C.

CODIRECTOR

Ing. Químico Gustavo Torres Muñoz

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
TECNOLOGÍA QUÍMICA
PEREIRA, RISARALDA
NOVIEMBRE, 2012**

AGRADECIMIENTOS

Como primera medida agradezco a mi familia, por el constante apoyo que me han ofrecido. A mi madre Consuelo Ocampo, mi padre Héctor Marín y a Bryan Robledo por estar presentes durante todo el transcurso de esta experiencia brindándome las energías, consejos, ayuda y apoyo incondicional para poder culminar este proyecto.

Agradezco a la empresa Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila por haberme permitido realizar la práctica en el Área de Elaboración, y como consecuencia haber tenido la posibilidad de desarrollar este proyecto, que espero sea útil para la misma.

A todo el personal del Área de Elaboración y del Área de Control de Procesos (Laboratorio) por la amabilidad, hospitalidad y disposición ofrecidas durante el tiempo que duré en el ingenio realizando la práctica empresarial. No olvidaré las experiencias compartidas.

A Hernando Afanador, Ingeniero de Apoyo del Área de Elaboración, quien influyó de forma notoria en la supervisión del proyecto y siempre estuvo dispuesto a colaborar con las inquietudes que tenía, a pesar de los inconvenientes que algunas veces surgieron.

A Nelson Morales, Operario de la Estación de Clarificación de Jugo, por su amistad y disposición frente a todas las inquietudes y necesidades propias del desarrollo del presente trabajo.

A Miguel Álvarez, Operario del Área de Elaboración, por haberme colaborado y apoyado con todos y cada uno de los aspectos que necesité para el desarrollo de la parte experimental del proyecto.

Agradezco a mi director de trabajo de grado, Nelson Contreras, por su incondicional apoyo y direccionamiento no solo respecto a la realización del proyecto, sino también en otros aspectos de mi vida en cuyo momento he necesitado un guía.

En general, agradezco a todas aquellas personas que me colaboraron y que participaron en la realización de este proyecto.

Gracias a todos por haberme ayudado de alguna u otra forma a culminar exitosamente la realización de este trabajo y consecuentemente, al alcance de esta meta, la cual espero sea el inicio de muchas más en mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Glosario	i
Resumen	iv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3. JUSTIFICACIÓN	4
4. OBJETIVOS	5
4.1. Objetivo General	5
4.2. Objetivos Específicos	5
5. MARCO TEÓRICO	6
5.1. Proceso general de fabricación de azúcar en Riopaila Castilla, planta Riopaila. ..	6
5.2. Calidad de la caña de azúcar	9
5.2.1. Grado de quema y tiempo entre corte y molienda	9
5.2.2. Contenido de material extraño	10
5.2.3. Altura del corte	10
5.2.4. Acción de microorganismos	11
5.3. Purificación física del jugo de caña	14
5.3.1. Pesaje de la caña	14
5.3.2. Extracción física del jugo.....	15
5.4. Jugo Diluido	17
5.4.1. Composición química de las sustancias presentes en el jugo diluido	19
5.4.1.1. Carbohidratos	19
5.4.1.2. Sales orgánicas	20
5.4.1.3. Ácidos orgánicos	21
5.4.1.4. Proteínas	22
5.4.1.5. Gomas	23
5.4.1.6. Pectinas	23
5.4.1.7. Lípidos	23
5.4.1.8. Compuestos coloreados	24

5.5. Proceso de clarificación del jugo en las industrias azucareras	26
5.5.1. Antecedentes históricos	26
5.5.2. Propósitos de la clarificación del jugo	28
5.5.3. Efectos prácticos de la clarificación de jugo	29
5.6. Características generales del equipo de clarificación	30
5.6.1. Tanque amortiguador "Flash"	30
5.6.2. Clarificadores de jugo.....	32
5.6.2.1. Clarificador de bandejas múltiples.....	33
5.6.2.2. Clarificador rápido sin bandejas (CAV)	37
5.7. Descripción del proceso de clarificación de jugo.....	39
5.7.1. Etapas de la clarificación de jugo	41
5.8. Relación entre los coloides y la carga iónica del jugo mezclado.....	42
5.8.1. Características de los coloides del jugo mezclado	43
5.8.2. Desestabilización del sistema sólido-líquido	44
5.8.3. Relevancia de la desestabilización del sistema sólido-líquido en la clarificación del jugo	45
5.9. Aspectos fisico-químicos de la clarificación de jugo.....	46
5.10. Coagulación de las impurezas del jugo mezclado.....	46
5.10.1. Calentamiento del jugo diluido	48
5.10.1.1. Descripción del proceso de calentamiento de jugo.....	49
5.10.1.2. Efecto de la temperatura	50
5.10.2. Encalado o alcalinización del jugo diluido.....	50
5.10.2.1. Control de la cantidad de cal	51
5.10.3. Papel del fósforo en el proceso de encalado	53
5.10.4. Reacciones de la clarificación de jugo	55
5.10.5. Modificaciones de algunos de los no-azúcares orgánicos durante la clarificación de jugo	57
5.10.5.1. Azúcares reductores	57
5.10.5.2. Compuestos nitrogenados.....	57
5.10.5.3. Gomas	57
5.10.5.4. Pectinas	58
5.10.5.5. Ceras y grasas.....	58
5.11. Floculación de las impurezas del jugo encalado	58

5.11.1. Floculantes	59
5.11.1.1. Características de los floculantes aniónicos	61
5.11.1.2. Fisicoquímica de la formación de los flóculos	62
5.11.2. Preparación del floculante.....	64
5.11.2.1. Agua de preparación del floculante	65
5.11.2.1.1. Concentración iónica del agua.....	65
5.11.2.1.2. pH del agua.....	67
5.11.2.1.3 Temperatura del agua	67
5.11.2.2. Concentración de la solución floculante	68
5.11.2.3. Tiempo de maduración de la solución floculante.....	69
5.11.2.4. Dosificación de la solución floculante	71
5.11.2.5. Agitación en la preparación de la solución floculante.....	72
5.11.3. Preparación de floculante para la clarificación de jugo en Riopaila.....	72
6. METODOLOGÍA	83
6.1. Muestras de análisis y pruebas fisicoquímicas.....	83
6.1.1. Jugo diluido (JD)	83
6.1.1.1. Determinación Porcentaje Sólidos del Jugo Diluido (°BRIX)	85
6.1.1.2. Determinación de la Pol del Jugo Diluido (porcentaje aparente de sacarosa).....	86
6.1.1.3 Determinación de Color del Jugo Diluido (método fotométrico).....	87
6.1.1.4. Determinación de Turbiedad del Jugo Diluido (método fotométrico) ...	88
6.1.2. Jugo clarificado (JC)	89
6.1.2.1. Determinación Porcentaje Sólidos del Jugo Claro (°BRIX).....	89
6.1.2.2. Determinación de la Pol del Jugo claro (porcentaje aparente de sacarosa).....	90
6.1.2.3. Determinación de Color del Jugo Claro (método fotométrico)	91
6.1.2.4. Determinación de Turbiedad del Jugo Claro (método fotométrico).....	92
6.1.2.5. Determinación del Volumen de Compactación de los Lodos.....	93
6.1.3. Floculante	94
6.1.3.1. Determinación de la Metodología de Preparación de Floculante.....	95
6.1.3.1.1. Preparación de Floculante según Operarios	95
6.1.3.1.2. Preparación de Floculante según recomendaciones del Proveedor	96

6.1.3.2. Determinación de la Dosis Apropriada de Floculante	97
6.1.3.3. Determinación del pH Apropriado de Preparación de Floculante	98
6.1.3.4. Determinación de la Temperatura Apropriada de Preparación de Floculante	99
6.1.3.5. Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante en la calidad del mismo y en la clarificación de jugo	100
6.1.3.5.1. Preparación de Floculante empleando Agua Destilada	100
6.1.3.5.2. Preparación de Floculante empleando Agua del Proceso	101
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	102
7.1. Resultados de la Metodología de Preparación de Floculante según los Operarios y Proveedor.....	102
7.1.1. Análisis de los resultados de la Metodología de Preparación de Floculante.	104
7.2. Resultados de la Dosis Apropriada de Floculante	108
7.2.2. Análisis de los resultados de la Dosis Apropriada de Floculante	110
7.3. Resultados del pH Apropriado de Preparación de Floculante	114
7.3.3. Análisis de los resultados del pH Apropriado de Preparación de Floculante	116
7.4. Resultados de la Temperatura Apropriada de Preparación de Floculante	119
7.4.4. Análisis de los resultados de la Temperatura Apropriada de Preparación de Floculante	121
7.5 Resultados del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante en la calidad del mismo y en la clarificación de jugo.....	124
7.5.5. Análisis de los resultados del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante en la calidad del mismo y en la clarificación de jugo	126
8. CONCLUSIONES	130
9. RECOMENDACIONES	132
10. BIBLIOGRAFÍA	133
11. ANEXO A	137

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas de la clarificación de jugo de caña.....	1
Figura 2. Proceso agrícola para la fabricación del azúcar de Riopaila.....	6
Figura 3. Proceso de fabricación de azúcar en planta de Riopaila.....	8
Figura 4. Ilustración del corte de caña de azúcar.....	11
Figura 5. Bacteria <i>Leuconostoc mesenteroides</i> , presente en la caña de azúcar.....	11
Figura 6. Síntesis general de dextranas a partir de la sacarosa.....	12
Figura 7. Características de la calidad de la caña de azúcar.....	13
Figura 8. Carro cañero del Ingenio Riopaila.....	14
Figura 9. Maquinaria individual de cada molino.....	15
Figura 10. Proceso general de molienda de caña de azúcar.....	16
Figura 11. Tamices vibratorios de bagacillo.....	16
Figura 12. Estructura básica de los compuestos fenólicos.....	24
Figura 13. Posibles vías de la termólisis de la sacarosa y formación de melanoidinas durante el procesamiento de la caña de azúcar.....	25
Figura 14. Ubicación del tanque Flash en el Ingenio Riopaila.....	31
Figura 15. Estación de clarificación de jugo del Ingenio Riopaila.....	32
Figura 16. Clarificador RapiDorr.....	35
Figura 17. Vista seccional del clarificador RapiDorr con múltiples compartimientos.....	36
Figura 18. Clarificador Rápido SRI, diseño original.....	37
Figura 19. Vista seccional del clarificador Rapido SRI.....	38
Figura 20. Descripción general de la purificación química del jugo de caña.....	42
Figura 21. Partícula coloidal cargada electronegativamente.....	44
Figura 22. Proceso en fábrica de coagulación de las impurezas del jugo diluido.....	47
Figura 23. Calentadores de jugo horizontales del Ingenio Riopaila.....	49
Figura 24. Formación del precipitado de fosfato de calcio.....	53

Figura 25.	Ilustración del fenómeno de adsorción.....	59
Figura 26.	Estructura del polímero poliacrilamida y estructura del polímero poliacrilamida modificado para funcionar como floculante aniónico.....	61
Figura 27.	Monómeros del polímero poliacrilamida, empleados para sintetizar poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas (floculantes aniónicos).....	61
Figura 28.	Entrelazamiento de los coágulos de impureza con la cadena del floculante a través del puente iónico del calcio.....	63
Figura 29.	Representación de la apariencia de la solución floculante preparada.....	65
Figura 30.	Precipitado de hidróxidos metálicos, ocasionado por la adición de soda caustica a muestra de agua cargada iónicamente.....	66
Figura 31.	Comparación de la apariencia de la solución floculante respecto a su tiempo de maduración.....	70
Figura 32.	Diferencia entre un floculante preparado con agua limpia y uno preparado con agua sucia.....	74
Figura 33.	Equipo dispersor de floculante y flujo de agua de preparación.....	75
Figura 34.	Sistema de aireación de la solución floculante.....	76
Figura 35.	Recipiente medidor de floculante en polvo del Ingenio Riopaila.....	77
Figura 36.	Ilustración de la capacidad de los tanques al contener la solución floculante.....	77
Figura 37.	Diagrama de flujo básico para la preparación de floculante LIPESA 1521M.....	81
Figura 38.	Sistema de preparación de floculante para la clarificación de jugo en Riopaila Castilla, planta Riopaila.....	82
Figura 39.	Diagrama de flujo de la determinación del Porcentaje de Sólidos del Jugo Diluido.....	85
Figura 40.	Diagrama de flujo de la determinación de la Pol Jugo Diluido.....	86
Figura 41.	Diagrama de flujo de la determinación de Color del Jugo Diluido (método fotométrico).....	87
Figura 42.	Diagrama de flujo de la Determinación de Turbiedad del Jugo Diluido (método fotométrico).....	88
Figura 43.	Diagrama de flujo de la Determinación del Porcentaje de Sólidos del Jugo Claro.....	89
Figura 44.	Diagrama de flujo de la Determinación de la Pol Jugo Claro.....	90
Figura 45.	Diagrama de flujo de la Determinación de Color del Jugo Claro (método fotométrico).....	91

Figura 46.	Diagrama de flujo de la Determinación de Turbiedad del Jugo Claro (método fotométrico).....	92
Figura 47.	Diagrama de flujo de la Determinación del Volumen de Compactación de los Lodos.....	93
Figura 48.	Diagrama de flujo de la Preparación de Floculante según Metodología de Operarios.....	95
Figura 49.	Diagrama de flujo de la Preparación de Floculante según Metodología recomendada por Proveedor.....	96
Figura 50.	Diagrama de flujo de la Determinación de la Dosis Apropriada de Floculante.....	97
Figura 51.	Diagrama de flujo de la Determinación del pH Apropriado de Preparación de Floculante.....	98
Figura 52.	Diagrama de flujo de la Determinación de la Temperatura Apropriada de Preparación de Floculante.....	99
Figura 53.	Diagrama de flujo de la Preparación de Floculante empleando Agua Destilada.....	100
Figura 54.	Diagrama de flujo de la Preparación de Floculante empleando Agua del Proceso.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.	Porcentaje (en peso) de materiales extraños en la cosecha de caña. Ingenio Riopaila, 1988-1990.....	10
Tabla 2.	Características básicas del bagacillero.....	17
Tabla 3.	Promedio de la composición química de los tallos y de los jugos de la caña de azúcar.....	19
Tabla 4.	Composición de carbohidratos en el jugo de caña.....	20
Tabla 5.	Composición de minerales en el jugo diluido.....	20
Tabla 6.	Ácidos orgánicos no nitrogenados presentes en el jugo diluido.....	21
Tabla 7.	Aminoácidos presentes en el jugo diluido.....	22
Tabla 8.	Resumen de los avances de la clarificación de jugo entre los años 1900 y 1950.....	27
Tabla 9.	Representación esquemática del comportamiento de los no-azúcares removibles durante el proceso de clarificación de jugo.....	28
Tabla 10.	Ventajas y desventajas de la cantidad apropiada de fosfatos en el jugo.....	54
Tabla 11.	Descripción de las funciones de los accesorios necesarios para la preparación de floculante.....	73
Tabla 12.	Comparación entre el equipamiento ideal y el actual de preparación de floculante en el Ingenio Riopaila.....	78
Tabla 13.	Resultados del estudio comparativo sobre la metodología de preparación de floculante de dos operarios del Ingenio Riopaila.....	80
Tabla 14.	Variables controladas del jugo de caña en los análisis experimentales.....	84
Tabla 15.	Variables controladas en el procedimiento de preparación de floculante a escala.....	94
Tabla 16.	Variables del jugo diluido para el análisis de Metodología de Preparación de Floculante.....	102
Tabla 17.	Variables controladas durante la preparación del floculante LIPESA 1521 M para el análisis de Metodología de Preparación de Floculante.....	103
Tabla 18.	Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis de Metodología de Preparación de Floculante.....	103
Tabla 19.	Resultados del Volumen de Compactación de Lodos para el análisis de Metodología de Preparación de Floculante.....	104
Tabla 20.	Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades del jugo claro según la Metodología de Preparación de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.....	105
Tabla 21.	Promedio de volumen de compactación de lodos para el análisis de la Metodología de la Preparación de Floculante.....	106
Tabla 22.	Variables del jugo diluido para el análisis de Dosis Apropriada de Floculante.....	108
Tabla 23.	Variables controladas durante la preparación del floculante LIPESA 1521 M para el análisis de Dosis Apropriada de Floculante.....	108

Tabla 24.	Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis de Dosis Apropriada de Floculante.....	109
Tabla 25.	Resultados del volumen de compactación de lodos para el análisis de Dosis Apropriada de Floculante.....	109
Tabla 26.	Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades del jugo claro según la Dosis de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.....	111
Tabla 27.	Promedio de volumen de compactación de lodos para el análisis de la Dosis Apropriada de Floculante.....	113
Tabla 28.	VARIABLES del jugo diluido para el análisis de pH Apropriado de Preparación de Floculante.....	114
Tabla 29.	VARIABLES controladas durante la preparación de floculante LIPESA 1521 para el análisis de pH Apropriado de Preparación de Floculante.....	115
Tabla 30.	Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis de pH Apropriado de Preparación de Floculante.....	115
Tabla 31.	Resultados de volumen de compactación de lodos para el análisis de pH Apropriado de Preparación de Floculante.....	116
Tabla 32.	Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades del jugo claro según el pH de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.....	117
Tabla 33.	Promedio del volumen de compactación de lodos versus pH de Preparación de Floculante.....	118
Tabla 34.	VARIABLES del jugo diluido para el análisis de la Temperatura Apropriada de Preparación de Floculante.....	119
Tabla 35.	VARIABLES controladas durante la preparación de floculante LIPESA 1521 para el análisis de la Temperatura Apropriada de Preparación de Floculante.....	120
Tabla 36.	Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis de la Temperatura Apropriada de Preparación de Floculante.....	120
Tabla 37.	Resultados del volumen de compactación de lodos para el análisis de la Temperatura Apropriada de Preparación de Floculante.....	121
Tabla 38.	Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades del jugo claro según la Temperatura de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.....	121
Tabla 39.	Promedio del volumen de compactación de lodos versus Temperatura de Preparación de Floculante.....	123
Tabla 40.	VARIABLES del jugo diluido para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.....	124
Tabla 41.	VARIABLES controladas durante la preparación de floculante LIPESA 1521M para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.....	125
Tabla 42.	Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.....	125
Tabla 43.	Resultados del volumen de compactación de lodos para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.....	126
Tabla 44.	Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades del jugo claro según la Concentración Iónica de Preparación de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.....	127
Tabla 45.	Promedio del volumen de compactación de lodos para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.....	128

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Influencia del grado de hidrólisis del floculante en la velocidad de sedimentación del jugo claro y en su turbiedad.....	64
Gráfico 2. Turbiedad del jugo claro versus la Metodología de Preparación de Floculante.....	105
Gráfico 3. Promedio del volumen de compactación de lodos versus Metodología de Preparación de Floculante.....	107
Gráfico 4. Turbiedad del jugo claro versus Dosis de Floculante.....	112
Gráfico 5. Promedio del volumen de compactación de lodos versus Dosis de Floculante.....	113
Gráfico 6. Turbiedad del jugo claro versus pH de Preparación de Floculante.....	117
Gráfico 7. Promedio del volumen de compactación de lodos versus pH de Preparación de Floculante.....	118
Gráfico 8. Turbiedad del jugo claro versus Temperatura de Preparación de Floculante.....	122
Gráfico 9. Promedio del volumen de compactación de lodos versus Temperatura de Preparación de Floculante.....	123
Gráfico 10. Turbiedad del jugo claro versus Tipo de Agua de Preparación de Floculante.....	127
Gráfico 11. Promedio del volumen de compactación de lodos versus Tipo de Agua de Preparación de Floculante.....	129

GLOSARIO

ADSORCIÓN: Fenómeno en el cual se extrae materia de una fase para concentrarla sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). El adsorbato (sustancia que se concentra en otra fase) o impureza se mueve desde la fase líquida para acumularse en la fase sólida por la acción del adsorbente (sustancia que se encarga de hacer el trabajo de adsorción).

CAL: Sustancia química más empleada en los ingenios azucareros como coagulante de las impurezas. Según su presentación se le denomina cal viva, cal apagada o lechada de cal. Su función es alcalinizar el jugo, y coagular las impurezas del mismo mediante reacciones químicas con las sustancias contenidas en él. La forma química empleada en los ingenios es en Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2).

CLARIFICACIÓN DE JUGO: Proceso por el cual son eliminadas las impurezas (bien sean solubles, coloidales en suspensión o insolubles) susceptibles a coagulación y floculación por medios mecánicos y químicos, que implican el asentamiento y remoción por decantación de las mismas, para producir un jugo claro.

CLARIFICADORES DE JUGO: Tanques donde se lleva a cabo el proceso de clarificación del jugo de caña.

COAGULACIÓN: Proceso químico en el que se obtiene la neutralización de las cargas presentes en un material, permitiendo la aglomeración de las impurezas para conseguir una precipitación primaria.

COAGULANTES: Electrolitos químicos que ejecutan la coagulación de las impurezas. En las industrias azucareras, el metal catiónico que se emplea para coagular las impurezas del jugo es el calcio, el cual se encuentra asociado a la sustancia química denominada comúnmente lechada de cal (Hidróxido de Calcio Ca(OH)_2).

COÁGULO: Masa de impurezas aglomeradas a causa del proceso de coagulación.

COLOIDES: Partículas que tienen un tamaño inferior a $1 \mu\text{m}$ que están finamente divididas, son insolubles y están conformadas por derivados de la caña y del suelo.

COLOR: Valor obtenido a partir de la atenuación de una solución azucarada dada por un espectrofotómetro, multiplicado por un factor que depende del brix de la solución. El método se basa en la medición de la absorbancia de una

solución de una muestra previamente filtrada a través de una membrana especial, la cual se reporta en UNIDADES ICUMSA (UI).

DOSIFICACIÓN: Hace referencia a la cantidad de una sustancia que se debe aplicar a un proceso para garantizar la satisfacción mayoritaria o total sobre los resultados que se esperan obtener con la adición de dicha cantidad.

FLOCULACIÓN: Proceso químico que consiste en la agrupación de las partículas o impurezas coaguladas y desestabilizadas iónicamente para formar masas o flóculos de mayor tamaño y peso molecular para conseguir su separación por sedimentación.

FLOCULANTES: Sustancias poliméricas de elevado peso molecular cuyos componentes principales son las poliacrílamidas. Estimulan el proceso de floculación necesario para decantar y precipitar las impurezas del jugo encalado caliente y producir un jugo clarificado.

FLOCULANTES ANIÓNICOS: Sustancias floculantes que a lo largo de su estructura poseen cargas negativas debido a la modificación de varios radicales amida que son sustituidos parcialmente por radicales aniónicos, generalmente por enlaces $-COOH$ ó $-COONa$ de forma repetitiva hasta constituir el polímero deseado.

FLÓCULO: Masas de impurezas sedimentables como resultado del proceso de floculación.

GRADOS BRUX: Término designado para describir la cantidad de sólidos disueltos contenidos en una solución azucarada, libre de impurezas insolubles. El método de la determinación de los grados brux representa el porcentaje en masa de la sacarosa presente en una muestra.

IMPUREZAS: Todas las sustancias diferentes a la sacarosa presentes como sólidos solubles e insolubles dentro de un material determinado.

JUGO CLARO O CLARIFICADO: Jugo obtenido del proceso de clarificación, el cual contiene valores más bajos de turbiedad e impurezas.

JUGO DILUIDO: Solución obtenida de la mezcla del jugo de primera extracción de la caña y agua, la cual contiene niveles altos de impurezas y turbiedad.

JUGO ENCALADO: Jugo al cual se le adiciona un flujo continuo de lechada de cal para neutralizar la carga iónica con la que entra al proceso el jugo diluido. Es la materia prima para obtener el jugo claro.

LODOS: Sustancias removidas en el proceso de clarificación de jugo que son consideradas como impurezas. Se obtienen en la parte inferior de los clarificadores de jugo como resultado de su precipitación o decantación.

POL: Término abreviado de la palabra polarización. Es utilizado en los ingenios para establecer el porcentaje aparente de sacarosa de una muestra mediante la determinación de su polarización directa en un polarímetro (sacarímetro). El método se basa en la medición del cambio de la rotación óptica que depende principalmente, del contenido de sacarosa en una muestra azucarada.

SACAROSA: Carbohidrato de fórmula general $C_{12}H_{22}O_{11}$ y de fórmula química α -D-glocopiranosil- β -D-fructopiranosido. Es el disacárido más abundante formado por la unión de α -D-glucosa y una β -D-fructosa, a través de un enlace (1-2). Comercialmente se le conoce como azúcar y es obtenida a partir de la caña de azúcar o de remolacha.

TIEMPO DE MADURACIÓN DE UN FLOCULANTE: Tiempo que requiere el polímero en polvo después de adicionarse al agua, para homogeneizarse por completo y para que su estructura se extienda adecuadamente en el líquido y pueda ejercer la acción floculante. Una vez cumplido este tiempo, el floculante se dosifica al proceso.

TURBIEDAD: Es la medida relativa de la dispersión de la luz atribuible a partículas en suspensión determinada espectrofotométricamente. El método se basa en medir la dispersión de la luz producida por partículas de material no disuelto en una solución azucarada. Para ello se mide en el espectrofotómetro la absorbancia de la solución filtrada a través de una membrana especial a una longitud de onda determinada. La turbiedad se reporta en UNIDADES ICUMSA (UI).

RESUMEN

En el Ingenio Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila, se realizaron ensayos a escala de preparación del floculante LIPESA 1521 M, con la finalidad de determinar las condiciones fisicoquímicas de preparación con las que se obtuviera una mayor eficiencia en la clarificación de jugo de la fábrica. Inicialmente, mediante un análisis comparativo entre la metodología de preparación de floculante según el fabricante y los operarios, se estableció el método correcto de preparación. A partir de la información recopilada y a una misma concentración (0.1%), se preparó floculante modificando variables fisicoquímicas (como temperatura, pH, dosificación de floculante en polvo). Finalmente se documentaron las condiciones más apropiadas en las que se debe preparar el floculante LIPESA 1521M para la estación de clarificación de jugo del Ingenio.

Debido a que la forma directa de evaluar la eficiencia de un floculante sobre el proceso es a través de las propiedades del jugo claro, adicionalmente tras cada ensayo se realizaron clarificaciones de jugo a escala, empleando como agentes secundarios de sedimentación las soluciones preparadas de floculante.

Por lo tanto, los materiales en estudio fueron: las soluciones preparadas de floculante, jugo diluido y jugo claro obtenidas en la clarificación de jugo realizada experimentalmente.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de clarificación de jugo de Riopaila o de cualquier industria azucarera, consta de las etapas presentadas en la *Figura 1*.

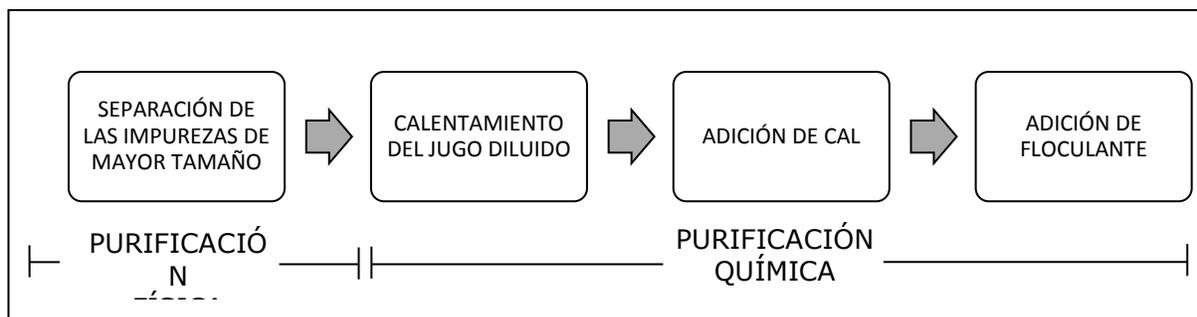


Figura 1. Etapas de la clarificación de jugo de caña.

Todas las sustancias contenidas en el tallo de la caña, diferentes a la sacarosa, son consideradas impurezas. La clarificación de jugo es el proceso inicial por el cual éstas son eliminadas (bien sean solubles, coloidales, en suspensión o insolubles) y que son susceptibles a coagulación y floculación por medios mecánicos y químicos, que implican el asentamiento y remoción por decantación de las mismas, para producir un jugo claro de buena calidad con la ayuda conjunta de la cal, el calor y la adición de floculante.

[1- 4]

Es importante destacar que la clarificación también podría tener lugar sin el uso de floculantes, sin embargo tardaría un tiempo mucho más prolongado y probablemente el jugo que se obtendría no sería de la misma calidad.

El uso de floculantes aniónicos en la industria azucarera comenzó a finales de la década de los 50's. Desde entonces, los estudios están encaminados a la resolución de problemas tecnológicos relacionados con la aceleración y aumento de eficacia del polímero en procesos de separación de sistemas sólido-líquido.

Dado a que en Riopaila se emplean floculantes sólidos, estos deben ser aplicados al proceso de clarificación en forma de disolución, la cual debe ser preparada bajo unas condiciones controladas para obtener los rendimientos admisibles, esperados por la industria y por el proveedor. [5 - 8]

Es precisamente esta operación de preparación de floculante LIPESA 1521M la que se analizó con la presente investigación, debido a que esta actividad es juzgada por los trabajadores de la fábrica teniendo como fundamento medidas

artesanales planteadas por su experiencia en el cargo. Además, cabe resaltar que la aplicación de este insumo varía en cada industria azucarera según sea la capacidad de su proceso.

Se realizaron 15 pruebas de jarras para obtener un total de 45 datos. Cada experimento se hizo por triplicado. Para ello, se desarrollaron cuatro experimentos claves y uno demostrativo. Además, tras cada ensayo se realizaron clarificaciones a escala con el objetivo de evaluar la eficiencia de los floculantes preparados mediante análisis al jugo diluido y al jugo claro obtenido.

Se sacaron conclusiones tras cada ensayo que fueron consideradas para realizar el siguiente experimento, de manera que el último se desarrolló con base en los resultados obtenidos de los otros tres ensayos.

Como primera actividad se comparó el método de preparación de floculante *in situ* realizado en la actualidad por los operarios de la fábrica con la forma indicada por el proveedor. Se seleccionó el que mostró mejores resultados.

En las siguientes actividades se preparó floculante a una misma concentración (0.1%) modificando variables fisicoquímicas como dosificación del polímero (valores de 2, 5 y 8 ppm), pH (valores de 8.7, 9.1 y 9.5) y temperatura (valores de 30, 45 y 55 °C).

Finalmente, para demostrar la influencia de la carga iónica del agua de preparación en la calidad del floculante, se realizó un experimento empleando agua destilada y agua del proceso.

Con los resultados, sus respectivos análisis y las conclusiones planteadas, se documentó un "MANUAL OPERACIONAL PARA LA PREPARACIÓN DEL FLOCULANTE LIPESA 1521M EN LA ESTACIÓN DE CLARIFICACIÓN DE JUGO DE RIOPAILA CASTILLA S.A, PLANTA RIOPAILA".

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para la clarificación de jugo en Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila, se emplean actualmente dos productos floculantes sintéticos aniónicos: PROFLOC 932 y LIPESA 1521 M.

Aunque Riopaila tiene consciencia del impacto que provoca la calidad de la solución floculante sobre el proceso de clarificación de jugo, no se ha concretado aún una metodología que evidencie valores numéricos de los factores fisicoquímicos requeridos en la preparación, debido a que ésta operación es juzgada según el criterio del trabajador, convirtiendo el tema de floculante en un método artesanal.

En vista de los antecedentes señalados, con el presente trabajo se pretende desarrollar un manual, mediante pruebas experimentales a escala, donde se establezcan las condiciones de preparación apropiadas de un floculante, según la capacidad de proceso característica de la fábrica, buscándose con ello mejorar el proceso de clarificación, evaluando el manejo de costos de producción respectivos.

El análisis se realizó con el floculante LIPESA 1521 M, fabricado por Limpiadores Industriales y Petroleros S.A (LIPESA).

3. JUSTIFICACIÓN

En las industrias azucareras la clarificación de jugo es el proceso inicial por el cual son eliminadas las impurezas susceptibles a coagulación y floculación, mediante su asentamiento y remoción por decantación, para producir un jugo con un pH adecuado, con valores bajos de turbiedad y contenido de iones Calcio disueltos.

La función de la coagulación es contrarrestar el efecto repulsivo entre partículas en suspensión con la misma carga electronegativa, facilitando la colisión y formación de masas (coágulos), obteniendo como resultado su precipitación primaria.

Sin embargo, para incrementar de manera relevante la eficiencia y la velocidad de la clarificación de jugo, se requiere de un proceso alterno denominado floculación. Éste consiste en la agrupación de las partículas coaguladas para formar masas o flóculos de mayor peso molecular que se pueden separar por métodos de decantación, con la acción de sustancias floculantes o coadyuvantes de floculación, los cuales son sustancias de elevado peso molecular (10×10^6 Kg/Kmol) cuyos componentes principales son las poliacrilamidas (PAM) y se encuentran en presentaciones líquidas o sólidas.

Riopaila utiliza floculantes sintéticos aniónicos sólidos que poseen gran afinidad con las superficies sólidas y deben ser aplicados al proceso de clarificación en forma de disolución. [1 - 6, 9 - 14]

Es importante resaltar que preparaciones adecuadas pueden reducir el consumo de polímero hasta en un cincuenta por ciento. Por ejemplo, en experimentos desarrollados en algunas fábricas azucareras, se han alcanzado reducciones entre un veinte a cuarenta por ciento. La variación se obtiene según las condiciones en cada central. [12]

Los factores que afectan la preparación de floculante, son el tipo de agua (concentración iónica, pH, temperatura), almacenamiento de la solución, al igual que su velocidad y tiempo de agitación, concentración y dosificación de la solución (proporcionales al flujo de jugo de cada industria), entre otros.

Hasta el momento, investigaciones realizadas han comprobado que no existe un polímero que se desempeñe igual en todas las industrias azucareras. Esto indica que cada fábrica deberá no solo hacer la selección del producto que aplicarán a su proceso sino también las condiciones en que debe prepararlo, acorde con su capacidad de producción. [1, 7, 10]

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar las condiciones apropiadas de preparación de floculante y establecer cómo influye su método de preparación en el proceso de clarificación de jugo de caña del Ingenio Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la relación entre los métodos actuales de preparación de floculante y los resultados obtenidos en la clarificación de jugo.
- Establecer ensayos a escala de preparación de floculante:
 - Según la metodología establecida por el proveedor,
 - Según la metodología de los operarios,
 - Modificando variables fisicoquímicas en la preparación del floculante;

Para analizar la influencia de la diversidad de metodologías de preparación en la clarificación de jugo.

- Establecer un manual de operación indicando la forma adecuada de preparar el floculante para los operarios de la estación de clarificación de jugo en la fábrica.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. PROCESO GENERAL DE FABRICACIÓN DE AZÚCAR EN RIOPAILA CASTILLA, PLANTA RIOPAILA.¹

El proceso en fábrica de la elaboración de azúcar comienza cuando la materia prima (caña de azúcar) ingresa al proceso de producción.

Una vez sembrada y cultivada, la caña de azúcar se alza y transporta al ingenio para comenzar el proceso productivo, como se ilustra en la *Figura 2*.



Figura 2. Proceso Agrícola para la fabricación del azúcar de Riopaila

El primer procedimiento que se realiza en la fábrica una vez ingresa la caña de azúcar es el pesaje en báscula de la misma, además se pesa la cantidad de azúcar que se despacha con el objetivo de tener indicadores de eficiencia en la producción.

El ingenio conserva los pesos de todos los carros cañeros vacíos. Cuando éstos ingresan a la fábrica con la carga pasan a través de una báscula, la cual pesa el conjunto de carro cañero y caña. Por diferencia de peso, se estiman las toneladas de caña que ingresan a la fábrica.

¹ Disponible en la web del Ingenio Riopaila Castilla S.A: http://www.riopaila-castilla.com/index.php?option=com_content&view=article&id=35&Itemid=40

Después, en la *Estación de Molinos* la caña se somete a un proceso de lavado para remover los materiales extraños de mayor tamaño (barro, piedras, entre otros).

En la mesa de caña, se alimenta y prepara la materia prima para la extracción de la sacarosa.

En la molienda, la caña lavada se muele obteniendo dos materiales:

- **Bagazo:** Se utiliza como combustible con el que se produce vapor de alta presión en la *Estación de Calderas*. En la *Planta Eléctrica* se genera electricidad a partir del vapor vivo recibido de las calderas. Se obtiene vapor de baja presión como escape, el cual se utiliza para la evaporación del jugo.
- **Jugo diluido:** Para la posterior elaboración del azúcar.

Posteriormente, el jugo diluido es calentado en los calentadores primarios y secundarios hasta una temperatura de 55°C. El jugo diluido se pesa para cuantificar cuánto volumen de jugo se extrajo de una cantidad dada de caña y se encala (adiciona cal) para aumentar su pH. Después, el jugo encalado pasa por otro calentamiento donde se aumenta su temperatura hasta 105°C para que pueda ser clarificado.

En la *Estación de Clarificación de Jugo*, se remueven las impurezas del jugo mediante fenómenos químicos (reacciones) y físicos (decantación), posibles gracias al encalado, el calentamiento y la adición de una sustancia química llamada floculante.

El jugo clarificado es transportado hacia la *Estación de Evaporación* donde se remueve el agua del jugo hasta obtener un fluido del orden de 65% de concentración de sólidos, conocido como meladura.

La meladura se trata de forma similar al jugo diluido (es clarificada mediante la adición de reactivos químicos y fenómenos físicos).

La meladura clarificada pasa por el proceso de cristalización, en el cual se emplean los tachos para obtener masas de diferentes características a partir de la adición de mieles y cristales de azúcar ya formados (para acelerar la cristalización):

- **Masa A:** Se elaboran masas cocidas (cristales y mieles) de primera a partir de meladura.

- **Masa B:** Se elaboran masas cocidas (cristales y mieles) de segunda a partir de miel A y semilla de C.
- **Masa C:** Se elaboran masas cocidas (cristales y mieles) de tercer a partir de miel B y cristales de sacarosa.

Con el proceso de centrifugado se separan los cristales de sacarosa formados y las mieles. Existen diversas centrifugas que se emplean según el tipo de masa:

- **Masa A:** Se separan los cristales de la masa primera (azúcar crudo y/o lavado) de su miel madre (miel A).
- **Masa B:** Se separan los cristales de la masa segunda (semilla B) de su miel madre (miel B).
- **Masa C:** Se separan los cristales de la masa tercera (semilla C) de su miel madre (miel C o miel final).

El azúcar que se extrae de las centrifugas se divide y destina para dos funciones:

- **Azúcar crudo:** El cual se almacena en tolvas para su posterior empaque y distribución como azúcar.
- **Azúcar para refinería y blanco:** El azúcar crudo pasa por procesos de refinado para obtener cristales de menor tamaño, o bien más blancos, los cuales también se almacenan en tolvas para su posterior empaque y distribución como azúcar refinado. (Ver Figura 3).

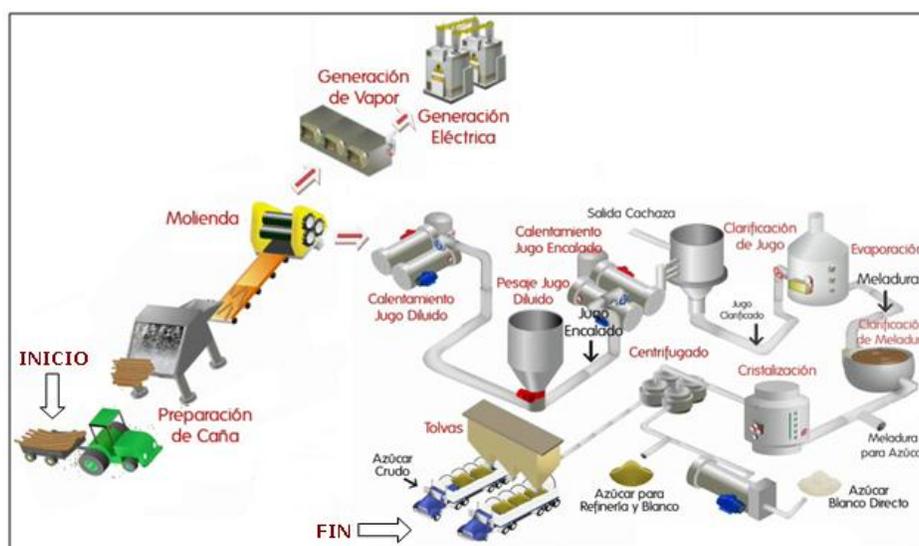


Figura 3. Proceso de fabricación de azúcar en planta de Riopaila.

5.2. CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR

La caña de azúcar, la composición química de su jugo y el azúcar que se produzca dependen de factores que van más allá del mismo proceso de extracción en fábrica y son aquellos inherentes a la planta, los cuales varían ampliamente. Estos son:

- Posición geográfica del cultivo.
- Variedad, edad y madurez de la caña.
- Práctica de cultivo.
- Temporada del año en la que se hace la recolección.
- Tratamiento mecánico durante el corte, transporte y molienda.

Otros factores que afectan la calidad de la caña son los ocasionados por la parte organizacional de cada fábrica después del corte. A continuación se citan algunos. [5, 15]

5.2.1. GRADO DE QUEMA Y TIEMPO ENTRE CORTE Y MOLIENDA

De forma instantánea, con el aumento del tiempo de permanencia de la caña en los patios del molino o en el campo, se obtienen mayores pérdidas de sacarosa. Acorde con investigaciones desarrolladas por el Doctor Larrahondo² en el año 1983, en el Valle Geográfico del Rio Cauca, se encontró que para que aumente el brix entre el 10% y el 16% en las primeras 48 horas era necesario realizar la quema e inmediatamente el corte. También se encontró que se obtiene una pérdida continua del 2.7% de sacarosa representadas en el brix y en la pol, cuando se quema el cultivo y se deja "en pie", a causa del deterioro y a la mayor dilución de los metabolitos para la absorción de agua, aumentando después de las 48 horas de la quema. [16]

² Larrahondo J. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Calidad de caña de azúcar p. 337-354.

5.2.2. CONTENIDO DE MATERIAL EXTRAÑO

Está representado por el suelo, hojas, cogollos y chulquines y afectan aspectos como la liquidación a los proveedores, el costo de cosecha y transporte, la eficiencia de la fábrica (pues se dificulta la recuperación del azúcar por incrementos en el bagazo, en la fibra o en la cachaza), el mantenimiento de los equipos, entre otros.

En el caso del ingenio Riopaila, las hojas y los cogollos son la materia extraña más frecuente (con 37.7% y 27.4% respectivamente). Con los estudios de laboratorio realizados entre los años 1988 y 1990 por CENICAÑA, se encontró que cada 1% de materia extraña, provocaba descensos en la eficiencia entre 0.13% y 0.17% en pol, 0.16% y 0.21% en el azúcar recuperable y aumentos entre el 0.2% y 0.3% en fibra. La *Tabla 1* ilustra lo señalado. [16]

Material	Valor mínimo (%)	Valor máximo (%)	Promedio (%)	Porcentaje relativo	Varianza
Hojas	0.39	15.47	2.820	37.70	3.580
Cogollos	0.32	12.68	2.050	27.40	1.650
Suelo-ceniza	0.0	7.86	1.720	23.00	0.390
Chulquines	0.0	4.45	0.420	5.60	0.540
Caña seca	0.0	5.46	0.420	5.60	0.790
Raíces y cepas	0.0	2.95	0.040	0.50	0.030
Malezas	0.0	0.22	0.006	0.08	0.002

Tabla 1. Porcentaje (en peso) de materiales extraños en la cosecha de caña. Ingenio Riopaila, 1988-1990. [16]

5.2.3. ALTURA DEL CORTE

Cuando no se realiza un corte adecuado, es posible que la cantidad de material extraño este representado por los cogollos de la caña. Este un hecho indeseable en cualquier industria azucarera, debido a que en los cogollos se encuentran entre cinco y ocho veces más compuestos precursores del color como los fenoles y amino-nitrógenos, que eventualmente ocasionarán que se

aumenten los niveles de color en los materiales del proceso de extracción y finalmente en el azúcar comercial. [15]



Figura 4. Ilustración del corte de caña de azúcar.

5.2.4. ACCIÓN DE MICROORGANISMOS

Se ha comprobado que los microorganismos atacan con mayor facilidad a la caña cuando se emplea corte mecánico para su extracción, sobre todo si las cuchillas no se encuentran alineadas o afiladas, porque tienen más puntos de contacto o "ataque".

Generalmente las bacterias *Leuconostoc mesenteroides* (Ver Figura 5) originan polisacáridos como las dextranas (constituidas por unidades de glucosa con enlaces 1-6) que emplean la sacarosa como materia prima, que aumentan las pérdidas de la misma en fábrica y la viscosidad de los jugos, generando problemas en la evaporación, elevando erróneamente el valor de la pol como consecuencia de su comportamiento dextrarrotatorio, provocan pérdidas de sacarosa en mieles y agua de lavado a causa de la elongación de los cristales de sacarosa denominados "cristal aguja".

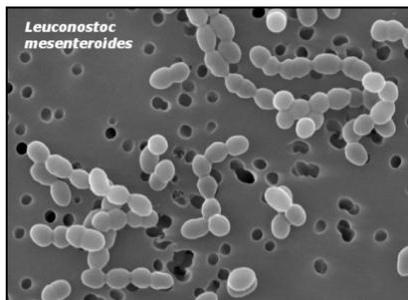


Figura 5. Bacteria *Leuconostoc mesenteroides* presente en la caña de azúcar.

La síntesis de las dextranas (Ver *Figura 6*) ocurre mediante la acción enzimática de la dextransucrasa. En cada molécula solo se emplea el monómero glucosa, por lo tanto la fructosa queda como subproducto, descomponiéndose posteriormente en ácidos orgánicos o en sustancias (como el ácido láctico, acético, butírico, el manitol y etanol) que pueden generar color y/o disminución del pH, generando pérdidas de sacarosa a causa de la inversión ácida.

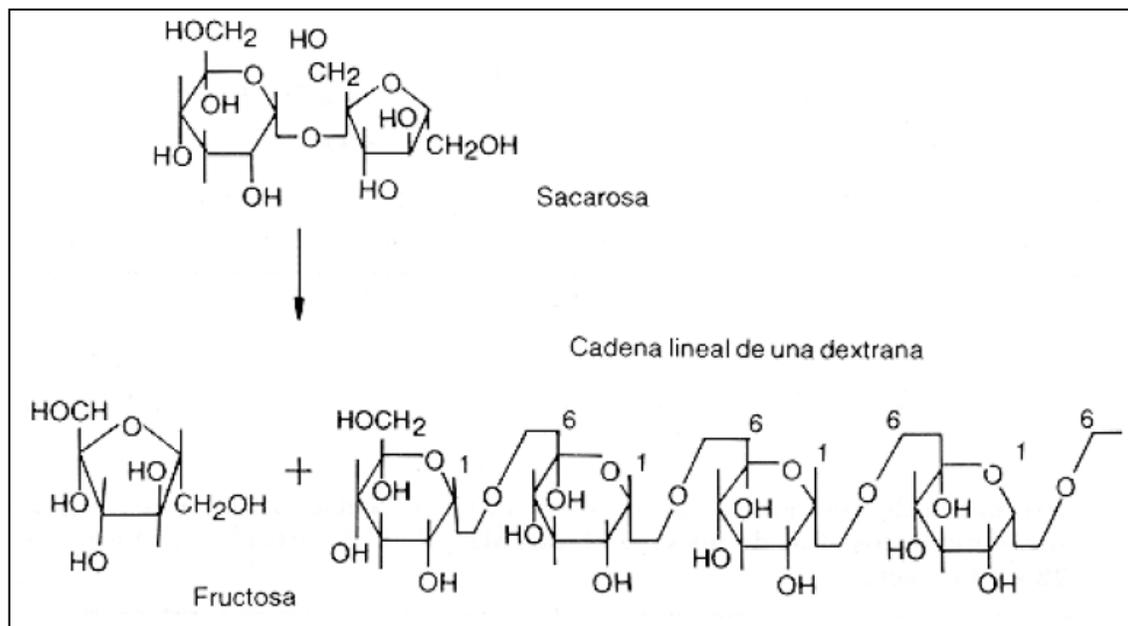


Figura 6. Síntesis general de dextranas a partir de la sacarosa. [16]

Por lo tanto, la calidad de la caña y por ende la del azúcar se evidenciará en parte dependiendo de los factores anteriores que se cumplan. La *Figura 7* muestra de forma resumida, las características que debe tener una caña de azúcar de buena calidad. [16]

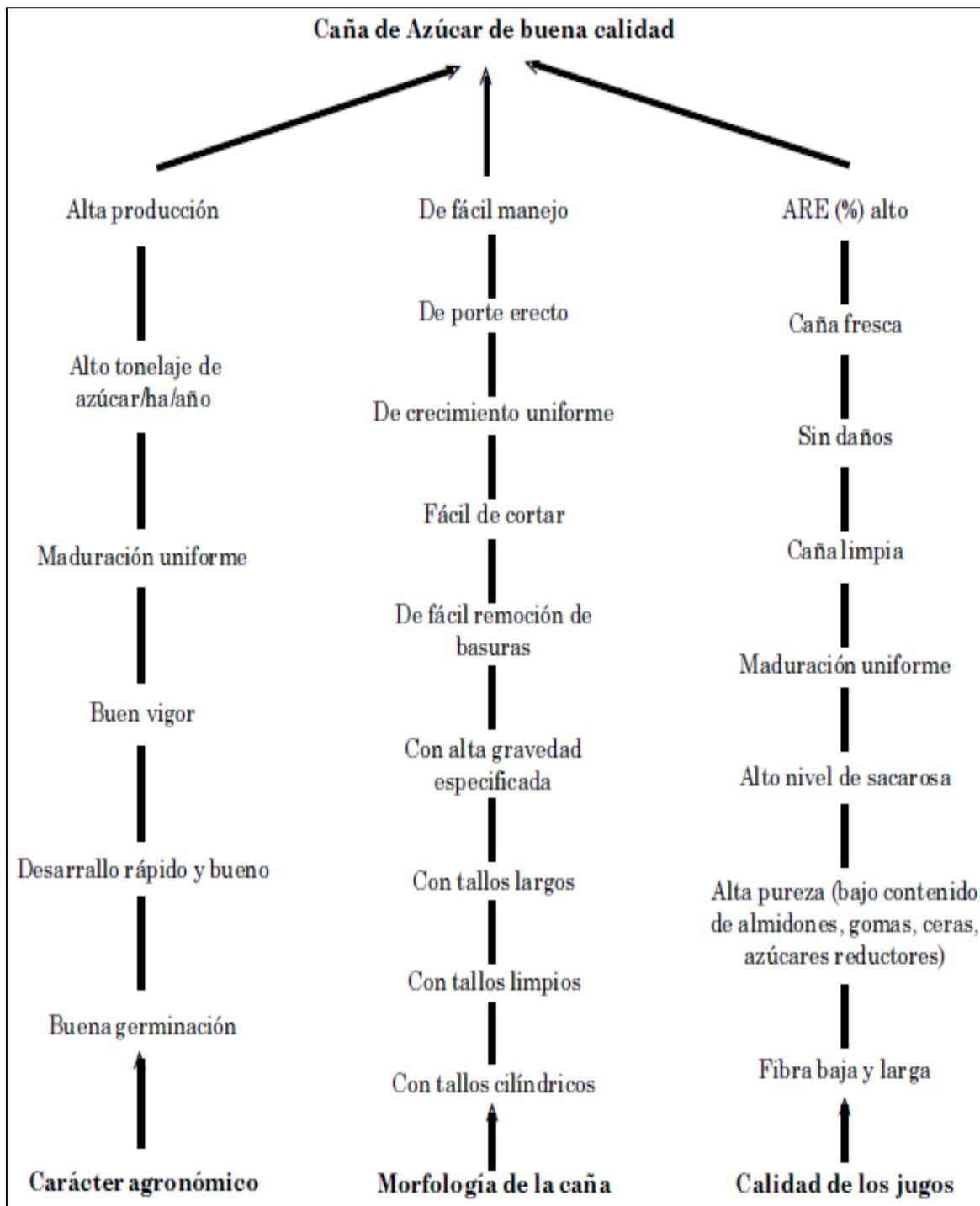


Figura 7. Características de calidad de la caña de azúcar. [16]

5.3. PURIFICACIÓN FÍSICA DEL JUGO DE CAÑA

5.3.1. PESAJE DE LA CAÑA

La caña que llega a los ingenios para el procesamiento se pesa en básculas de plataforma de diferentes tamaños o capacidades, dependiendo de la cantidad de caña que sea posible transportar en los camiones o trenes, denominados "carros cañeros" (*Figura 8*). El ingenio Riopaila dispone de tres básculas con capacidad para 100 toneladas.



Figura 8. Carro cañero del ingenio Riopaila.

El pesaje de la caña es una operación fundamental que los ingenios realizan con el propósito general de realizar un seguimiento en fábrica de la extracción del azúcar. Las siguientes son algunas actividades que le proporcionan a la fábrica un control matemático de la eficiencia de la producción a partir del pesaje de la caña:

- Estimación de la producción (TON CAÑA/AÑO).
- Capacidad de la fábrica (Kg CAÑA MOLIDA/HORA).
- Extracción del molino (Kg JUGO/Kg CAÑA).

- Rendimiento de la fábrica: Es el aspecto de mayor cuidado en los ingenios, porque se compara con la cantidad de azúcar obtenida a lo largo de todo el proceso de transformación, mediante la relación de kilogramos de azúcar por tonelada de caña (Kg azúcar/TON CAÑA-HORA). [5, 17]

5.3.2. EXTRACCIÓN FÍSICA DEL JUGO

Es la primera operación en fábrica, donde se emplea la molienda de la caña para la extracción y eliminación de las partículas de mayor tamaño presentes en el jugo.

La difusión (tecnología aplicada de la producción de remolacha) y la compresión son los dos métodos que se emplean para la extracción del jugo de caña. En Colombia, se emplea la compresión, cuyo principio básico es el de trituración.

La estación de molinos (Ver Figuras 9 y 10) consta de rodillos por los que pasa sucesivamente la caña exprimida (bagazo). Se aplican aspersiones de agua sobre el bagazo para ayudar a la extracción del jugo, según sea la cantidad de entrada.

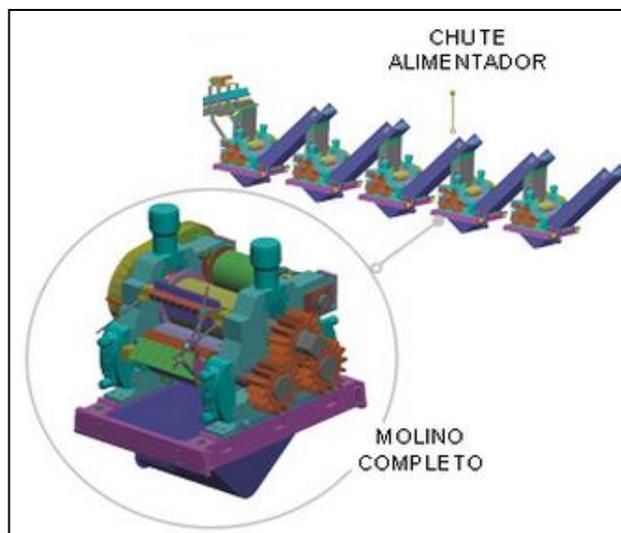


Figura 9. Maquinaria individual de cada molino.

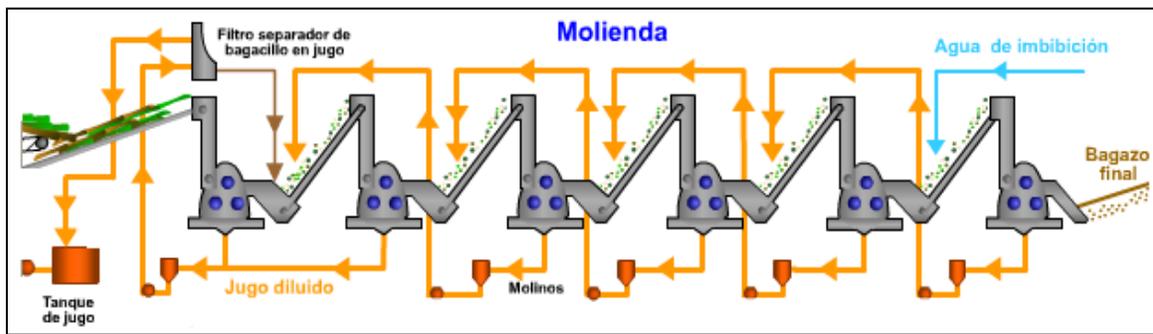


Figura 10. Proceso general de molienda de caña de azúcar. [18]

Una vez extraído el jugo, se filtra o tamiza. En el proceso de tamización se emplean tamices y coladores vibratorios (Ver *Figura 11*) de diferentes tamaños para ayudar a separar las partículas grandes y pequeñas (bagacillo, arena, arcilla y en general la materia extraña) que están en suspensión.



Figura 11. Tamices vibratorios de bagacillo.

La metodología consiste en hacer pasar el jugo por unas mallas fijas conocidas como *cush-cush*, aunque las más empleadas son las "DSM" (Dutch State Mines) construidas de barras transversales, que separan el material en suspensión del jugo que queda retenido en la criba y con ayuda de raspadores móviles los retornan al molino a través de conductores o transportadores. Las mallas poseen una inclinación de 45° y generalmente su capacidad aproximada es de 80 m³ de jugo/hora.

Las cantidades que se pueden separar varían de ingenio a ingenio, dependiendo de las características que tengan sus mallas. La *Tabla 2* muestra de forma general las características de una malla *cush -cush*.

CARACTERÍSTICAS DEL BAGACILLERO	
Material malla	Latón, cobre o inox
Diámetro	2,0 - 3,0 mm
Ancho	0,6 - 1,2 m
Perforaciones	0,5 - 2 mm
Área abierta	20 - 36%
Velocidad raspa	25 - 30 m/min
Superficie necesaria	0,05 - 0,1 m ² /TON CAÑA-HORA

Tabla 2. Características básicas del bagacillero. [5]

El tipo común de mallas DSM tienen de 260 a 400 aberturas por pulgada cuadrada, con diferentes formas de perforación (cuadrada, redondas, triangulares). Dichas aberturas son muy finas, por el orden de 0.1 mm lineal y con la ayuda de las vibraciones (600 vibraciones/min aproximadamente) se incrementa la capacidad de las mallas.

Aunque la separación física promueve la eliminación de impurezas, se considera a menudo como una técnica imperfecta, porque su trabajo es parcial. Se ha encontrado que puede pasar 1 g de material en suspensión por cada litro de jugo colado. Por esta razón, se requiere a través del proceso de elaboración del azúcar, realizar no solo clarificaciones de los materiales sino también más tamizaciones o filtraciones.

El jugo extraído y tamizado se denomina jugo diluido. [5]

5.4. JUGO DILUIDO

Generalmente, el jugo diluido es comprendido como una solución de agua, sacarosa y barro cuando en realidad se compone de sustancias orgánicas e inorgánicas que se encuentran en diversas proporciones y que son estas, junto con lo que es considerado barro (o materia extraña proveniente del suelo como hojas o tierra) las que se eliminan en los procesos de purificación como en la clarificación del jugo.

Entre las sustancias solubles se encuentran los carbohidratos, sales inorgánicas, no azúcares y las insolubles están representadas por la tierra, el bagazo, fibra, materia extraña, entre otras.

Básicamente, las impurezas se tratan en dos grupos:

- **Material grueso disperso:** Es el bagazo, tierra, ceras, entre otras. Este tipo de material se puede separar por medio de la filtración y la cantidad presente en el jugo varía según la calidad de la caña.
- **Coloides:** Son partículas finamente divididas, insolubles, conformadas por derivados de la caña y del suelo. Aunque este tipo de material se puede eliminar por medio de la molienda, una gran cantidad de materia coloidal pasa a los jugos, muchas veces por acción de los microorganismos o formación de sustancias a partir de las reacciones que tienen lugar en los procesos de purificación.

Los coloides, y más acertadamente las partículas con carga iónica, juegan un papel clave en la clarificación de jugo. Es gracias a este tipo de sustancias que suceden las reacciones químicas entre la cal y el jugo diluido y finalmente la formación de los flóculos por interacciones del floculante y las partículas coaguladas. Por este motivo, se profundizará más de este tema en el *numeral 5.8. (Relación entre los Coloides y la Carga Iónica del Jugo Mezclado)*.

Los sólidos solubles se cuantifican según el porcentaje de brix. La razón porcentual entre la sacarosa y el brix es conocido como *pureza del jugo*. El contenido aparente de sacarosa, expresado como un porcentaje en peso y determinado mediante un método polarimétrico, se denomina "pol". Los sólidos solubles diferentes de la sacarosa, que incluyen los azúcares reductores como la glucosa y otras sustancias se conocen como no-sacarosa y resultan de la diferencia porcentual entre el brix y la pol.

Si bien se ha mencionado que no es posible fijar condiciones de operación estándar para todas las industrias azucareras, se ha logrado mediante investigaciones, establecer cantidades aproximadas de las sustancias químicas y su composición en el jugo de caña.

La *Tabla 3* ilustra los resultados promedios obtenidos en la composición general de la caña de azúcar. [15, 16]

Constituyente químico	Porcentaje ^a
En los tallos:	
Agua	73 - 76
Sólidos	24 - 27
- sólidos solubles (brix)	10 - 16
- fibra (seca)	11 - 16
En el jugo:	
Azúcares	
- sacarosa	75 - 92
- glucosa	70 - 88
- fructosa	2 - 4
Sales	2 - 4
- inorgánicas	3.0 - 3.4
- orgánicas	1.5 - 4.5
Acidos orgánicos	1 - 3
Aminoácidos	1.5 - 5.5
Otros no azúcares	1.5 - 2.5
- proteína	0.5 - 0.6
- almidones	0.001 - 0.050
- gomas	0.3 - 0.6
- ceras, grasas, etc.	0.15 - 0.50
- compuestos fenólicos	0.10 - 0.80

Tabla 3. Promedio de la composición química de los tallos y de los jugos de la caña de azúcar. [16]

5.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS SUSTANCIAS PRESENTES EN EL JUGO DILUIDO

Cabe mencionar que todas las sustancias presentes en el jugo diferentes a la sacarosa se denominan en conjunto como no-azúcares y todas son consideradas impurezas durante el proceso de elaboración del azúcar. [5, 16]

5.4.1.1. CARBOHIDRATOS

Evidentemente, la que se encuentra en mayor proporción es la sacarosa, seguida de la fructosa y glucosa, aunque también pueden estar presentes oligosacáridos y polisacáridos según sea la edad de la caña y la descomposición originada por el apilamiento de la misma en los patios antes de la molienda. (Tabla 4).

CARBOHIDRATO		CONCENTRACIÓN
Monosacáridos (%)	Glucosa	0,26 - 0,33
	Fructosa	0,26 - 0,33
Disacáridos (%)	Sacarosa	9,6 - 10,9
Oligosacáridos (% BRIX)	1-Cestosa	0,26 - 0,33
	6-Cestosa	0,03 - 0,5
	neo-cestosa	0,01 - 0,4
Polisacáridos (% BRIX)	Almidón	0,3 - 1,3

Tabla 4. Composición de carbohidratos en el jugo de caña. [16]

5.4.1.2. SALES ORGÁNICAS

Se presentan como iones y sales solubles o insolubles, constituyentes de macromoléculas orgánicas (Ver *Tabla 5*).

CONSTITUYENTES		CONCENTRACIÓN (% BRIX)
Cationes	Potasio (K ₂ O)	0,77 - 1,31
	Sodio (Na ₂ O)	0,01 - 0,04
	Calcio (CaO)	0,24 - 0,48
	Magnesio (MgO)	0,1 - 0,39
	Hierro (Fe ₂ O ₃)	0,006 - 0,04
	Aluminio (Al ₂ O ₃)	0,0005 - 0,17
	Cobre (CuO)	0,002 - 0,003
	Zinc (ZnO)	0,003 - 0,012
	Manganeso (MnO)	0,007
	Cobalto (CoO)	0,00007
	Silicio (SiO ₂)	0,016 - 0,101
Aniones	Cloro (Cl)	0,16 - 0,27
	Fosfato (P₂O₅)	0,14 - 0,4
	Sulfato (como SO ₃)	0,17 - 0,52

Tabla 5. Composición de minerales en el jugo diluido. [5]

En algunos trabajos realizados se encontraron aumentos relevantes en la calidad del jugo claro tras la fertilización de suelos con fósforo, pues se considera por varios autores, que la cantidad de fosfatos en el jugo es importante durante el proceso de clarificación debido a que promueve una buena floculación después del enclamiento, sobre todo si se encuentran en

concentraciones entre 300 y 600 ppm. Este tema se considerará con mayor profundidad en el numeral 5.10.3. (*Papel del Fósforo en el Proceso de Encalado*).

El Potasio es indispensable en la planta para la asimilación del carbono y síntesis de proteínas. Déficits de éste reducen el porcentaje de sacarosa y aumentan los niveles de azúcares reductores produciendo altas cantidades de materiales coloreados a causa de su descomposición térmica, mientras que aplicaciones excesivas significan problemas en fábrica ya que el cloruro potásico cristaliza primero que la sacarosa, produciendo incrustaciones en los evaporadores.

Otros elementos minerales como el Sodio, Calcio y Magnesio comunes en suelos salinos, tienen un efecto melasigénico (producción de mieles) muy relevante, porque promueven la producción de mieles finales de alta pureza. [5, 16]

5.4.1.3. ÁCIDOS ORGÁNICOS

Se dividen en ácidos no nitrogenados (Ver *Tabla 6*) y aminoácidos o nitrogenados (Ver *Tabla 7*).

ÁCIDO		CONCENTRACIÓN (ppm/%BRIX)
Naturales	Oxálico	40 - 200
	Cítrico	900 - 1800
	Tartárico	10 - 180
	Málico	1200 - 1800
	Aconítico	5000 - 8000
	Succínico	100 - 200
	Glicólico	trazas - 150
Formados durante el proceso	Láctico	250 - 670
	Acético	200 - 300

Tabla 6. Ácidos orgánicos no nitrogenados presentes en el jugo diluido. [5]

COMPUESTO		LIBRE	% SÓLIDOS SECOS EN PROTEÍNA
Amidas	Asparagina	0,71	---
	Glutamina	0,19	---
Aminoácidos	Aspártico	0,11	0,06
	Glutámico	0,05	0,08
	Alanina	0,06	0,05
	Valina	0,03	0,04
	Aminobutírico	0,03	0,03
	Treonina	0,02	0,04
	Isoleucina	0,01	0,03
	Glicina	< 0,01	0,04
	otros	trazas	< 0,03

Tabla7. Aminoácidos presentes en el jugo diluido. [5]

Son los responsables del pH natural del jugo y de la capacidad de absorción de soluciones alcalinas como la cal a causa de la concentración del ácido aconítico. La acidez también es producida por los polietilenos que absorben oxígeno durante la clarificación de jugo, disminuyendo el pH del jugo claro.

5.4.1.4. PROTEÍNAS

Aunque se desconoce la composición completa de proteínas en el jugo diluido, se sabe que la albúmina ocupa el mayor porcentaje.

Debido a que las proteínas son anfóteras (con características ácidas y básicas), su comportamiento químico depende del pH del medio en que se encuentren. El punto isoeléctrico es aquel en el que las proteínas tienen un mínimo de hidratación y turgencia, es decir, en el que la solución coloidal tiene poca estabilidad y es posible su destrucción. En el caso de la albúmina, esto ocurre a un pH aproximado a 5.5 donde su precipitación es más evidente a causa de la desnaturalización que sufre (cambio molecular interno). [15]

5.4.1.5. GOMAS

Están compuestas fundamentalmente por pentosanas, polisacáridos que al hidrolizarse producen azúcares del grupo de la pentosa. Las pentosanas son sustancias coloidales hidrófilas que incrementan notoriamente la viscosidad de la meladura, debido a que no se eliminan completamente con el proceso de clarificación de jugo. En el jugo diluido, se encuentran pentosas como la arabana y la xilosa. [15]

5.4.1.6. PECTINAS

Son sustancias coloidales hidrofílicas que producen viscosidades elevadas en las soluciones (0.1% de solución de pectina tiene viscosidad igual a la de una solución de azúcar al 10%). Su estructura general es un ácido poligalacturónico que también contiene unidades de pentosa y pentosanas. Las pectinas son ópticamente activas y su contenido en el jugo no excede el 0.1%. Como se encuentran en los materiales de la pared celular, su cantidad depende del trabajo de extracción realizado en los molinos. Cabe resaltar que las pectinas también incrementan la solubilidad de la sacarosa, por ejemplo, por cada parte de pectina se retienen en solución entre 100 y 500 partes de sacarosa. [15]

5.4.1.7. LÍPIDOS

En el jugo diluido existen apreciables cantidades de lípidos conformados por las ceras, resinas y grasas en forma de partículas grandes o coloidales. Como tienen densidades bajas tienden a permanecer en la parte superior de los materiales en forma de nata. Según la Guía Tecnológica de Corpoica³ "El contenido de lípidos totales de la caña, en base seca, es de 0.69% en las hojas, 0.38% en los tallos, 0.54% en las raíces y 2.01% en las semillas". [15, 19]

³Guía Tecnológica para el Manejo Integral del Sistema Productivo de la Caña Panelera.

5.4.1.8. COMPUESTOS COLOREADOS

En Colombia existen dos fuentes elementales de color en la caña de azúcar: los que se originan en la planta y los que se forman durante su procesamiento. En el jugo diluido se encuentran principalmente compuestos polifenólicos, como los flavonoides, los cuales son los pigmentos naturales vegetales más relevantes de la caña de azúcar que tienen estructuras de $C_6C_3C_6$ con dos anillos aromáticos característicos de fenol (A y B) mostrados en la *Figura 12*.

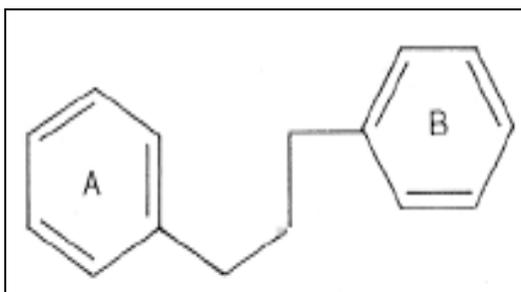


Figura 12. Estructura básica de los compuestos fenólicos. [16]

Los flavonoides tienen gran solubilidad en agua y se extraen de los tallos durante la molienda. Existen cinco clases (antocianinas, catequinas, chalcones, flavonoles, flavonas), de los cuales dos generan mayor impacto:

- **Antocianinas:** Constituidos por pigmentos catiónicos que generan color oscuro a pH bajos.
- **Flavonas:** Son derivadas del tricino, el luteolino y el apigenino. Son colorantes ligeramente ácidos y existen en forma no ionizada a pH bajos.

De forma general, los flavonoides aumentan rápidamente el color de los cristales de sacarosa cuando el pH de las soluciones oscila entre 7.0 y 9.0.

Como se mencionó antes, el color también puede ser generado por reacciones durante el procesamiento a causa de interacciones de los compuestos de la caña. Las más comunes son las que ocurren entre fenoles y sustancias nitrogenadas y/o la de los fenoles y el hierro.

Algunos fenoles son incoloros en la caña, pero al oxidarse o reaccionar con aminas producen sustancias coloreadas. También se produce color a causa de la descomposición térmica de la sacarosa y sus monosacáridos (glucosa y

fructosa) o por reacciones entre estos y sustancias amino-nitrogenadas que generan unos compuestos coloreados denominados melanoidinas. Estas reacciones se conocen como "Reacciones de Maillard" (Ver Figura 13).

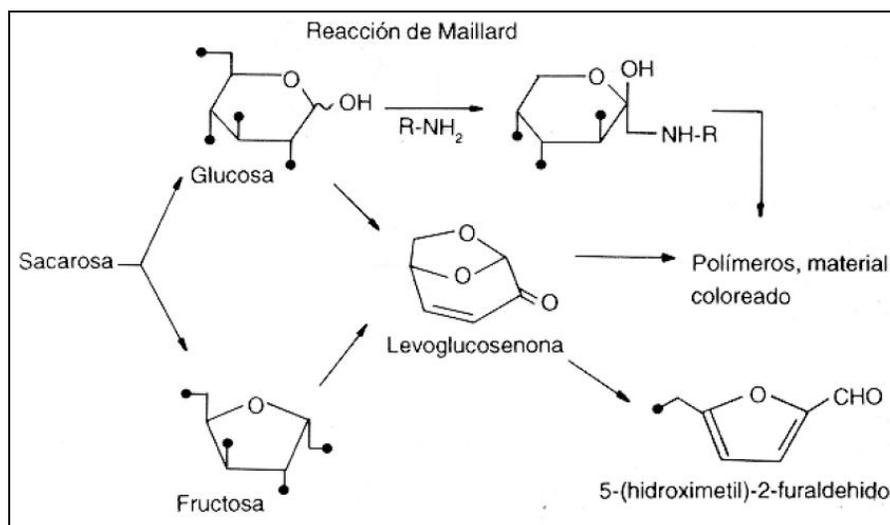


Figura 13. Posibles vías de la termólisis de la sacarosa y formación de melanoidinas durante el procesamiento de la caña de azúcar. [16]

Según el artículo Calidad de la Caña de Azúcar⁴ "Los niveles precursores de color (amino-nitrogenados y fenoles) o materiales pigmentados en los jugos, se relacionan con la variedad de la caña. Además que un déficit o estrés de humedad puede incrementar el contenido de cuerpos coloreados, especialmente de amino-nitrogenados". [16]

Se ha demostrado que con la existencia de hierro en el jugo diluido (proveniente de los molinos) se produce un color oscuro dos o tres veces más intenso en medios alcalinos como consecuencia de las interacciones de sus sales con los polifenoles (como la lacasa). Las sales ferrosas se oxidan a férricas por la acción enzimática y son estas las que producen el color durante la combinación.

Otras investigaciones han demostrado que después de la clarificación de jugo, el color tiende a aumentar cuando el contenido de calcio y nitrógeno es mayor. [15, 16, 19]

⁴Calidad de la Caña de Azúcar. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia p. 337-354

5.5. PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO EN LAS INDUSTRIAS AZUCARERAS

5.5.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Las evidencias parecen indicar que el hombre utilizó por primera vez el principio básico de clarificación en la época de las cavernas al dejar asentar el agua que utilizaría para sus distintas actividades. Él se dio cuenta que con este método obtenía dos productos: agua clara en la superficie, y barro o sólidos en el fondo del recipiente.

En el siglo XVI las operaciones de espesamiento y clarificación se volvieron relevantes para la explotación de minerales de cobre en las montañas. De esta forma los obreros obtenían alimentación y rebalses continuos, pero la descarga del lodo era discontinua y siguió siendo así hasta el siglo XIX cuando descubrieron métodos más eficientes para efectuar la clarificación.

Como se observa, los métodos usados en esta época eran simplemente una modificación ventajosa de los métodos usados por el hombre primitivo.

Históricamente, lo que se pretende con el desarrollo de las nuevas tecnologías es aumentar la eficiencia de la clarificación de jugo mediante el mejoramiento de los métodos de control, para disminuir el trabajo y la vigilancia que debe hacer el personal y producir azúcar de mayor calidad sin la necesidad de realizar grandes inversiones.

La clarificación de jugo de caña comenzó a tener auge aproximadamente en el año 1900. A partir de este año se han hecho modificaciones significativas para fabricar azúcar. La *Tabla 8* muestra los avances que tuvieron lugar entre los años 1900 y 1950 con la clarificación de jugo.

Gracias al progreso alcanzado en los últimos años, al comienzo del siglo actual el sistema de clarificación comprendía: alcalización intermitente; uso de filtros de marco y placa, y doble sedimentación en tanques de sedimentación discontinuos. [6, 15]

	AÑO 1900	AÑO 1950
JUGO MEZCLADO	Cribado. Grandes rastrillos coladores de jugo.	Transitoriamente tamices vibratorios y diferentes tipos de coladores finos. Son dudosos los resultados técnicos y la calidad del jugo.
CAL Y ALCALINIZACIÓN	Control de la cal cualitativamente superficial. Cal apagada en agua caliente, en equipo estacionario.	Cal apagada con agua caliente en aparato rotatorio continuo; cribado fino de la lechada de cal. A veces se calcina la piedra caliza en el mismo ingenio.
CALENTAMIENTO DEL JUGO	Calentamiento directo del jugo por medio de serpentines de vapor abiertos y con vapor directo. Precalentadores verticales.	Precalentadores horizontales; baja presión del vapor proveniente del primer vaso; circulación múltiple.
TANQUES DE OPERACIÓN RÁPIDA	Separación del aire y eliminadores con derrame para separar las espumas; vapor vivo añadido al tanque para hervir el jugo antes de enviarlo a los tanques de asentamiento.	Tanques de operación rápida para separar el aire; no hay calentamientos extras en estos tanques.
ASENTAMIENTO	Proceso discontinuo; tanques de asentamiento intermitentes; gran número de tanques de asentamiento de capacidad limitada.	Del sistema continuo se debe distinguir: 1, Separación de espumas en el compartimiento superior. 2, Conducto central de distribución de los jugos entre los diferentes compartimientos donde se efectuará la sedimentación. 3, Separación del jugo claro y del sedimento en los compartimientos del clarificador. 4, Compartimiento inferior donde se acumulan los lodos de los compartimientos del clarificador y del segundo asentamiento; eliminación de lodos concentrados.
SEGUNDO ASENTAMIENTO	Lodos del primer asentamiento recalentados y alcalizados. Jugo clarificado mezclado con el jugo del primer tanque de asentamiento.	
TRATAMIENTO DE LODOS	En el tanque de tratamiento de lodos los jugos eran calentados hasta ebullición, y la separación se efectuaba por medio de una buena filtración.	Los lodos del clarificador continuo se mezclan con bagacillo para ayudar al proceso de filtración.
TRATAMIENTO EXTRA DE LODOS	Por encalado y sulfitación.	Los lodos que son usualmente calentados de nuevo, se filtran utilizando filtros rotatorios; excepcionalmente se sujetan a la alcalización.
SEPARACIÓN DE BAGACILLO	No había separación y preparación de bagacillo.	El bagazo del molino se criba para separar el bagacillo que se añadirá a la cachaza. No se da un tratamiento especial a este bagazo fino.
FILTRACIÓN	Al iniciar el siglo se utilizaron los filtros Taylor. Este sistema fue reemplazado por filtros a presión, de marco y placa. Debía inyectarse vapor para poder obtener una torta seca fácilmente removible. Generalmente con pérdidas altas de azúcar. Se necesitaban muchos obreros.	Filtros rotatorios como los Oliver. Ahorro de trabajo. Inconvenientes: el filtrado contiene altos porcentajes de sólidos solubles, por lo que no puede ser mezclado con el jugo clarificado, teniendo que devolverse al tanque de encalado o a los molinos.
TRAMIENTO DEL FILTRADO	El filtrado podía ser mezclado con el jugo clarificado de los tanques de asentamiento. Se incrementaban las incrustaciones de los evaporadores.	Se ha sugerido separar el sedimento del filtrado después de la adición de fósforo o cal
TRATAMIENTO DEL JUGO CLARIFICADO	Colado para separar la materia gruesa en suspensión	El colado se efectúa por medio de pequeños coladores o de tamices vibratorios
MÉTODO DE CONTROL	La adición de la cal se comprueba por medio de olfato o usando papel tornasol	Introducción de indicadores de pH, instrumentos electrónicos y alcalización automática.

Tabla 8. Resumen de los avances de la clarificación de jugo entre los años 1900 y 1950. [15]

5.5.2. PROPÓSITOS DE LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO

De forma general, la clarificación de jugo pretende proporcionar condiciones de temperatura, pH y concentración iónica adecuadas para maximizar la precipitación de las impurezas solubles, insolubles o coloidales, además de producir un jugo claro de alta calidad (valores mínimos turbiedad).

En la *Tabla 9* se observan los efectos producidos sobre algunas impurezas que se eliminan durante el proceso de clarificación de jugo.

TIPO DE NO-AZÚCARES PRESENTES EN EL JUGO DE LOS MOLINOS	EFFECTO DEL COLADO	EFFECTO DEL CALENTAMIENTO	A UN pH DE 6,8 - 7,2 EN EL JUGO CLARO	A UN pH 7,6 - 7,8 EN EL JUGO CLARO	A UN pH > 8 EN JC
Bagacillo	Removible en alto grado	Ninguno, excepto que se elimina el aire, lo que previene el asentamiento del bagacillo	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Arena	Removible	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Arcilla	Parcialmente removible	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Algunas veces se peptiza
Ceras	Parcialmente removible adherida al bagacillo	Puede emulsionarse	Son adsorbidos con los azúcares precipitados	Idem como a un pH 6,8 - 7,2	Idem como a un pH 6,8 - 7,8
Fosfátidos	Se remueve una pequeña cantidad	Puede emulsionarse		Idem como a un pH 6,8 - 7,2	Puede emulsionarse parcialmente
No-azúcares proteínicos	Se remueve una pequeña cantidad	Coagulan y se vuelven separables	Se precipitan y se separan con los no-azúcares inorgánicos precipitados.	Idem, puede haber una ligera peptización	Pueden hidrolizarse parcialmente y redisolverse
Pentosanas	Ninguno	Se coagulan parcialmente		Se coagulan parcialmente y se separan	Se coagulan parcialmente y se separan
CaO	Ninguno	Ninguno	Se incrementa por la lechada de cal, combinada con ácidos orgánicos del jugo	Se incrementa	Se incrementa en alto grado por la formación de productos orgánicos de descomposición
MgO	Ninguno	Ninguno	Se precipita parcialmente con P ₂ O ₅	Idem como a un pH 6,8 - 7,2	Se precipita parcialmente como Mg(OH) ₂
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	Ninguno	Se precipita parcialmente con SiO ₃	Se precipita parcialmente	Se precipita	Precipita como Fe(OH) ₃ y Al(OH) ₃ y ferrato de calcio
P ₂ O ₅	Ninguno	Ninguno	Precipita parcialmente como fosfato de calcio y magnesio	Prácticamente como fosfato inorgánico de calcio	Precipita como fosfato de calcio
SiO ₂	Ninguno	Precipita parcialmente en combinación con los sesquióxidos	Es absorbido por el fosfato de calcio y magnesio y por los sesquióxidos	Idem como a un pH 6,8 - 7,2 en un alto grado	Precipita siendo absorbido por otros precipitados

Tabla 9. Representación esquemática del comportamiento de los no-azúcares removibles durante el proceso de clarificación de jugo. [15]

5.5.3. EFECTOS PRÁCTICOS DE LA CLARIFICACIÓN DE JUGO

Desde un punto de vista práctico, con la clarificación de jugo se pretende principalmente:

- Obtener un pH de jugo claro adecuado para evitar inversión de la sacarosa o descomposición de las sustancias que puedan producir color.
- Formar flóculos que atrapen la materia suspendida, para que pueda ser precipitada en un rango satisfactorio.
- Lograr precipitaciones y coagulaciones tan completas como sean posibles.
- Que la velocidad de asentamiento sea rápida para minimizar tiempos de residencia en los clarificadores o pérdidas de sacarosa por inversión u otros mecanismos y obtener lodos lo más compactos posibles.

A pesar de que la clarificación de jugo es una operación unitaria, sus resultados afectarán el resto del proceso de producción de azúcar y finalmente su calidad como producto comercial.

Por tal motivo, se debe tener especial cuidado en la estación de clarificación, pues por su buen desempeño tienen lugar las siguientes actividades de las etapas posteriores de la fábrica:

- Calidad de los productos.
- Rendimiento del azúcar.
- Velocidad de filtración.
- Facilita la cristalización de la sacarosa en la refinería.
- Reduce pérdidas de azúcar en los procesos subsecuentes.
- Reduce inscrustaciones en los evaporadores y tachos.
- Reduce alto contenido de cenizas.
- Reduce costos adicionales en insumos químicos para la extracción del azúcar. [4, 5, 20, 21]

5.6. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EQUIPO DE CLARIFICACIÓN

5.6.1. TANQUE AMORTIGUADOR "FLASH"

El tanque flash es un tanque que se sitúa justo antes de la entrada de jugo mezclado al clarificador (*Figura 14*). En este tanque, se mezcla el floculante y el jugo, de manera que el jugo que entra al clarificador se denomina jugo floculado y se encuentra listo para proceder a la sedimentación de los lodos.

Partiendo de esto, se reconoce entonces que en los clarificadores, simplemente se lleva a cabo el proceso de sedimentación de las impurezas para su remoción y producción de jugo claro.

El tanque flash tiene tres funciones fundamentales:

- Reducir la velocidad lineal con la que viene el jugo después de los procedimientos anteriores de calentamiento, encalado y segundo calentamiento.
- Permitir que la temperatura del jugo al entrar al clarificador sea constante.
- Arrastrar las burbujas de aire ocluido por medio de la emisión de vapor. Es importante eliminar las burbujas ocluidas debido a que muchas veces, este procedimiento evita que los flóculos se asienten a una velocidad adecuada. En los casos más extremos, hace que el clarificador se revuelque, es decir, que no se sedimenten los lodos sino que queden en suspensión, haciendo que la calidad del jugo claro disminuya notablemente al arrastrar consigo las impurezas.

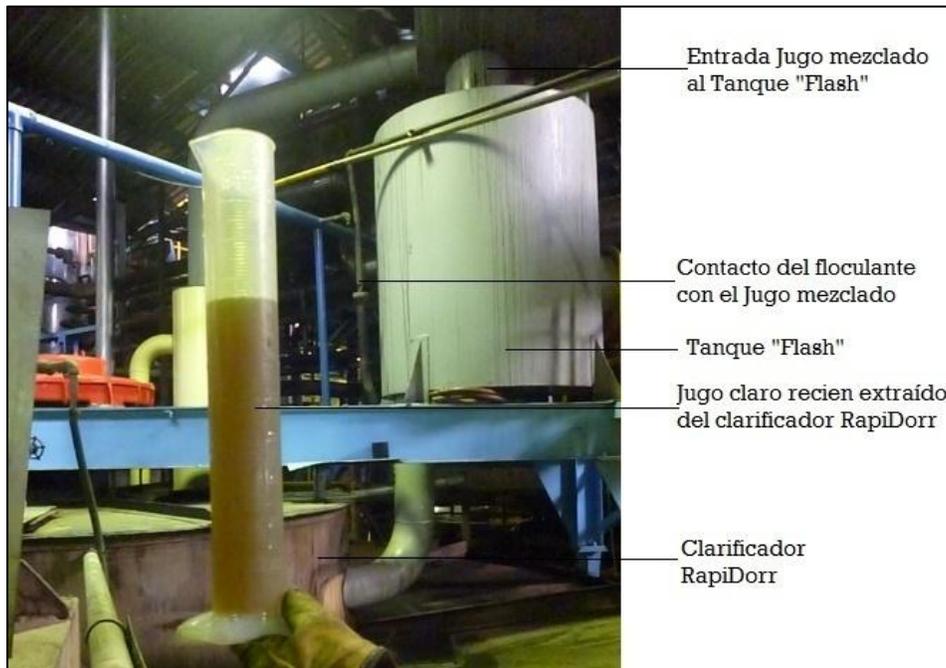


Figura 14. Ubicación del tanque Flash en el Ingenio Riopaila.

Los aspectos más importantes del diseño de un Tanque Flash son los siguientes:

- Asegurar el equilibrio entre la temperatura de entrada del jugo al clarificador y reducir su velocidad lineal de entrada.
- Que tenga una ventilación adecuada para asegurar que el tanque se encuentre siempre a presión atmosférica, para que los vapores acumulados se evacuen rápidamente.
- Debe evitarse la reentrada de aire.
- Que posea una tubería de reflujó hacia el tanque de encalado que sirva para devolver el jugo en el caso de que haya alguna obstrucción en la descarga hacia el clarificador.
- Que el jugo salga del tanque hacia el clarificador con una velocidad menor y constante para evitar que se revuelque. [22]

5.6.2. CLARIFICADORES DE JUGO

Los clarificadores de jugo son tanques donde se ejecuta como tal la clarificación de jugo (Ver *Figura 15*).

La disminución del tiempo y capacidad originadas en el llenado y vaciado de los tanques, la disminución de la mano de obra para la vigilancia y la ejecución de las operaciones de llenado, vaciado y separación de los lodos son algunas de las ventajas que trae consigo la nueva tecnología de los equipos de clarificación.



Figura 15. Estación de clarificación de jugo del Ingenio Riopaila.

El jugo mezclado que entra al clarificador se divide en dos grandes flujos:

- **Jugo clarificado:** El cual debe cumplir con ciertos parámetros fisicoquímicos para considerarse de buena calidad. El jugo que sale de cada clarificador se hace pasar por unas mallas DSM con el objeto de remover las partículas que pudieran quedar en suspensión. Posterior a este, los jugos provenientes de todos los clarificadores se mandan hacia

un mismo tanque “tanque de jugo clarificado” y el flujo de este es el que entra al proceso de evaporización del jugo.

- **Lodos:** Los lodos depositados en la parte inferior de cada compartimiento del clarificador son extraídos por medio de bombas de diafragma cuya acción fundamental consiste en transportarlos hacia la estación de filtración de cachaza de la fábrica. En esta estación se combinan los lodos obtenidos con floculante y cal para producir una masa gruesa que tenga propiedades filtrables. Los lodos se filtran con el objetivo de disminuir las pérdidas de sacarosa. Como los lodos tienen gran porcentaje de azúcar, se filtran después de salir del clarificador para producir dos productos: cachaza (la cual es una masa seca que se envía para compostaje en el campo y que contiene poca cantidad de sacarosa o pol) y jugo filtrado que contiene la sacarosa recuperada y por ello se retorna al proceso justo antes de que el jugo sea encalado. Como se observa, son procesos cíclicos y de aquí radica la importancia de una buena clarificación para que se produzcan lodos filtrables (compactos).

Existen varios tipos de clarificadores acorde con los resultados que los ingenios quieren obtener. Periódicamente aparecen nuevos diseños de clarificadores, lo que hace que existan muchos modelos de estos tanques.

De forma elemental, existen dos tipos de clarificadores:

- Clarificadores sin bandejas.
- Clarificadores con bandejas.

Se describirá de forma breve solamente los clarificadores de jugo que se emplean actualmente en el ingenio Riopaila: Clarificador de bandejas múltiples (RapiDorr), y clarificador rápido sin bandejas (SRI). [17, 22]

5.6.2.1. CLARIFICADOR DE BANDEJAS MÚLTIPLES

Son también conocidos como clarificadores Dorr, RapiDorr, ATV, entre otros.

Antes del uso de los floculantes para la clarificación de jugo, este tipo de clarificadores eran los más empleados. De hecho, los ingenios prefieren este diseño en vez de unos más modernos por los excelentes resultados que se obtienen del jugo claro.

Los clarificadores empleados en el ingenio Riopaila, son los RapiDorr con bandejas múltiples, los cuales están divididos en cuatro compartimientos o bandejas de sedimentación de bajo fondo que incrementan la rata de sedimentación.

El ingeniero Carlos Morales⁵ describe el funcionamiento de este tipo de clarificadores como se cita a continuación:

“El clarificador RapiDorr (Ver *Figuras 16 y 17*) fue introducido en el año 1955. Este tiene un eje central que gira muy lentamente (12 revoluciones por minuto) y que lleva láminas raspadoras que barren lentamente el fondo de los compartimientos. El jugo por decantar llega tangencialmente a la parte superior de un compartimiento llamado de “floculación” o tanque flash. En éste lugar sobrenada un poco de espuma que se elimina por medio de un raspador especial que la empuja hacia un pequeño canal lateral de evacuación.

Los compartimientos se comunican entre sí. En cada uno, los lodos que se depositan, se empujan lentamente hacia el centro en donde caen, por un orificio anular, al fondo del aparato descendiendo a lo largo y al exterior del tubo central. El tubo central comunica a las partes superiores de los diversos compartimientos. El jugo por decantar pasa del tubo central a los compartimientos por medio de ductos que atraviesan el espacio anular por el que descienden los lodos.

El jugo claro decantado sale de cada compartimiento por varios tubos conectados con la zona más clara de él, es decir, con la circunferencia situada en la parte superior de cada compartimiento, cerca de la parte exterior del clarificador. Estos tubos descargan el jugo en una caja en la que su gasto se ajusta con la ayuda de un tubo que corre sobre la extremidad de la tubería, fijando el nivel de derrame, que es evidentemente, con diferencia de pocos milímetros, el nivel del jugo del tanque.

Los lodos se toman de la parte inferior y por ser tan espesos, se emplean preferiblemente bombas de diafragma, de válvulas y membranas, de carrera muy pequeña y ajustable, que las hace subir a una caja de lodos opuesta a la caja de jugo, de donde pasan a la estación de filtración de cachaza.

El clarificador es cerrado, con un visor sobre el tanque flash. Debe aislarse completamente por medio de placas gruesas de calcita aglomerada.

Gracias a esta protección y sobre todo a sus dimensiones que le dan una relación superficie exterior a capacidad, muy pequeña, el jugo claro sale a unos 100°C hacia la estación de evaporación.

⁵En su tesis de grado: Análisis del porcentaje de remoción de turbidez como un Indicador de la eficiencia de los clarificadores de jugo tipo DORR de Ingenio San Carlos.

El tiempo de residencia del jugo en estos clarificadores es de aproximadamente tres horas.” [17, 22]

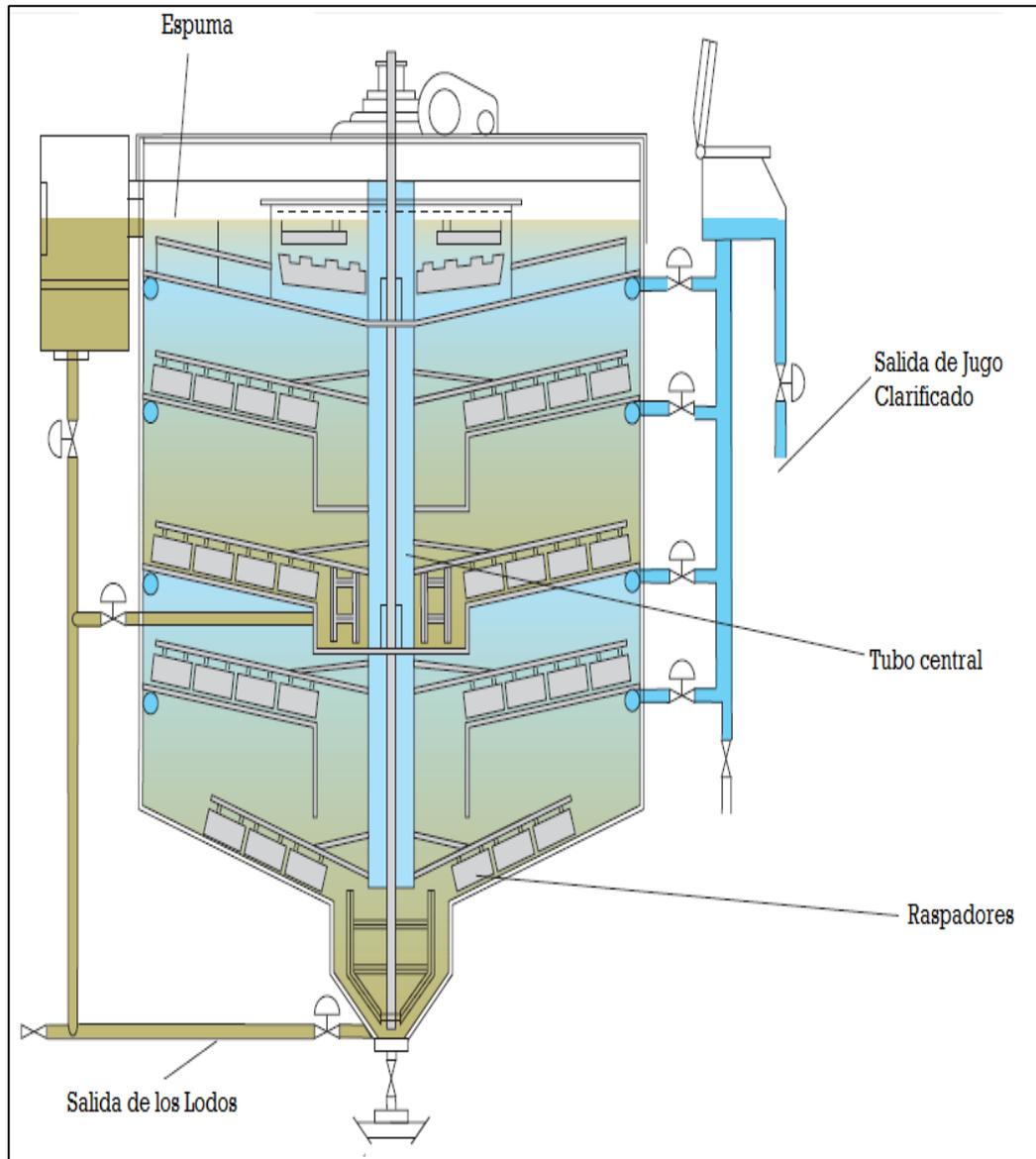


Figura 16. Clarificador RapiDorr. [10]

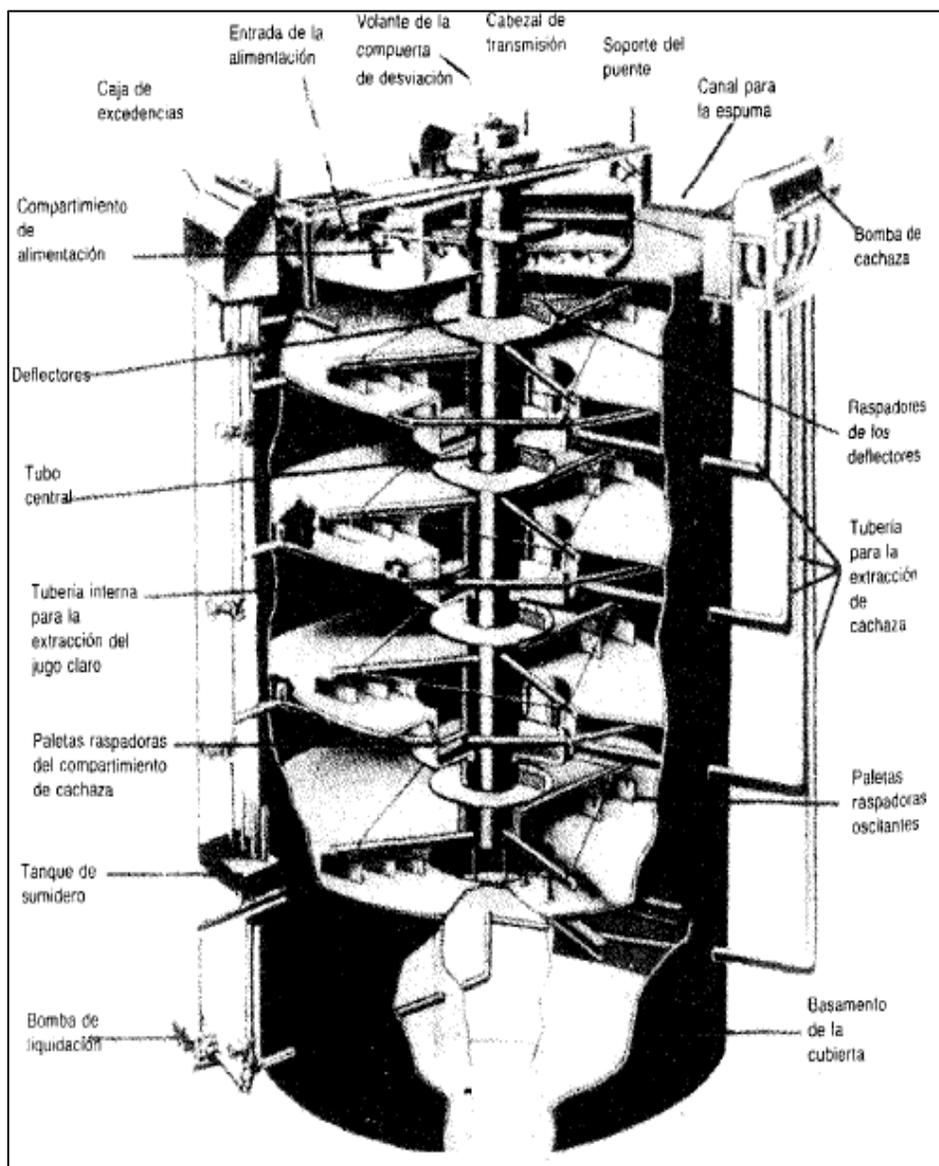


Figura 17. Vista seccional del Clarificador RapiDorr con múltiples compartimentos. [17]

5.6.2.2. CLARIFICADOR RÁPIDO SIN BANDEJAS (CAV)

Este clarificador fue desarrollado por el Sugar Research Institute de McKay, Australia en 1988, por tal motivo se distingue con el nombre de Clarificador SRI (Ver Figuras 18 y 19) y se reconoce actualmente como el más avanzado sistema de clarificación de jugo en las industrias azucareras.

A diferencia de los clarificadores con bandejas, el tiempo de residencia de los clarificadores SRI es tan solo de 45 minutos.

El jugo proveniente del Tanque Flash entra a una cámara de alimentación y se reparte en las dos direcciones en el canal anular de alimentación. El jugo fluye por medio de vertederos en forma de "V" al pozo de alimentación y se deflecta lateralmente en la interfase de separación del aparato.

El jugo clarificado se extrae por medio de dos canales anulares provistos de vertederos localizados por dentro y por fuera del sistema interno de alimentación.

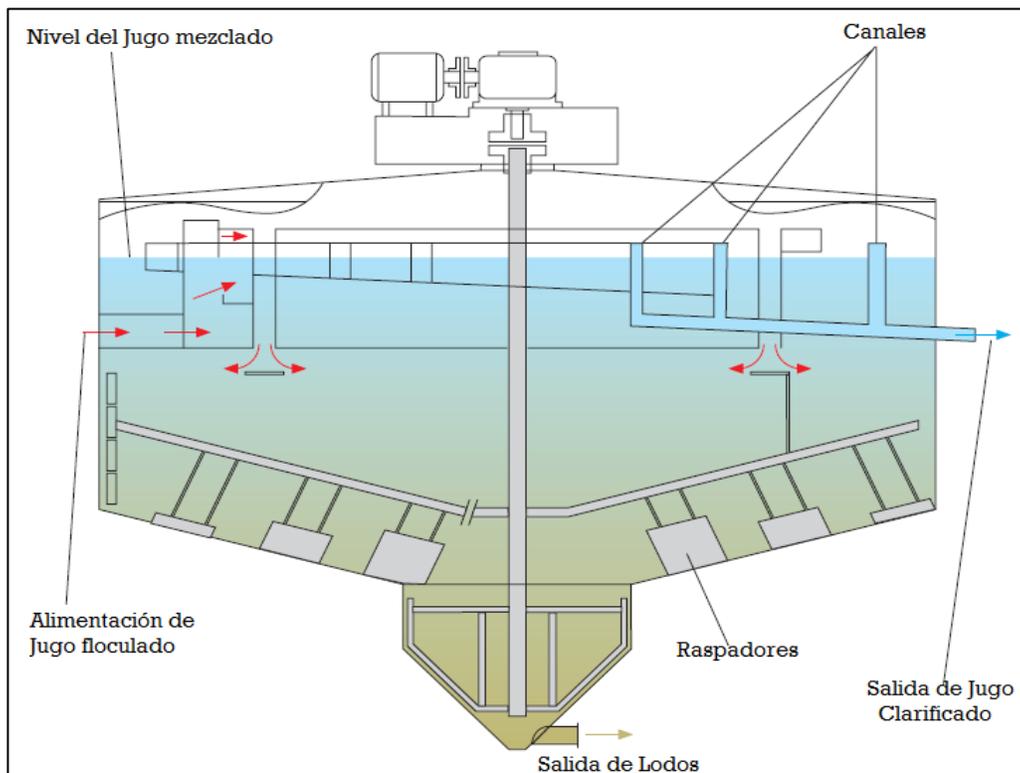


Figura 18. Clarificador Rápido SRI, diseño original. [10]

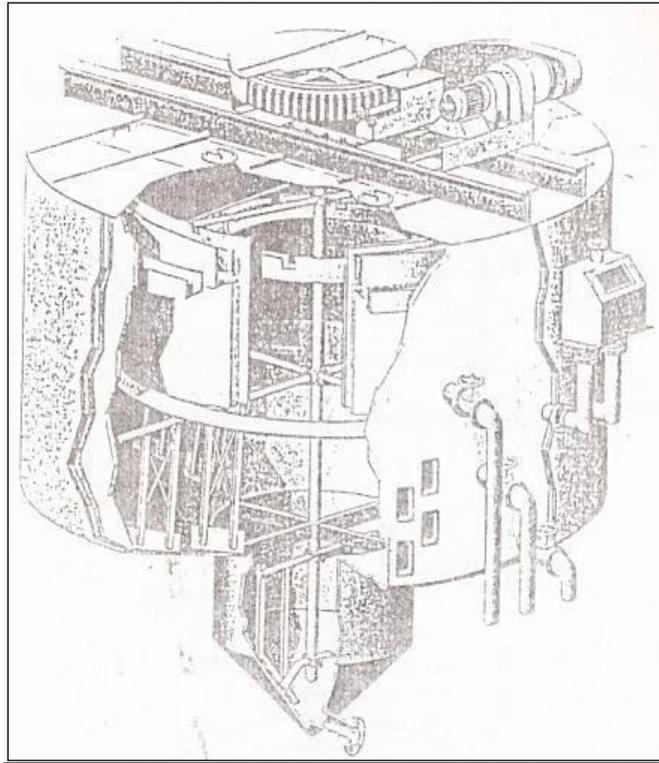


Figura 19. Vista seccional del Clarificador Rápido SRI. [22]

Las ventajas de este sistema son:

- Alto manejo de flujo por unidad de volumen.
- Sistema simple de extracción de lodos.
- Facilidad para la extracción del jugo claro: no existen válvulas telescópicas.
- Bajo tiempo de residencia.
- Mejor suministro de flujo de jugo a los evaporadores (flujo más continuo).
- Menor caída de pH: el jugo que entra sale con una caída promedio de 0.2-0.3.

Otras ventajas que se han detectado con el uso de los Clarificadores de Alta Velocidad, es la menor generación de Color y la menor rata de inversión de la sacarosa. Se han realizado mediciones que muestran la relación que existe

entre el tiempo de residencia de los clarificadores, la inversión de la sacarosa y también el porcentaje de aumento de color. Estas mediciones se hacen sobre las muestras que se toman directamente en la entrada y en la salida del Jugo del clarificador. Por consiguiente, el tiempo de permanencia se conoce con precisión. [6, 10, 22]

5.7. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DE JUGO

La clarificación de jugo es el proceso por el cual son eliminadas las impurezas (bien sean solubles, coloidales en suspensión o insolubles) susceptibles a coagulación y floculación por medios mecánicos y químicos, que implican el asentamiento y remoción por decantación de las mismas, para producir un jugo claro.

Con el proceso de clarificación se pretende formar flóculos que se encarguen de atrapar todo el material suspendido, el cual debe poder ser sedimentado rápidamente produciendo un volumen mínimo de lodos y un jugo claro de alta calidad (valores bajos de turbiedad y contenido de iones calcio disueltos, que tenga un pH adecuado que logre disminuir la inversión de la sacarosa en los procesos siguientes de extracción). Todo lo anterior con el objeto de reducir costos de producción de fábrica y tiempo de residencia en los clarificadores.

[1 - 5, 10]

La octava edición del libro "Cane Sugar Handbook" referencia más de 622 sustancias que han sido documentadas como purificadoras y clarificadoras de las soluciones de sacarosa. Sin embargo, solo unas cuantas han tenido reconocimientos industriales porque han sido tratadas para la clarificación de jugo.

El método más antiguo de clarificación de jugo y de hecho uno de los más eficientes y empleados a nivel mundial, involucra de manera general cal (óxido de calcio) y calor como agentes clarificantes y es conocido como proceso simple de defecación. El proceso de defecación ha tenido modificaciones a lo largo de la historia con el propósito de mejorar la clarificación y darle un tratamiento especial a los jugos difíciles de tratar que produzcan ciertas variedades de caña, conservando siempre su principio base.

La acción de la cal y el calor forman en conjunto lo que se conoce como coagulación de las impurezas. Se ha estudiado que el material en suspensión del jugo diluido transporta cargas electronegativas, que por diferentes tipos de fuerzas (Van der Waals, London, Movimientos Brownianos) impiden la aglomeración de las impurezas y por tanto su eliminación.

La función de la coagulación es contrarrestar el efecto repulsivo entre partículas en suspensión con la misma carga mediante su neutralización, facilitando la colisión y formación de macromoléculas (coágulos), obteniendo como resultado la precipitación primaria de las impurezas. [5, 6, 9]

Las modificaciones que se han realizado al proceso de defecación simple como método de clarificación de jugo, involucran la cal y la secuencia del calor: [15]

- Métodos cal – calor (alcalinización en frío): Es el método original. Se adiciona cal al jugo y después se calienta. Este método se dejó de utilizar cuando los jugos de la caña comenzaron a ser más difíciles de tratar.
- Métodos calor – cal (alcalinización en caliente): Estudios demostraron que este método mostraba mejores resultados en la clarificación del jugo que la alcalinización en frío, debido a que se forman flóculos de mayor tamaño y peso.
- Métodos cal – calor – cal: Antes del calentamiento se añade cal hasta completar un pH de 5.8 – 6.4. Se calienta el jugo y posteriormente se adiciona nuevamente cal hasta un pH de 7.4 – 7.8, produciendo una clarificación satisfactoria en los jugos de caña que no maduraron completamente.
- Método calor – cal – calor: Es el método empleado por el ingenio Riopaila. En el primer calentamiento la temperatura no sobrepasa los 60°C, se adiciona cal y se eleva la temperatura hasta unos 100°C aproximadamente. Se dice que este método elimina mejor los no-azúcares y produce lodos más compactos.
- Método cal – calor – cal – calor: Esta secuencia fue descrita inicialmente como “procedimiento de alcalinización fraccional y doble calentamiento” por Davies y Yearwood. Con este método se alcanzan sedimentaciones más rápidas, elevación de la pureza, disminución en el consumo de cal, lodos más compactados, eliminación de coloides, entre otros.

Aunque con la acción conjunta de la cal y el calor se forma un precipitado denso de composición compleja, que arrastra consigo la mayor parte del material en suspensión del jugo y promueve la clarificación, si se desea incrementar de manera relevante la eficiencia y la velocidad de la clarificación de jugo, se requiere de un proceso alterno denominado floculación que involucra la aplicación de polielectrolitos como agentes floculantes. Esta fue la innovación más reciente que tuvo el proceso de defecación. [11, 12]

5.7.1. ETAPAS DE LA CLARIFICACIÓN DE JUGO

La clarificación de jugo es el resultado del trabajo conjunto de otros procesos unitarios. Cada uno de ellos es relevante porque permiten la eliminación de cierta cantidad de impurezas diferentes. De esta forma, la limpieza del jugo comprende dos procesos elementales:

- a. Purificación física:** Tiene lugar en los molinos donde se extrae el jugo de la caña y se separan las impurezas de mayor tamaño como el bagazo, materia extraña y parte del bagacillo. Tema del cual se habló en el numeral 5.3. (*Purificación Física del Jugo de Caña*).
- b. Purificación química:** Es la eliminación de las impurezas solubles, insolubles o coloidales a causa de las diferentes reacciones químicas entre los componentes del jugo y los insumos químicos que se adicionan para clarificarlo. El resultado de la purificación química es la coagulación/floculación de las impurezas del jugo y la remoción de estas mediante decantación para obtener un jugo claro.

Las etapas de la clarificación química o purificación química en el ingenio Riopaila son:

1. Calentamiento.
2. Adición de cal.
3. Adición de floculante

Brevemente, se adiciona cal o lechada de cal para neutralizar los ácidos orgánicos del jugo, lo que induce a la formación de sales insolubles (mayoritariamente fosfato de calcio), y reduce las pérdidas por inversión de la sacarosa con el aumento del pH.

Entre las funciones más relevantes del aumento de la temperatura durante la clarificación, se encuentran la destrucción enzimática y microbiológica de las sustancias del jugo, la coagulación de ciertas macromoléculas orgánicas y logra incrementar no solo la velocidad sino también el rendimiento de la reacción entre la cal y los componentes del jugo, haciendo las veces de catalizador.

Con la adición del floculante se aumenta notablemente la velocidad de la clarificación del jugo, debido a que las partículas coaguladas forman masas o

flóculos de mayor tamaño y peso molecular que son separados por sedimentación debido al efecto de la gravedad. [5, 10]

La *Figura 20* ilustra que el proceso de coagulación se logra por la combinación del calor y la adición de cal. Para que los coágulos puedan sedimentar de forma más eficiente se adiciona floculante, induciendo de esta forma la floculación de las impurezas, las cuales una vez sedimentadas (o floculadas), se separan del jugo por acción mecánica, que ahora está claro. [5, 15]

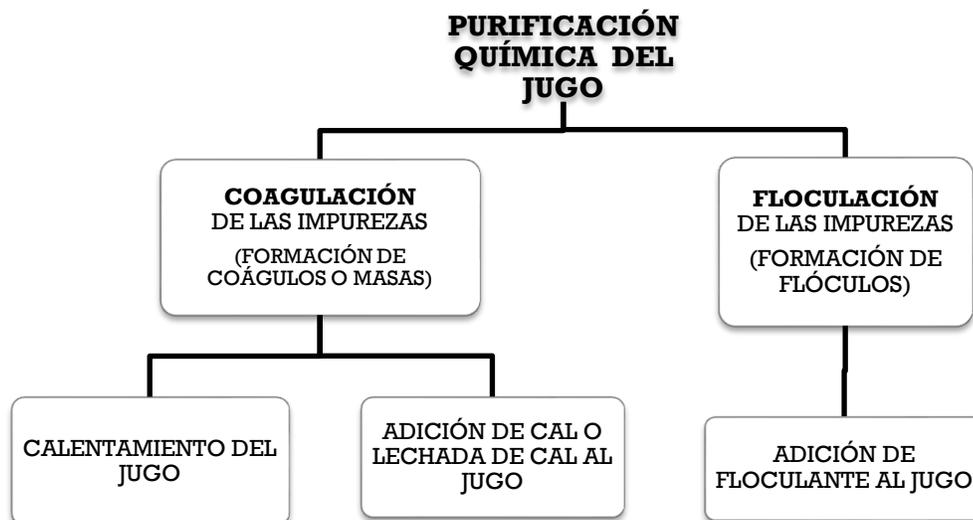


Figura 20. Descripción general de la purificación química del jugo de caña.

5.8. RELACIÓN ENTRE LOS COLOIDES Y LA CARGA IÓNICA DEL JUGO MEZCLADO

El término coloide se emplea para describir las partículas que tienen un tamaño inferior a 1 μm y cuya dispersión en un fluido es relativamente extensa.

La separación de este tipo de partículas presenta más dificultades que las partículas de mayor tamaño; por este motivo, se han desarrollado diferentes técnicas que son relativamente sencillas y en las que se involucra la aglomeración de las mismas.

Las dispersiones coloidales se pueden desestabilizar mediante la alteración de la superficie de los coloides en el sistema sólido-líquido. Esto es posible

lograrlo al ajustar condiciones físicas que permitan aumentar el tamaño y el área superficial de las partículas o mediante la adición de electrolitos y agentes activadores en el sistema. Tal es el caso de los procesos de coagulación y floculación.

En el caso del jugo de la caña (jugo mezclado), la presencia de los coloides provocará efectos desfavorables en la clarificación de jugo, debido a que los coloides pueden evitar la unión de las partículas y por ende interferir en su precipitación.

Se ha comprobado que la cantidad de materia coloidal aceptable que existe en el jugo es de 0.02% – 0.29% aproximadamente. Esta cantidad varía de acuerdo con el grado de eliminación que se obtenga en el proceso de molienda y tamizado, pero como ya se ha estudiado, la eliminación de estas solo representa del 10% al 15% de su totalidad. [3, 15]

5.8.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS COLOIDES DEL JUGO MEZCLADO

Los coloides del jugo de la caña son de dos tipos:

- **Coloides Liofílicos:** Son aquellas partículas que tienen gran afinidad por los medios acuosos, propiedad que los hace tener un alto grado de hidratación y ser de carácter viscoso. En el jugo mezclado, las principales sustancias liofílicas son las pectinas, pentosanas y las proteínas.
- **Coloides Liofóbicos:** Son partículas que no tienen tanta afinidad por los medios acuosos y por lo tanto poseen menor grado de hidratación. Esta propiedad hace que sus dispersiones sean inestables y poco viscosas. Las ceras, grasas y materia extraña son algunas de las sustancias que se incluyen dentro de este tipo de coloides.

Además de los dos tipos de coloides presentados, es posible que se formen otras sustancias coloidales como consecuencia de la acción de los microorganismos. Ejemplo de sustancias coloidales serían las glucosanas y las levulosanas, cuyo carácter es liofílico.

Durante el proceso de clarificación de jugo también se pueden formar coloides con la precipitación de las sales inorgánicas y la descomposición de diversas

sustancias orgánicas. Por esto, el porcentaje de remoción de estas partículas también determina el grado de eficiencia de la clarificación.

La mayoría de las partículas coloidales presentes en el jugo transportan cargas negativas debido a la adsorción de iones sobre su superficie, haciendo que el jugo se encuentre cargado electronegativamente (Ver *Figura 21*). Esta razón hace que los coloides en el jugo no se atraigan electrostáticamente unos a otros, evitando su unión y consecuentemente, su precipitación.

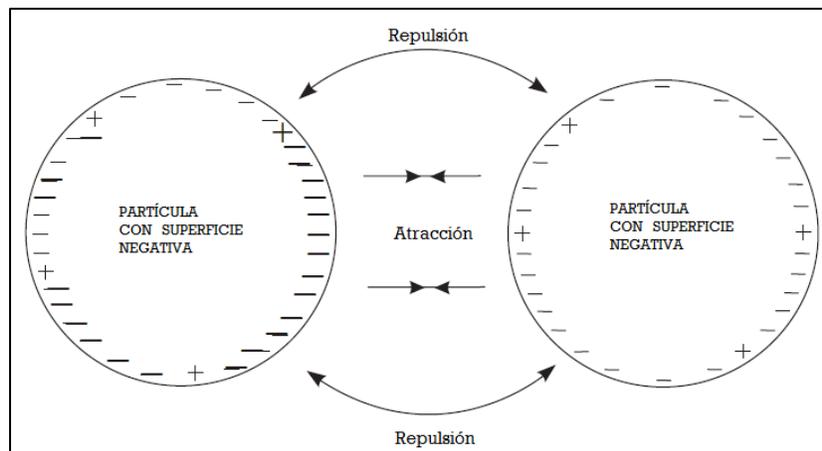


Figura 21. Partícula coloidal cargada electronegativamente. [3]

5.8.2. DESESTABILIZACIÓN DEL SISTEMA SÓLIDO-LÍQUIDO

Los coloides del jugo mezclado están sujetos a dos fuerzas:

- **Fuerzas de Van der Waals:** Son fuerzas de atracción por la interacción mutua entre electrones y núcleo de la molécula.
- **Fuerza de Repulsión Electrostática:** Fuerza entre partículas cargadas que tiende a mantener las cargas iguales separadas. Esta repulsión es causada por el "Potencial Zeta" (PZ), debido a la diferencia de potencial entre la partícula y la solución. La estabilidad de las partículas dispersas depende de la magnitud del potencial Zeta.

Para que se presente la máxima aglomeración y precipitación de las impurezas, es necesario que el PZ de las partículas sea nulo (cero), denominándose "punto isoeléctrico".

Por lo tanto, para que ocurra una precipitación de estas partículas diminutas se requiere que como mínimo su carga sea neutralizada o desestabilizada. Existen tres métodos mediante los cuales se hace posible la desestabilización de las partículas coloidales:

- 1. Neutralización de su carga electronegativa:** Mediante la variación del pH del medio. Se puede lograr con la adición de sustancias que posean una carga positiva en su superficie, como la cal o lechada de cal. Las proteínas que posean el punto isoeléctrico por encima del correspondiente al jugo mezclado se pueden desnaturar por el cambio de pH, las pectinas también se desestabilizan por la acción de la cal, precipitando como pectato de calcio.
- 2. Reducción del grado de hidratación:** Se puede lograr la aglomeración de las partículas mediante el calentamiento del jugo hasta un punto cercano al de ebullición. Este método se denomina efecto de deshidratación o desnaturación y hace posible que el sistema se vuelva más inestable. La adición de cal también puede reducir el grado de hidratación. El tipo de coloides que se logra desestabilizar con el calentamiento son los liofílicos como las albúminas y otras proteínas.
- 3.** Mediante la formación de mecanismos de unión a causa de la adición de sustancias con elevados pesos moleculares como las poliacrilamidas (floculantes), la cual se estudiará en el *numeral 5.11.1 (Floculantes)*.

Una vez las partículas están desestabilizadas, las fuerzas de Van der Waals y las del Potencial Zeta ya no actúan sobre ellas. Ahora, las fuerzas a las que están sujetas las sustancias coaguladas son:

- **Fuerzas Brownianas:** Imparten el movimiento oscilatorio a los coloides dispersos en un medio líquido, ocasionado por colisiones de partículas y moléculas del medio en suspensión para lograr la aglomeración. [5, 15]

5.8.3. RELEVANCIA DE LA DESESTABILIZACIÓN DEL SISTEMA SÓLIDO-LÍQUIDO EN LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO

Debido a que los coloides evitan la unión de las partículas en suspensión (impurezas) del jugo mezclado y por tanto su precipitación y posterior separación, es importante desestabilizar el sistema coloidal por las siguientes razones:

- Los coloides tienden a incrementar la hidratación de varias sustancias, haciendo que éstas adquieran un carácter gelatinoso que hará lento el proceso de sedimentación y producirá lodos voluminosos.
- Las sustancias coloidales incrementan la viscosidad de las meladuras y melazas haciendo más lento el proceso de filtración.
- La presencia de los coloides ocasiona la formación de espumas y el incremento de color.
- Los coloides interfieren en la cristalización de la sacarosa, proceso indeseable en cualquier industria azucarera. [15]

5.9. ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA CLARIFICACIÓN DE JUGO

Fisicoquímicamente, la clarificación de jugo comprende dos procesos elementales: coagulación y floculación de las impurezas.

Como se ha mencionado en numerales anteriores, la coagulación de las impurezas comprende dos procesos en la industria azucarera: calentamiento y encalado. La floculación es alcanzada tras la adición de una sustancia polimérica llamada floculante, cuya función más práctica es envolver los coágulos de impurezas formados para que estos obtengan mayor peso molecular y como consecuencia precipiten al fondo de los clarificadores en un tiempo considerablemente corto que sea benéfico para la fábrica.

Estos dos procesos fisicoquímicos son más complejos de lo que parecen. Por tal motivo se estudiarán en numerales diferentes, mencionando los aspectos más relevantes de cada uno.

5.10. COAGULACIÓN DE LAS IMPUREZAS DEL JUGO MEZCLADO

El proceso de coagulación es definido como el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales (impurezas), mediante la neutralización de sus cargas eléctricas para permitir un mayor acercamiento entre las mismas. Esto se logra fundamentalmente con la adición de electrolitos químicos denominados coagulantes (como la cal) los cuales mediante diversos

mecanismos de adsorción, anulan las fuerzas repulsivas o actúan sobre la capa hidrofílica (liofílica) de los coloides.

Para la desestabilización de las cargas negativas de los coloides se deben usar coagulantes catiónicos, siendo de mayor importancia las especies que están asociadas al Aluminio (Al), Plata (Pt), Silicio (Si), Magnesio (Mg) y **Calcio (Ca)**.

En las industrias azucareras, el metal catiónico que se emplea para coagular las impurezas del jugo es el Calcio, el cual se encuentra asociado a la sustancia química denominada comúnmente lechada de cal (Hidróxido de Calcio Ca(OH)_2).

Es importante para cualquier fábrica que el tiempo de coagulación sea breve (cuestión de segundos), ya que la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización de los coloides sea total antes de que el coagulante comience a precipitar en forma de hidróxido metálico, por ejemplo.

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, la coagulación de las impurezas en Riopaila y en general en las fábricas azucareras, depende del trabajo conjunto de dos factores:

- Calentamiento del jugo mezclado o diluido (factor físico): El cual sucede en dos etapas. Primero se calienta el jugo diluido hasta cierta temperatura, después se encala en el tanque de encalado y se calienta por segunda vez hasta la temperatura en la que se ejecuta la clarificación del jugo (Ver *Figura 22*).
- Encalado o alcalinización del jugo mezclado o diluido (factor químico).

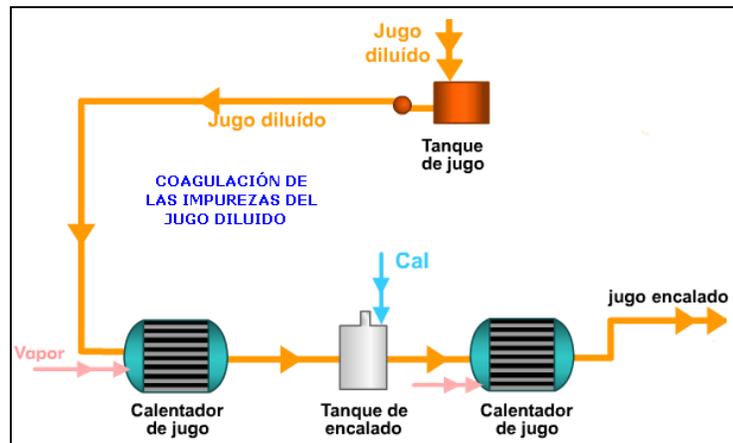


Figura 22. Proceso en fábrica de la coagulación de las impurezas del jugo diluido. [18]

Con la coagulación de las impurezas se desencadenan una serie de reacciones químicas que son las que fundamentan y hacen posibles las colisiones entre partículas. Estas tienen lugar más que todo tras la adición de la cal, la cual reacciona con las sustancias cargadas negativamente presentes en el jugo para formar compuestos insolubles o macromoléculas de lodos, que finalmente son las que se pretenden extraer para que el jugo quede claro.

El fósforo presente en el jugo tiene una gran relevancia durante el proceso de coagulación, pues este, en forma de fosfato, es el que produce la mayor cantidad precipitado al contacto con la cal.

Una vez las impurezas son coaguladas, es necesaria la introducción de un proceso que permita que estas sedimenten en el menor tiempo posible para poder producir un jugo claro y proseguir con el proceso de elaboración del azúcar. El proceso que ayuda a la anterior acción es la floculación, la cual puede ser inducida de diversas formas, pero se usa comúnmente los productos denominados floculantes. [5, 11, 15]

5.10.1. CALENTAMIENTO DEL JUGO DILUIDO

Uno de los objetivos más evidentes del calentamiento del jugo es acelerar las reacciones que ocurren durante el proceso de coagulación ocasionadas por el contacto entre la cal y las sustancias del jugo en el proceso de encalado. Sin embargo, el calor también es considerado como un agente coagulante y aunque su acción es parcial, su presencia estimula notoriamente la aglomeración de las impurezas. La solubilidad del hidróxido de calcio (cal) disminuye con el aumento de temperatura, lo que significa que a temperaturas elevadas se formarán con mayor facilidad los precipitados.

Por la acción del calor, los sistemas coloidales más sencillos se desestabilizan a causa de la deshidratación en su superficie.

Básicamente, con el aumento de temperatura también aumenta la tensión de vapor en el medio de dispersión (jugo diluido) y el compuesto de adsorción (coloide) se desestabiliza aunque no por completo. En realidad lo que ocurre es una leve disminución de la carga electrostática del coloide, provocando la semi-neutralización del mismo y como consecuencia de esto, se desfavorece la estabilidad del coloide y se hace posible su colisión con otros coloides, permitiendo que la coagulación avance.

[15, 23]

5.10.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE JUGO

Después de pasar por la estación de molinos, el jugo diluido tiene una temperatura aproximada de 35°C. Durante el primer calentamiento, se eleva la temperatura del jugo hasta aproximadamente unos 50°C. Una vez obtenido este valor, el jugo se somete al proceso de encalado y se calienta por segunda vez hasta alcanzar más o menos los 100°C, temperatura a la cual se lleva a cabo la adición de floculante y posterior clarificación del jugo.

La aplicación de calor al jugo es posible gracias a modernos calentadores (Ver *Figura 23*) que incrementan la temperatura del jugo diluido hasta el punto deseado con gran velocidad. Sin embargo, la turbulencia a la que está sometido el jugo al pasar por los calentadores no es un efecto deseable porque desfavorece la formación del coágulo.

Los calentadores preprimarios son los que calientan el jugo que provienen de los molinos. Los primarios son aquellos que calientan el jugo encalado y lo entregan al Tanque Flash y los calentadores secundarios son los que se encargan de elevar aún más la temperatura del jugo claro para que se dé el proceso de evaporación del jugo.

Es importante evitar el sobrecalentamiento del jugo porque no resulta ventajoso, ya que podría provocar la descomposición de la sacarosa, y este hecho no solo significa pérdidas para la fábrica, sino que también se aumenta el color con la presencia de los monómeros glucosa y fructosa. [22]



Figura 23. Calentadores de jugo horizontales del Ingenio Riopaila.

5.10.1.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA

Con el calentamiento se descomponen una serie de sustancias coloidales, lo que ocasiona que se aglomeren y disminuyan su solubilidad en el jugo.

Entre las funciones más significativas del calentamiento de jugo se encuentran:

- Destrucción enzimática y microbiológica de las impurezas del jugo.
- El calor provoca la coagulación de algunos constituyentes orgánicos, lo que facilita la remoción de las impurezas durante el proceso de sedimentación.
- Mayores rendimientos entre las reacciones de la cal y las sustancias del jugo.
- Dado a que la solubilidad del aire decrece con la temperatura, la aplicación de calor provoca un desairado y permite que la sedimentación se lleve a cabo sin inconvenientes.

Además de las anteriores, el calentamiento del jugo acelera la formación de partículas de mayor tamaño y densidad debido a que incrementa la velocidad del movimiento, ocasionando que el número de oportunidades con la que las partículas pueden colisionar aumente. También el calentamiento provoca que el jugo disminuya de densidad y viscosidad. [5, 15, 23]

5.10.2. ENCALADO O ALCALINIZACIÓN DEL JUGO DILUIDO

La cal se adiciona al jugo diluido para cumplir dos objetivos fundamentales: alcalinizar el jugo y coagular las impurezas del mismo mediante reacciones químicas con las sustancias contenidas en él.

El jugo que se extrae de la caña contiene un pH ácido aproximado al valor de 4. Se ha mencionado que en las industrias azucareras conviene elevar el pH de las soluciones que contienen azúcar debido a que la sacarosa se hidroliza en sus monómeros glucosa y fructosa cuando se encuentra en medios ácidos, produciéndose la denominada "inversión ácida".

De hecho, la ruptura de la sacarosa para formar una mezcla equimolar de sus monosacáridos α -D-glucosa y β -D-fructosa tiene un gran interés comercial, pues esta mezcla es mucho más dulce que la sacarosa. Sin embargo, en las industrias azucareras la inversión de la sacarosa no representa más que pérdidas económicas del producto. Además, gastan otra cantidad de dinero al tratar de detener la inversión cuando adicionan insumos químicos a los materiales del proceso. Por esto, desde hace muchos años el jugo diluido es expuesto a alcalinización mediante un reactivo químico que ha demostrado ser el más adecuado: la lechada de cal. Al proceso de alcalinización también se le conoce como proceso de encalado para hacer referencia de la sustancia que se emplea para tal fin.

A pesar de que se han listado más de 622 sustancias que se usan para purificar el jugo, en la práctica todas han sido desechadas, dejando a la cal como la sustancia de mayor relevancia para la alcalinización, debido a que es posible obtenerla en cualquier lugar, es económica y se ha estudiado de forma profunda las reacciones que tiene con los constituyentes del jugo.

La cal se puede adicionar al jugo de varias formas, pero generalmente las industrias prefieren adicionarla en una suspensión acuosa debido a que por este método es posible conocer la densidad de la misma y permite cuantificar la cantidad de calcio que sea necesaria adicionar según un volumen determinado de jugo. Tal es el caso del ingenio Riopaila, el cual adiciona la cal en forma de óxido de calcio suspendida en una solución acuosa, la lechada de cal.

Se ha establecido un índice promedio de la cantidad de cal que debe adicionarse a una cantidad de jugo, el cual emplean varios países y consiste en adicionar 1.25 libras de cal por cada tonelada de caña aproximadamente. [5]

La calidad en la preparación de la cal es un factor muy importante que las industrias deben controlar, debido a que ésta tiene un efecto significativo en el tamaño del floculo que se produzca, la velocidad de asentamiento y la claridad del jugo producido, además, el grado de incrustaciones que puede tener en los equipos si se adiciona de forma excesiva. [15]

5.10.2.1. CONTROL DE LA CANTIDAD DE CAL

El pH al que se debe llevar el jugo para evitar la inversión de la sacarosa y para coagular de forma eficiente las impurezas depende de muchos factores, como la variedad y madurez de la caña que se emplee, la cantidad de materia

extraña que traiga consigo y la cantidad de fosfatos que tenga, entre otras condiciones propias de la fábrica. Generalmente, conviene adicionar cal de tal forma que la reacción final tenga un pH cercano a 7, es decir que se produzca un jugo claro con valores de pH aproximados al valor de 7.

En Riopaila, el jugo se encala hasta obtener valores de pH entre 7.4 – 7.5, con el objeto de producir un jugo claro con valores de pH aproximados de 6.9 – 7.1. Estas y otras especificaciones de factores fisicoquímicos del jugo o del resto de materiales del proceso son inspeccionadas por el área de Control Industrial de acuerdo a los métodos y frecuencias establecidos en el Plan de Calidad de Riopaila. [24]

Con el objetivo de controlar los valores anteriores, se emplean pHmetros que le permiten a los operarios percatarse si la adición de cal está siendo excesiva o apropiada.

Una de las bases de una buena clarificación, es la cantidad de cal que se adicione al jugo. Esta puede tener efectos negativos o positivos según el control que se le dé.

Entre los efectos negativos que posee la adición incorrecta de cal se encuentran:

- Cantidad excesiva de sales solubles de calcio (exceso de cal).
- Incremento de color como consecuencia de la descomposición de algunas sustancias como los azúcares reductores (exceso de cal).
- Decantación deficiente (deficiencia de cal).
- Jugo turbio con posibles pérdidas por inversión (deficiencia de cal).
- Aumento de viscosidad del jugo claro por la no eliminación de sustancias viscosas (deficiencia de cal).

Para evitar todas las desventajas anteriores que podría producir la cal, se han diseñado diversos sistemas tecnológicos que incluyen la adición automática, con la ventaja de que el operario puede manipularla manualmente si éste ve que se presentan inconvenientes. El principio básico de este método consiste en cuantificar la cantidad de jugo que entra al tanque de encalado y acorde con este valor, adicionar una cantidad determinada de lechada de cal. Si el operario observa que el pH del jugo encalado o del jugo claro es inferior al que debería ser, aumenta un poco la cantidad de cal hasta que se estabilice el pH en los valores adecuados y si en cambio observa que el pH es mucho mayor al que debe estar, disminuye la cantidad de cal a adicionar.

5.10.3. PAPEL DEL FÓSFORO EN EL PROCESO DE ENCALADO

Se ha establecido durante varios años, por muchos tecnólogos de diferentes países, que el fosfato presente en el jugo de la caña representa un papel fundamental en los resultados que se obtengan en la clarificación. Como se observa en la *Tabla 5 del numeral 5.4.1.2 (Sales Orgánicas)*, los fosfatos son las sales inorgánicas aniónicas que se encuentran en mayor proporción en el jugo, con una cantidad aproximada de 0.14% - 0.4%.

Su importancia se atribuye a que son los fosfatos (presentes en la forma P_2O_5) los que reaccionan en primera medida con los iones Calcio que se adicionan en el proceso de encalado y es el fosfato de calcio precipitado el que se obtiene en mayor proporción, por lo tanto, constituye casi toda la eliminación de las impurezas. De hecho, Honig⁶ propone que "son las reacciones de los fosfatos las que constituyen el eje central alrededor del cual giran todas las teorías sobre el mecanismo de la clarificación de jugo".

El mecanismo físico-químico de la clarificación de jugo depende de la precipitación del fosfato de calcio (Ver *Figura 24*) que se obtiene de forma primaria en el proceso de coagulación y que finaliza completamente con el proceso de floculación, debido a que este precipitado contiene características únicas que permiten clarificar el jugo, como lo cita Honig⁷:

"El precipitado de fosfato de calcio es un precipitado floculento que remueve ciertos coloides por adsorción superficial y que al irse asentando arrastra mecánicamente algunos de los coágulos de Calcio y algunas otras impurezas en suspensión. Al calentar el jugo, las reacciones se aceleran."

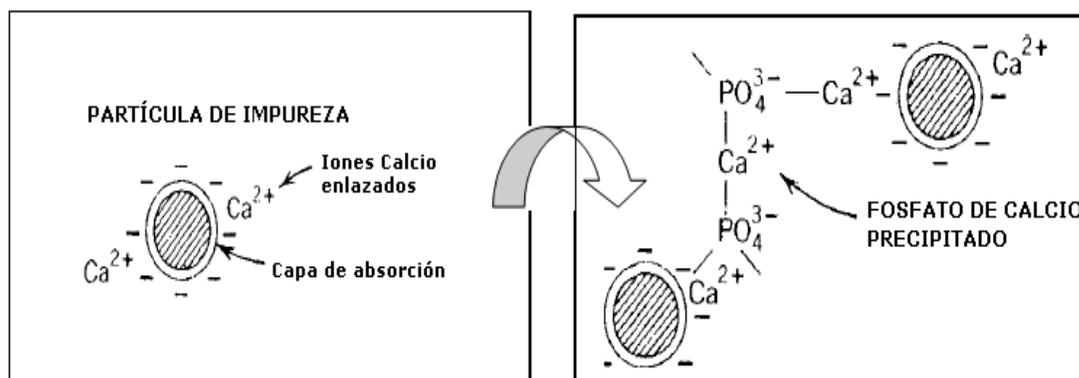


Figura 24. Formación del precipitado de fosfato de calcio. [5]

⁶Principios de Tecnología Azucarera. Tomo I. p. 485

⁷Principios de Tecnología Azucarera. Tomo I. p. 485.

Según varios autores, la cantidad de fosfatos adecuada que debe tener un jugo para que sea clarificado de manera eficiente, es aproximadamente entre 300 y 600 ppm.

Cuando los jugos poseen una cantidad mayor de fosfatos se forma un precipitado voluminoso que se asienta rápidamente. Si la cantidad de fosfatos en el jugo es menor, el precipitado que se forma tiene una consistencia gelatinosa en forma de flóculos débiles y de menor tamaño que se asientan con mayor lentitud. En el último caso, generalmente se recomienda adicionar insumos químicos que le otorguen al jugo una carga mayor de fosfatos (generalmente se adiciona ácido fosfórico o incluso implementar la fertilización de suelos con fósforo) debido a que como consecuencia se obtendrán jugos claros con un alto contenido de iones calcio disueltos además que puede existir la posibilidad de que el jugo se clarifique de forma ineficiente, produciendo valores elevados de turbiedad.

La cantidad adecuada de fosfatos en el jugo representa más ventajas que desventajas (Ver *Tabla 10*).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Jugo de mayor claridad	Mayor cantidad de lodos
Mayores ratas de decantación	Mayor consumo de cal
Mejor calidad del azúcar	
Mejores características de filtración en los lodos	
Mayor remoción de impurezas coloidales	

Tabla 10. Ventajas y desventajas de la cantidad apropiada de fosfatos en el jugo.

Con los procedimientos de calentamiento y encalado del jugo (coagulación) se obtienen descensos en el pH del jugo. Por esto el jugo diluido posee valores más elevados de pH que el jugo claro. Muchos investigadores creían que el descenso era causado por la acción microbiológica. Sin embargo, la disminución se produce como consecuencia de los fosfatos del jugo: mientras más alto sea el contenido de fosfatos, más notable será la diferencia de pH antes y después de la clarificación y viceversa. [5, 15, 17]

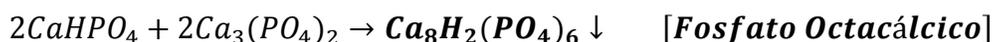
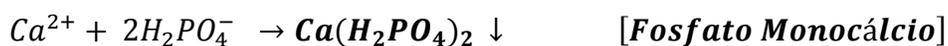
5.10.4. REACCIONES DE LA CLARIFICACIÓN DE JUGO

La reacción entre los fosfatos inorgánicos solubles y los iones calcio es muy compleja, debido a que en el jugo además de fosfatos hay otra serie de sustancias orgánicas, inorgánicas, iónicas y moleculares que reaccionan con una sola sustancia añadida: la cal.

La velocidad de la reacción entre los fosfatos y la cal es muy lenta. Investigaciones han demostrado que a temperatura ambiente podrían tardar hasta 10 días en finalizar. Sin embargo, las velocidades se incrementan con temperaturas cercanas a las de ebullición debido a que la solubilidad de las sustancias formadas con la adición de cal disminuye.

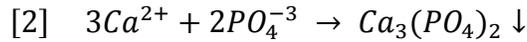
Las reacciones de precipitación inician con la formación del fosfato monocálcico ($Ca(H_2PO_4)_2$) y dicálcico ($CaHPO_4$).

Los compuestos formados, aunque son insolubles, son inestables conllevando a que las reacciones sean reversibles, por eso, instantáneamente se producirán otras reacciones con el objeto de formar compuestos más estables. Las principales reacciones que tienen lugar en el encalado son:



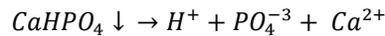
Como se observa, algunas reacciones son secuenciales y por esto los productos de unas son los reactantes de otras en reacciones posteriores, indicando que la distribución de los fosfatos de calcio depende de la cinética de las reacciones.

Aunque termodinámicamente la hidroxyapatita es el compuesto más estable, experimentalmente se ha encontrado que el fosfato tricálcico es el compuesto que se forma en mayor proporción aunque a una velocidad mucho menor como consecuencia de la precipitación intermedia del fosfato dicálcico, por esto las dos siguientes reacciones ocurren de forma casi simultánea:



Bajo el principio de que es más fácil juntar dos iones que cinco iones, se explica el por qué la reacción [1] se produce con mayor velocidad al ser de segundo grado, y por qué la reacción [2] ocurre con menor velocidad debido a que intervienen cinco iones.

La velocidad de la reacción [2] se incrementa cuando la reacción [1] va disminuyendo su velocidad de formación al aproximarse a su fin y como resultado se obtiene una disociación del $CaHPO_4$ en los iones H^+ y PO_4^{-3} . Por la presencia de los iones de hidrogeno se incrementa la acidez del jugo hasta que el compuesto se disuelve completamente.



Finalmente, la lentitud de formación del fosfato tricálcico se atribuye a la mínima velocidad con la que ocurre la redisolución del fosfato dicálcico.

Habiendo conocido las reacciones que interfieren en la clarificación, es posible identificar que la causa de la disminución del pH del jugo claro se debe al aumento en la concentración de los iones hidronio durante la redisolución del fosfato dicálcico y la formación de la hidroxyapatita.

Por todo lo expuesto, el fosfato de calcio que se obtiene en la alcalinización del jugo no es un compuesto químico definido sino que es una masa amorfa de composición diversa que se denomina "lodos".

Por el motivo anterior, se recomienda encalar el jugo hasta que se obtenga un jugo claro con pH entre 6.9 - 7.2. Si por el contrario, el jugo tiene una gran cantidad de fosfatos, es recomendable encalarlo hasta obtener un pH del jugo claro entre 7.6 -7.8. En cualquier caso, lo que se debe tener en cuenta es que un jugo con alto contenido de fosfatos puede producir una demanda de cuatro o cinco veces mayor de cal. [5, 15, 25, 26]

5.10.5. MODIFICACIONES DE ALGUNOS DE LOS NO-AZUCARES ORGÁNICOS DURANTE LA CLARIFICACIÓN DE JUGO

5.10.5.1. AZÚCARES REDUCTORES

Estas sustancias se descomponen fácilmente en medios alcalinos como consecuencia de su fácil oxidación. Sin embargo con la destrucción de los azúcares reductores se producen otra cantidad de compuestos que aumentan el color y la acidez del jugo. Además, los que no se destruyen pueden combinarse con los aminoácidos en la denominada "Reacción de Maillard", donde los productos que se forman también aumentan el color del jugo como se explicó en el *numeral 5.4.1.8. (Compuestos coloreados)*. [15]

5.10.5.2. COMPUESTOS NITROGENADOS

Las proteínas se precipitan casi por completo por la desnaturalización provocada durante el calentamiento y aumento del pH en el encalado. Es importante eliminar la mayor cantidad posible de proteínas durante la clarificación del jugo debido a que estas actúan como protectoras de los coloides, impidiendo la desestabilización de la materia en suspensión. Además, reducen la actividad del ion Calcio, incrementando su concentración en el jugo, incrementan la viscosidad de las meladuras y reducen la velocidad de cristalización de la sacarosa.

Los aminoácidos permanecen en solución y solo actúan como estabilizadores de pH (efecto buffering) a causa del contenido en su estructura de los grupos carboxílico y amino característicos, es decir, a causa de su comportamiento anfótero. [15]

5.10.5.3. GOMAS

Las gomas están presentes en el jugo como coloides hidrofílicos, es decir que se desestabilizan al deshidratarse con el calentamiento. Si no se eliminan

completamente en la clarificación de jugo, tienden a aumentar la viscosidad en las meladuras. [15]

5.10.5.4. PECTINAS

Estas sustancias coloidales hidrofílicas pueden cambiar significativamente las propiedades del jugo, debido a que 0.1% de pectinas incrementa la viscosidad del jugo en más del 10%. Por su carácter liofílico, es posible eliminarlas durante el calentamiento. [15]

5.10.5.5. CERAS Y GRASAS

Se presentan como sustancias coloidales o de gran tamaño. Durante la clarificación de jugo se descomponen para formar precipitados pero también forman una especie de nata que se ubica en la parte superior del jugo, es decir que no se eliminan completamente con la clarificación, y parte de ellas pasan con el jugo clarificado. [15]

5.11. FLOCULACIÓN DE LAS IMPUREZAS DEL JUGO ENCALADO

El proceso de floculación consiste en la agrupación de las partículas coaguladas y desestabilizadas iónicamente para formar masas de mayor tamaño (flóculos) y peso molecular, las cuales por medio de la fuerza de gravedad sedimentan al fondo del clarificador produciendo un jugo claro. Lo anterior se consigue con el uso de una sustancia química denominada floculante que posee cargas iónicas a lo largo de su estructura. [11, 12]

El principio de este proceso es el fenómeno de adsorción (Ver *Figura 25*) en el cual se extrae materia de una fase para concentrarla sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida), dicho de otra forma, el adsorbato (sustancia que se concentra en otra fase) o impureza se mueve desde la fase líquida para

acumularse en la fase sólida por la acción del adsorbente (sustancia que se encarga de hacer el trabajo de adsorción).

El tipo de adsorción que tiene lugar en la floculación es eléctrico (adsorción por intercambio), en el cual la carga positiva de las impurezas coaguladas se concentran en la superficie del floculante a causa de la atracción electrostática en sus lugares cargados. [28]



Figura 25. Ilustración del fenómeno de adsorción. [27]

Aunque el proceso de floculación es sencillo, su eficiencia depende de una serie de condiciones que conviene hacer cumplir: [22]

- Una coagulación previa tan perfecta como sea posible.
- Agitar de forma homogénea y lenta el jugo y el floculante para proporcionar mayor superficie de contacto.
- Emplear de forma adecuada el floculante. Es decir, que el floculante que se prepare sea de excelente calidad. Esta es una de las condiciones más relevantes necesarias para lograr una adecuada clarificación de jugo. Considerando su importancia y que es el tema de estudio de este trabajo, a continuación se profundizará más sobre este aspecto.

5.11.1. FLOCULANTES

Los floculantes, también llamados ayudantes de coagulación, de floculación o de filtración son sustancias poliméricas de elevado peso molecular (1×10^7 Kg/Kmol), solubles en agua, que se clasifican por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (natural o sintético) o según su carga iónica (no iónico, catiónico, aniónico) y se encuentran en presentaciones líquidas o sólidas. [2, 4, 11]

Para la clarificación de jugo las industrias azucareras utilizan floculantes sintéticos aniónicos sólidos, los cuales poseen una gran afinidad con las superficies sólidas. El uso de este tipo de floculantes comenzó a finales de la década de 1950. Desde entonces, los estudios están encaminados a la resolución de problemas tecnológicos relacionados con la aceleración y aumento de eficacia del polímero en procesos de separación de sistemas sólido-líquido. [5 - 8, 13]

Hasta el momento, investigaciones realizadas han comprobado que no existe un polímero que se desempeñe igual en todas las industrias azucareras. Esto indica que cada fábrica deberá hacer la selección del producto que aplicarán a su proceso, según sean sus condiciones de operación.

El uso de floculantes o polímeros ha tenido grandes aplicaciones industriales diferentes a la fabricación del azúcar, tales como: [11, 26]

- En el tratamiento de aguas potables e industriales de proceso.
- Depuración de aguas residuales, específicamente en tratamientos físico - químicos.
- Tratamiento de fangos, para mejorar el rendimiento de centrífugas y filtros prensa.
- Procesos industriales en papeleras, petroquímica, tratamiento de minerales, conserveras, etc.

Adicionar floculante en el proceso de clarificación de jugo trae las siguientes ventajas: [6]

- Incremento en la velocidad de sedimentación de los lodos.
- Disminución del volumen de lodos como consecuencia de una producción más compacta.
- Producción de jugo con valores menores de turbiedad (jugo más claro) como resultado del arrastre de las impurezas.
- Disminución de la pol en la torta de cachaza producida en la estación de filtración de cachaza.

La Norma Técnica Colombiana NTC 2369 del 19 de Octubre de 1994, establece los requisitos que deben cumplir y los métodos de análisis a los cuales deben

someterse los "Floculantes Derivados de la Acrilamida Utilizados en la Clarificación del Agua Potable y en la Elaboración del Azúcar de Caña". [2]

5.11.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLOCULANTES ANIÓNICOS

Los componentes principales de este grupo de polímeros son las poli(acrilamidas) (PAM) (Ver *Figura 26*), las cuales desde los últimos cincuenta años se han convertido en la unidad base sobre la que se fundamenta toda la química de los floculantes sintéticos aniónicos, produciendo de esta forma más del 95% de los floculantes existentes a nivel mundial y su principal uso es la depuración de aguas (tratamientos físico-químicos). [12 - 14].

Para la síntesis de los floculantes aniónicos se emplean monómeros de la acrilamida los cuales forman una cadena larga de gran peso molecular al repetir su estructura (polimerización). Sin embargo, para que obtengan cargas negativas, varios radicales amida son sustituidos parcialmente por radicales aniónicos (Ver *Figura 27*), generalmente por enlaces $-COOH$ ó $-COONa$ de forma repetitiva hasta constituir el polímero deseado. [1, 10]

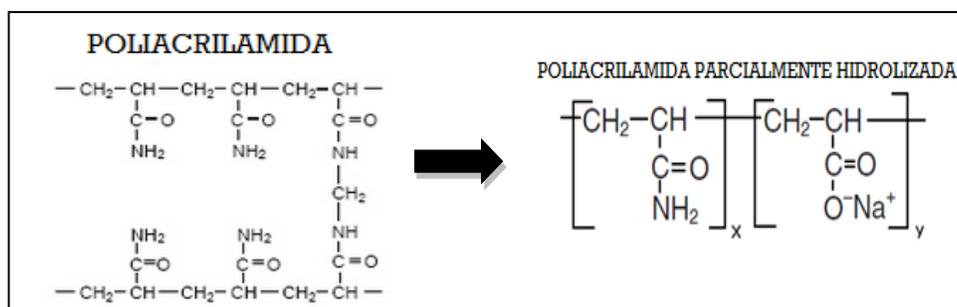


Figura 26. Estructura del polímero poli(acrilamida) y estructura del polímero poli(acrilamida) modificado para funcionar como floculante aniónico (hidrolizado). [10]

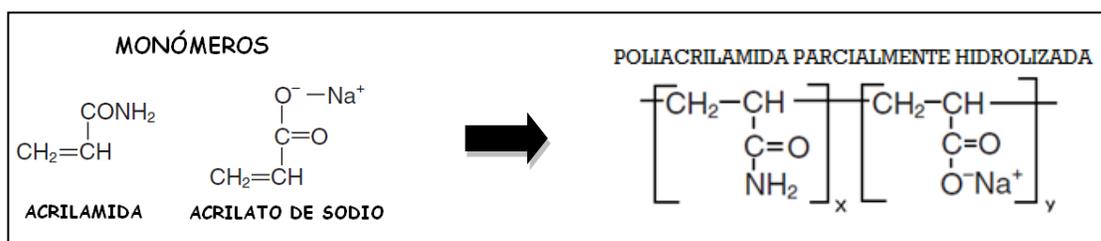


Figura 27. Monómeros del polímero poli(acrilamida) empleados para sintetizar poli(acrilamidas) parcialmente hidrolizadas (floculantes aniónicos). [1, 10]

5.11.1.2. FISICOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN DE LOS FLÓCULOS

Es importante recordar que durante la floculación existen una serie de compuestos con carga iónica. Se encuentra, por ejemplo el fosfato tricálcico precipitado anteriormente en el proceso de coagulación, el cual posee una carga positiva por la presencia del ion calcio; y se encuentra ahora una solución que contiene enlaces negativos en su estructura: el floculante.

Varios investigadores han atribuido la formación del flóculo al contacto electrostático entre estas dos sustancias. Se dice que el ion Ca^{2+} es el encargado de realizar la unión entre la impureza coagulada y el floculante (Ver *Figura 28*). [5, 10, 15]

En solución, y en una sola molécula de floculante, los grupos acrilato se disocian y sus cargas negativas se activan en la cadena del polímero, esto quiere decir que varios coágulos se pueden unir a una molécula de polímero hasta constituir una extensa red denominada flóculo, la cual puede tener hasta 1 centímetro o más de diámetro, facilitando una rápida sedimentación y por ende una producción de jugo más claro en menor tiempo.

Dicho de otra forma, el polielectrolito (floculante) con cargas negativas a lo largo de su cadena, se disocia y por un fenómeno electrostático de adsorción se adhiere a la superficie sólida (positiva) de la impureza, generando un cambio físico diferente al inicial. Dependiendo de esta carga, el sistema coloidal se mantendrá disperso en el medio acuoso o se verá favorecido el acercamiento entre partículas para producir moléculas de mayor tamaño (flóculos). [10]

Aunque los polímeros tienen cadenas extensas y estables, el flóculo formado es susceptible a perturbaciones externas como una agitación turbulenta, por lo tanto durante este procedimiento de floculación conviene que la agitación sea moderada para evitar que las partículas colapsen y como consecuencia se obtenga impurezas con el jugo (turbiedad alta) que supuestamente es claro.

Los dos criterios más importantes a la hora de elegir un floculante son su peso molecular y su grado de hidrólisis, sin embargo esta información se la proporciona el proveedor a la industria azucarera tras realizar una serie de experimentos *in situ* que evalúen las necesidades de la industria según su capacidad de proceso, como se ha venido mencionando.

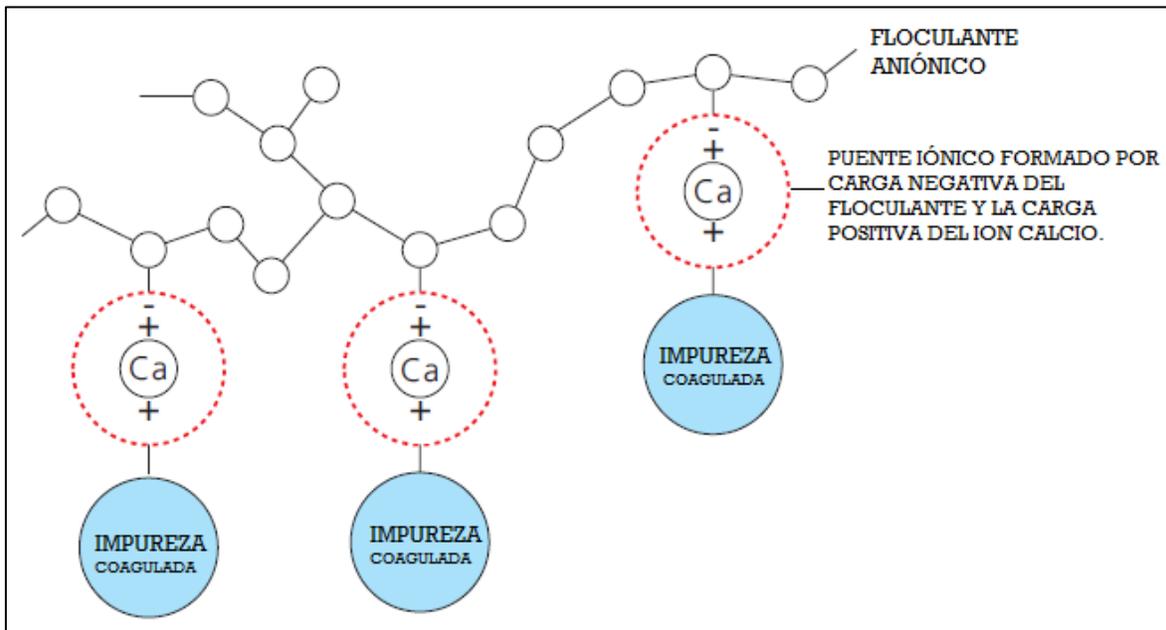


Figura 28. Entrelazamiento de los coágulos de impureza con la cadena del floculante a través del puente iónico del calcio. [10]

El "grado de hidrólisis" de un floculante cuantifica sus radicales activos (es decir sus especies iónicas) para determinar qué tan eficiente podría ser el mismo. En el caso de los floculantes aniónicos, el grado de hidrólisis denota la cantidad de fracciones acrilato que posee una molécula de floculante. Esto se hace basándose en la siguiente fórmula: [28]

$$\text{GRADO DE HIDRÓLISIS (\%)} = \frac{100 Y}{(X+Y)}$$

Dónde:

Y = Radicales -COOH ó -COONa
X = Radicales -CONH₂

Se ha comprobado experimentalmente que un grado de hidrólisis entre 25% y 40% (Ver *Gráfico 1*) asegura un adecuado funcionamiento del floculante, que es donde se obtienen valores menores de turbiedad en el jugo. [10, 27 - 30]

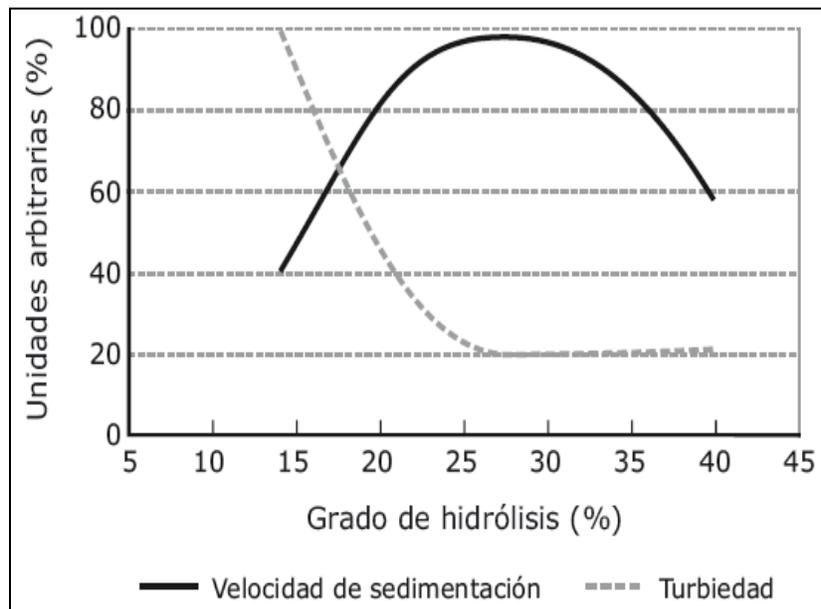


Gráfico 1. Influencia del grado de hidrólisis del floculante en la velocidad de sedimentación del jugo claro y en su turbiedad. [28]

5.11.2. PREPARACIÓN DEL FLOCULANTE

Acorde con la literatura, los floculantes sólidos deben ser aplicados al proceso de clarificación de jugo en forma de disolución, la cual debe ser preparada bajo unas condiciones controladas para obtener los rendimientos admisibles, esperados por la industria y por el proveedor.

Dado que se ha establecido experimentalmente que la calidad del floculante afecta directamente la clarificación de jugo, es necesario que las industrias azucareras tengan especial cuidado con el cumplimiento de sus condiciones de preparación.

Es importante aclarar que las condiciones de preparación son, de forma global, iguales para todos los floculantes aniónicos utilizados en la clarificación de jugo de las industrias azucareras. Sin embargo, como se ha venido mencionando, las variables fisicoquímicas a las cuales se debe realizar la preparación deben ser establecidas por cada industria tras hacer pruebas de laboratorio, para llegar a conclusiones numéricas a nivel industrial según sea la capacidad de proceso característica de la fábrica, para obtener los niveles más exitosos de eficiencia en el floculante que empleen. [1, 7, 10, 12]

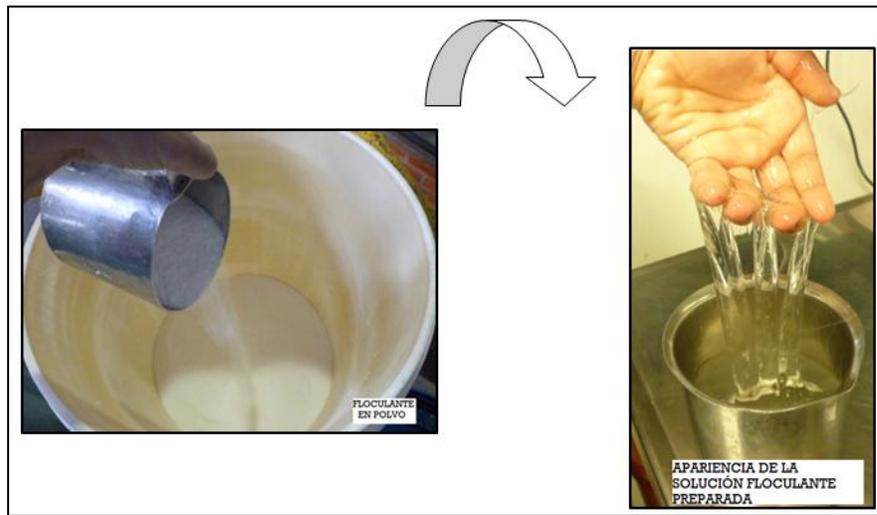


Figura 29. Representación de la apariencia de la solución floculante preparada

5.11.2.1. AGUA DE PREPARACIÓN DEL FLOCULANTE

Varios expertos recomiendan que el agua ocupe el 60% del nivel del tanque de floculante antes de adicionar los insumos para preparar la solución. Esto con el fin de que al momento de adicionar el floculante en polvo se alcance una total dispersión del mismo en el líquido sin producir masas aglomeradas. [10, 22]

5.11.2.1.1. CONCENTRACIÓN IÓNICA DEL AGUA

Aunque no se encontraron documentos que evidenciaran los valores numéricos de concentración iónica que debe tener el agua con la que se preparará el floculante, sí se corroboró que el agua empleada debe ser limpia y de baja dureza. Un ensayo sencillo para demostrar esto es preparar floculante con dos tipos de agua de concentración iónica conocida: una alta y una baja, y evaluar su impacto en la clarificación del jugo.

Para poder cumplir con el mecanismo de unión floculante-impureza a través del puente de Calcio mencionado con anterioridad, se requiere que el polímero tenga su superficie suficientemente habilitada para permitir que el

acercamiento electrostático entre su estructura negativa y las partículas de impureza positivas sea posible.

Cuando se emplea agua con una concentración iónica considerable, especialmente de carácter catiónico (principalmente con Ca^{2+} , Fe^{2+} y Al^{3+}) se le está proporcionando automáticamente al floculante los iones que se adsorberán a su superficie aniónica. Por lo tanto, es posible inferir que su calidad disminuirá antes de entrar en contacto con el jugo encalado, debido a que sus fracciones cargadas de acrilato ya se encuentran ocupadas por cationes, lo que conlleva a que durante la floculación no se obtengan los resultados esperados y por tanto las impurezas persistan en el jugo claro.

[10, 15, 29]

Se observó, por ejemplo, que cuando el agua con la que se prepara el floculante posee iones catiónicos (concentración iónica considerable), se tienden a formar precipitados (Ver *Figura 30*) tras la adición de soda cáustica (NaOH). Esto es lógico, si se consideran las reglas de solubilidad, las cuales indican que los únicos hidróxidos solubles son los formados con metales alcalinos (grupo 1 de la tabla periódica).

Este hecho es perjudicial para la clarificación del jugo, debido a que los precipitados actúan como impurezas y cuando se adiciona el floculante, éste comenzará a actuar sobre ellas, reduciendo sus puntos de acercamiento electrostático y minimizando su calidad de acción durante la clarificación.



Figura 30. Precipitado de hidróxidos metálicos ocasionado por la adición de soda cáustica a muestra de agua cargada iónicamente.

5.11.2.1.2. pH DEL AGUA

Considerando que la mayor eficiencia de los floculantes aniónicos se obtiene cuando el rango de pH va de la zona neutra a la alcalina (como consecuencia de una mayor disociación de los iones COO^- de su estructura en un medio donde existan iones OH^-), es importante ajustar el pH del agua de preparación del floculante hasta la zona mencionada.

La mayoría de las veces, la fábrica es quien determina los valores exactos de pH del agua tras hacer varios ensayos a nivel industrial o de laboratorio, pero existen valores aproximados de pH que aplican para cualquier industria y cualquier floculante aniónico, por ejemplo que el pH se encuentre dentro del rango de 8.0 - 9.5.

Históricamente, el pH del agua de preparación se ha ajustado empleando soda caustica pura (Na^+OH^-) porque ha presentado muy buenos resultados. Sin embargo, el error más común que cometen las industrias es adicionar este químico de forma acelerada al agua sin esperar a que se mezclen adecuadamente, lo que genera lecturas de pH incorrectas debido a que dan por sentado el valor antes de que el electrodo se estabilice y dé la señal de pH real a la que se encuentra la mezcla después de haber adicionado una cantidad determinada de soda.

Valores de pH totalmente diferentes a los señalados actuarán como una perturbación externa sobre la solución floculante y es posible que la cadena del polímero se rompa disminuyendo su calidad.

[10, 13, 15]

5.11.2.1.3 TEMPERATURA DEL AGUA

Según el principio de solubilidad, cuando dos sustancias poseen las mismas propiedades químicas, la capacidad de una determinada cantidad de líquido para disolver un sólido aumentará de forma proporcional con la temperatura.

Siguiendo este principio, durante la preparación del floculante, conviene que la temperatura del agua esté entre el rango aproximado de 30°C a 50°C con el simple objeto de facilitar la homogeneidad de la solución y disminuir el tiempo que tarda la misma en mezclarse.

Si bien la temperatura facilita la disolución del polvo en el agua, también puede actuar como una perturbación externa y por lo tanto debilitará la formación de las cadenas de polímero, obteniendo un floculante de baja calidad. [12, 22]

5.11.2.2. CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN FLOCULANTE

Cada proveedor del polímero proporciona con su producto especificaciones de la concentración a la cual se debe trabajar para obtener mejores resultados en la clarificación. De esta forma se encuentran documentos que garantizan que la concentración de la solución debe ser de 0.1%, de 0.25% ó del 0.3%. Como se puede observar, la concentración no es constante para cada polímero. Es por esta razón, que la solución más práctica es regirse bajo las condiciones que el proveedor dé sobre la concentración indicada, para que la industria prepare de este modo.

Se podrían alcanzar mejores resultados en la clarificación si la industria decidiera hacer pruebas antes de seleccionar a qué concentración desean preparar, pero este es un concepto que abarca mucho más que una decisión tomada a partir de una serie de resultados.

Como se mencionó en el *numeral 5.2.2 (Contenido de Material Extraño)*, la cantidad de materia extraña o de impurezas que ingresen a la fábrica depende de muchos factores, la mayoría incontrolables por la industria, como el clima en cual se esté cortando o quemando la caña para llevarla al ingenio, o los nutrientes y niveles de maduración alcanzados por la caña antes de su corte y molienda. Dichos factores externos, hacen que inevitablemente la cantidad de impurezas que ingresen al proceso no sean constantes, por lo tanto si bien se puede establecer que el floculante actúa mejor a una concentración determinada, puede ocurrir que esta concentración no sea la indicada cuando los factores con los que se trabajen sean diferentes (mayor cantidad de impurezas). Esto significa que el ingenio debería hacer una cantidad interminable de pruebas, según sus condiciones de trabajo en planta para determinar a qué concentración preparar la solución floculante que va a adicionar al proceso.

Aun teniendo en cuenta todo lo señalado, se ha establecido que como consecuencia de la viscosidad que se produce cuando el floculante está listo para realizar la floculación, la concentración del mismo no debe exceder el 0.5%.

Por todos los motivos presentados, LIPESA S.A establece que la concentración a la que se debe preparar su floculante LIPESA 1521M para la clarificación de jugo, es a 0.1%, concentración a la cual se ha decidido preparar el floculante en Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila desde hace varios años. [10, 12, 24, 31]

5.11.2.3. TIEMPO DE MADURACIÓN DE LA SOLUCIÓN FLOCULANTE

El tiempo de maduración es el tiempo que requiere el polímero en polvo, después de adicionarse al agua, para homogeneizarse por completo y para que su estructura se extienda adecuadamente en el líquido y pueda ejercer la acción floculante. Una vez cumplido este tiempo, el floculante se dosifica al proceso.

Se encuentra documentado que idealmente la maduración ocurre entre las tres y las cinco horas después de haber preparado la solución floculante.

Este es uno de los factores más incidentes en la floculación, pues aunque la preparación haya sido correcta, teniendo en cuenta todos los requisitos, si la solución no se deja madurando el tiempo necesario, su acción no será influyente en la clarificación como consecuencia de que las cadenas del polímero no se encuentran totalmente establecidas y activas.

Generalmente, cuando el tiempo de maduración es menor a las tres horas, se pueden observar grumos blancuzcos u "ojos de pescado" (Ver *Figura 31*) los cuales son masas de polímero cuyas cadenas no han sido totalmente abiertas y representan además de ineficiencias en la floculación, problemas en procesos posteriores, por ejemplo taponamiento de los filtros.

Si el floculante se conserva por más de seis horas después de haber sido preparado, dejará su carácter viscoso por la excesiva agitación y por ello también perderá su acción durante la floculación, produciendo un jugo claro turbio.

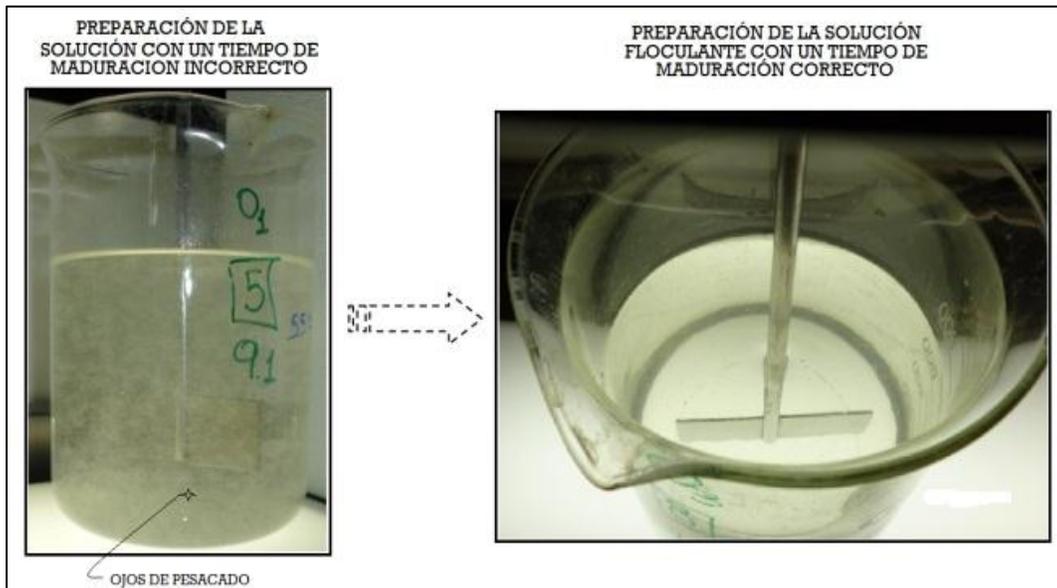


Figura 31. Comparación de la apariencia de la solución floculante respecto a su tiempo de maduración.

Las industrias incumplen con el tiempo de maduración de su solución floculante por varios motivos, entre ellos el hecho de que la capacidad de los tanques de floculante no es acorde con la cantidad de jugo enclavado que entra al proceso de clarificación, entonces la cantidad de floculante preparada no abastece la cantidad de jugo; por lo tanto la fábrica debe preparar el floculante y emplearlo tan pronto se acabe el preparado anteriormente, muchas veces incluso sin dos horas de maduración.

Se podría mencionar que el otro motivo corresponde a errores de algunos operarios a causa del desconocimiento que poseen de su puesto de trabajo.

Ambos motivos se pueden corregir o eliminar. La primera mediante un estudio correctivo de la estación de floculante, es decir, implementando nuevamente toda la instrumentación (tanques, bombas, tubería, entre otros) que se requiere para la preparación de floculante y la segunda mediante capacitaciones a los trabajadores encargados de la preparación, todo con el objeto de garantizar que a la solución sí se le dé el tiempo de maduración exigido para que aclare bien el jugo. [2, 10]

5.11.2.4. DOSIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN FLOCULANTE

La ventaja de los floculantes aniónicos sintéticos es que se aplican en dosis mínimas al tener elevada afinidad con las superficies sólidas, lo que produce que se eliminen casi todos los sólidos presentes en el jugo.

El término dosificación hace referencia a la cantidad de una sustancia que se debe aplicar a un proceso para garantizar una satisfacción mayoritaria o total sobre los resultados que se esperan obtener con la adición de dicha cantidad.

Cuando una industria tiene una serie de procesos que son continuos, y más aún cuando la industria trabaja las veinticuatro horas continuas del día (como Riopaila), los productos que se adicionen a los procesos también deben ser constantes para garantizar una transformación continua. Por eso, para controlar la cantidad que se debe adicionar de un insumo, se relaciona el mismo con la variable tiempo y/o con la cantidad del material que esté en el proceso.

La dosis del polímero la decide la industria según como esté obteniendo los resultados, pero éste sí es un concepto fácilmente modificable según sean las condiciones de entrada del material al proceso porque si el jugo contiene grandes cantidades de impurezas, sencillamente la fábrica puede decidir aumentar el flujo de floculante, y por tanto la dosis del mismo y viceversa.

En el caso del ingenio Riopaila, la dosis teórica con la que se ha venido aplicando el floculante al proceso es de 7 partes por millón (ppm), es decir, que por cada tonelada de jugo/hora, el floculante (en polvo) debe tener un flujo de 7 miligramos/hora.

$$\text{dosificación de 7 ppm} \rightarrow \frac{7 \text{ mg floculante}}{1 \text{ TON jugo encalado}}$$

Como se observa, la cantidad de floculante va referida al producto en polvo y no en solución. Por este motivo la industria debe hacer los cálculos necesarios para determinar el flujo de la solución floculante que aplique a su proceso.

Contrario a lo que opinan muchos operarios, no es correcto adicionar más floculante a la solución ya preparada (es decir intentar aumentar la concentración) cuando se estén presentando problemas con el jugo claro por el aumento de las impurezas de entrada en el jugo, porque como medida principal, la nueva solución no tendrá el tiempo de maduración necesario y no será de la misma calidad, se formarán grumos de floculante que después son

difíciles de eliminar del jugo y a causa de esto otros procesos se verán afectados. La corrección que se debe hacer es simplemente aumentar la dosis de floculante hasta observar que el jugo está saliendo lo suficientemente claro como para mandarlo al proceso de evaporación. [10, 12, 22]

5.11.2.5. AGITACIÓN EN LA PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN FLOCULANTE

Todo el proceso de preparación debe ser acompañado de una agitación que no debe superar las 30 revoluciones por minuto (RPM). Se debe encender la agitación mientras se adiciona agua al tanque de floculante, con la adición de soda caustica, con la adición de floculante en polvo y durante el tiempo de maduración de la solución.

La agitación permite la homogenización entre los componentes que se adicionan para preparar la solución floculante. Además, ayuda durante la maduración a que las cadenas del floculante se extiendan y activen eficazmente.

Se debe tener cuidado con la velocidad de la agitación pues puede influir en la estructura del floculante, es decir que velocidades superiores a la mencionada ocasionan rompimiento en la cadena y disminuyen la calidad del mismo. [12, 22]

5.11.3. PREPARACIÓN DE FLOCULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DE JUGO EN RIOPAILA

El ingenio Riopaila, al igual que la mayoría de las industrias azucareras, dispone de una zona de preparación de floculante que se denomina "Estación de Preparación de Floculante para la Clarificación de Jugo". En esta se encuentran los tanques de preparación y la instrumentación necesaria para producir una solución de buena calidad como tanques, tubería, accesorios y bombas de dosificación.

Dispone de dos tanques: uno de preparación y uno contenedor o de dosificación ubicados en línea vertical. Cuando el operario completa la preparación del floculante (y después de tener el tiempo de maduración), transvasa la cantidad al tanque contenedor para que comience a ser dosificada

a los clarificadores de jugo. De inmediato el operario vuelve a preparar la solución con el fin de tenerla madurada en la medida de lo posible, cuando la solución preparada anteriormente y que está siendo dosificada se termine. Esto con la finalidad de que el flujo de solución floculante al proceso de clarificación sea continuo durante el tiempo de operación de la fábrica.

Después del “tanque contenedor” se ubican las bombas de dosificación de la solución. De la tubería de salida de la bomba se desprenden varias derivaciones, cada una direccionada hacia los clarificadores de jugo del ingenio. El operario tiene la opción de manipular el flujo de floculante según el clarificador que esté empleando, es decir que si uno de ellos no está en funcionamiento, puede interrumpir el flujo de floculante hacia el mismo, previniendo derrames o desperdicios del producto. Se debe recordar que el lugar donde tienen contacto el jugo con el floculante es en el Tanque Flash ubicado en la parte superior de cada clarificador.

Teóricamente, el “tanque de preparación” debe estar equipado con una serie de accesorios que faciliten una correcta preparación. La *Tabla 11* resume los más representativos.

ACCESORIO	FUNCIÓN
pHmetro	Controlar adecuadamente el pH del agua de preparación de floculante.
Línea de agua caliente	Garantizar total homogeneidad de la solución en menor tiempo.
Termómetro	Controlar adecuadamente la temperatura del agua de preparación de floculante.
Equipo dispersor de floculante en polvo	Evitar la formación de grumos y lograr mejor dispersión del polvo en el agua.
Regulador de velocidad de agitación	Conocer y controlar la velocidad de agitación de la solución.
Balanza analítica	Cuantificar la cantidad de floculante a adicionar y proporcionar la concentración exacta del floculante
Medidor de flujo de floculante	Este medidor debe ir acoplado a la cantidad de jugo enalado que entre al proceso de clarificación. Posee gran relevancia ya que con este es posible controlar de forma automática la dosis de floculante según la cantidad de jugo.

Tabla 11. Descripción de las funciones de los accesorios necesarios para la preparación de floculante.

Los operarios del ingenio Riopaila no disponen de un pHmetro. Para aumentar el pH del agua se adiciona un volumen de soda caustica controlado con una probeta, pero se desconoce si la cantidad agregada es la apropiada o no.

Actualmente no se dispone de una línea de agua caliente ni de termómetro, por lo tanto el agua que se adiciona es la misma que corre por todas las

estaciones de la fábrica. Aunque es agua potable, muchas veces la estación de potabilización de agua posee problemas y como consecuencia de esto el agua no llega limpia ni con baja dureza, lo que ocasiona que el floculante ejerza su acción antes de entrar en contacto con el jugo (Ver *Figura 32*), provocando clarificaciones muy deficientes. Como la temperatura del agua es aproximadamente de 20°C a 25°C, la homogenización de la solución tarda más de lo que debería.



Figura 32. Diferencia entre un floculante preparado con agua limpia, y uno preparado con agua sucia.

El equipo dispersor de floculante no se utiliza desde hace varios años. Actualmente la adición del polímero en polvo la hacen los operarios manualmente agitando su mano para tratar de que éste caiga en forma vibrátil con el flujo de agua fría. (Ver *Figura 33*).



Figura 33. Equipo dispersor de floculante y flujo de agua de preparación.

La agitación de la solución se hace con aireación y es controlada manualmente. Por lo tanto, se desconoce la velocidad de la misma, lo que podría estar causando perturbaciones en las soluciones preparadas y por esto floculante de baja calidad.

Además, hay taponamiento de los orificios de la flauta, lo que ocasiona una mala distribución del aire, y por tanto de la agitación. Por tal, se recomienda que la agitación sea mecánica.



Figura 34. Sistema de aireación de la solución floculante.

La cantidad de floculante que adicionan los operarios al tanque está basada en la capacidad de un recipiente con el que se pueden medir aproximadamente 724 gramos. El hecho de no disponer de una balanza analítica infiere que la concentración de la solución no es constante, es decir que no se están teniendo en cuenta las especificaciones del proveedor para obtener buenos resultados en la floculación. (Ver *Figura 35*).



Figura 35. Recipiente medidor de floculante en polvo del Ingenio Riopaila.

Además, la adición manual del floculante es una operación poco confiable porque los operarios no adicionan exactamente la misma cantidad todas las veces.

Considerando el tamaño del tanque de preparación, los operarios deben adicionar el recipiente nueve punto dieciséis (9.16) veces para lograr la concentración de 0.1% (adicionar 6.63 Kg de floculante en polvo) con la que se trabaja en el ingenio, sin embargo cada uno adiciona el número de veces que cree conveniente según como observen físicamente la clarificación del jugo.

No existe un medidor del flujo de floculante que este acoplado a la cantidad de jugo. Los operarios saben por valores porcentuales, la cantidad de floculante que sale de las bombas, pero como se emplean varios clarificadores, este flujo se divide entre los que se encuentren en funcionamiento y se vuelve desconocido. Entonces no se controla la dosificación de floculante. A pesar de esto, por la experiencia en su puesto, los operarios aprendieron a reconocer los valores a los que deben manipular las bombas para obtener un determinado flujo de solución floculante y por tanto una dosis del mismo.

Un aspecto muy preocupante que actualmente posee el ingenio es la capacidad de sus tanques. El de preparación tiene una capacidad de seis punto sesenta y tres metros cúbicos (6.63 m^3) y el contenedor es de seis metros cúbicos (6 m^3). Como se observa cada que se prepare floculante y se trasvase al tanque contenedor, en el de preparación quedarán cero punto seis metros cúbicos de floculante preparado (0.6 m^3) (Ver *Figura 36*). Dado a que para cumplir con el abastecimiento de floculante y jugo el operario debe preparar inmediatamente, algunos de ellos lo hacen sobre esa cantidad restante en el tanque (sobre los 0.6 m^3). Por lo tanto la concentración de la nueva solución y el resto de condiciones no son las mismas, son superiores. Aspecto que no se tiene en cuenta.

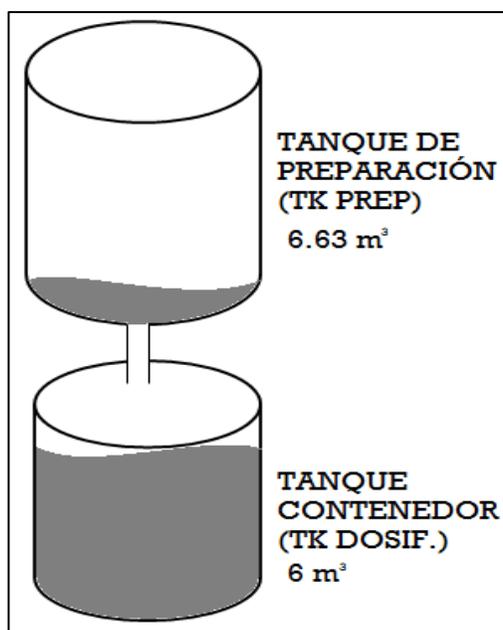


Figura 36. Ilustración de la capacidad de los tanques al contener la solución floculante.

En la *Tabla 12* se observa el equipamiento ideal que debería tener la estación de preparación de floculante y el estado actual del mismo en el ingenio.

Los problemas mecánicos no son los únicos que pueden influir en los resultados de la clarificación respecto a la preparación de floculante. Dado a que en esta estación existen varios operarios, cada uno trabaja de forma distinta según lo que haya aprendido en su experiencia, por lo tanto no existe una metodología clara y única.

Una forma de reducir o eliminar estas diferencias en el método de preparación de floculante es capacitando los operarios, indicándoles de qué forma deben

trabajar en unas condiciones normales, porque en condiciones problemáticas se debe actuar tal como está en la *Norma Interna de Riopaila (FEL-002)* acerca de la Clarificación de Jugo: "En la práctica, los casos que se presenten y no se encuentren contemplados en la presente norma deben ser resueltos por quien la ejecuta, en beneficio de la Empresa y de acuerdo con las Políticas Generales establecidas en la Organización." [24]

	CANTIDAD DE TANQUES	AGUA DE PREPARACIÓN DEL FLOCULANTE			DISPERSOR DE FLOCULANTE EN POLVO	TIPO DE AGITACIÓN	TIEMPO DE MADURACIÓN
		TIPO DE AGUA	CONTROL DE TEMPERATURA	CONTROL DE pH			
IDEAL	Como mínimo tres: 1 tanque de preparación y 2 tanques de dosificación	Potable, de baja dureza, libre de sólidos solubles o insolubles	La temperatura debe encontrarse en el rango de (30-55) °C, bien sea por la combinación de agua caliente y fría o la entrada directa de agua caliente cercana al rango establecido. Para verificación de la misma, debe existir un termómetro antes de la entrada de agua al tanque de preparación.	El pH del agua de preparación debe estar en el rango de 8 – 9.5. Para ello adicionar soda cáustica y controlar la cantidad de la misma con un pHmetro.	Importante para establecer una mayor superficie de contacto entre el floculante en polvo y el agua para evitar formación de grumos, facilitar la homogeneidad de la mezcla y permitir que el tiempo de maduración del floculante sea menor. Concentración ideal: 0.1%	Preferible que sea mecánica, con control de velocidad. Esta debe ser moderada sin exceder las 30 RPM.	Entre las 3 y 5 horas después de haber preparado el floculante.
ACTUAL	Dos tanques: 1 de preparación y otro de dosificación	Se emplea agua la mayoría de las veces potable, de dureza desconocida.	Existe la posibilidad de adaptar agua caliente, pero esta contiene un elevado nivel de sólidos. La temperatura actual del agua no excede los 27°C, lo que dificulta la homogenización de la mezcla y hace que tiempo de maduración sea más tardío. Además, no se cuenta con termómetro.	Se adiciona soda cáustica con una probeta, cuya cantidad varía según el operario de turno. Al no poseer un pHmetro se desconoce el pH final del agua.	No se encuentra en funcionamiento por fallas mecánicas. El floculante en polvo es adicionado manualmente por los operarios. Concentración promedio actual: 0.09%	Aireación modulada manualmente, la cual presenta la mayoría de las veces taponamiento de los orificios de las flautas. Se desconoce la intensidad de la misma y cada operario la modula como cree conveniente.	En promedio, actualmente el tiempo de maduración del floculante es de 1.7 horas.

Tabla 12. Comparación entre el equipamiento ideal y el actual de preparación de floculante en el Ingenio Riopaila.

Se realizó una comparación entre dos operarios para analizar la forma en que preparan el floculante LIPESA 1521M y establecer si habían diferencias significativas entre cada metodología.

En el estudio se evaluaron, midieron y/o determinaron los siguientes aspectos a cada operario:

- Temperatura del agua de preparación.
- pH del agua antes y después de adicionar la soda.
- Cantidad de soda caustica adicionada, volumen de agua a la cual se comenzó a adicionar y tiempo dado para que se mezclaran.
- Intensidad de la aireación como método de agitación.
- Estimación de la cantidad de floculante en polvo adicionada, a partir del número de veces que emplearon el recipiente medidor de floculante en polvo para la preparación y forma de adicionarlo.
- Volumen de agua presente en el tanque al adicionar el floculante.
- Tiempo de maduración antes de comenzar a dosificar la solución preparada.
- Análisis en el laboratorio de la densidad y viscosidad del floculante antes de ser dosificado, es decir, con el tiempo de maduración.

Se observaron situaciones críticas, por ejemplo que el agua efectivamente tiene una temperatura cercana de 25°C, que ambos operarios adicionan de forma diferente el floculante en polvo y en proporciones distintas, que el volumen de agua para adicionar la soda caustica y el floculante en polvo no es la misma, tampoco sus cantidades ni el tiempo de mezcla entre los componentes de la solución. Además de esto, la intensidad de la aireación es preocupante pues tienden a creer que al trasvasar la solución al tanque contendedor se debe poner al máximo, lo que posiblemente causa rompimientos en la cadena del polímero y el trabajo de preparación se torne inservible. También se observó que solo le dan en promedio 1.7 horas de maduración al floculante, probablemente por las exigencias de la cantidad de jugo encalado que entra al proceso.

Como es de esperarse, considerando las diferencias entre la metodología de preparación de cada operario, los resultados de los análisis de densidad, viscosidad y concentración son muy diversos.

A pesar de esto, el "operario B" es quien más acerca a la forma de preparación de floculante ideal.

Los resultados del estudio se presentan en la *Tabla 13*.

		OPERARIO A	OPERARIO B
FLOCULANTE		LIPESA 1521 M	LIPESA 1521 M
H₂O DE PREPARACIÓN	TEMPERATURA (°C)	25	27
	pH ANTES DE SODA	7,71	7,26
	pH DESPUES DE SODA	9,46	8,32
SODA CAUSTICA	VOLUMEN DE AGUA AL ADICIONAR (m ³)	3,27	3,18
	VOLUMEN SODA (mL)	300	370
	TIEMPO DE MEZCLA (min)	2	15
AIREACIÓN		100% mientras se adiciona el floculante en polvo. 50% en la maduración. 100% al transferir la solución preparada al tanque contenedor	100 % mientras se prepara la solución floculante. 50% durante toda la maduración
ADICIÓN DEL FLOCULANTE	NUMERO DE TARROS	8	9
	MASA APROXIMADA (Kg)	5,79	6,52
	VOLUMEN TANQUE (m ³)	4,34	3,18
	FORMA DE ADICIÓN	Lenta, de forma manual y agitada en contacto con el agua de caída.	Lenta, de forma manual y agitada en contacto con el agua de caída
	TIEMPO DE MADURACION (h)	2	1,5
ANÁLISIS SLN FLOCULANTE PREPARADA	DENSIDAD (Kg/m ³)	0,9961	0,9895
	VISCOSIDAD (cPs 12 RPM)	108,5	40,5
	CONCENTRACIÓN (%)	0.087	0.098

Tabla 13. Resultados del estudio comparativo sobre la metodología de preparación de floculante de dos operarios.

En vista de los inconvenientes señalados a lo largo de esta sección, además de realizar ensayos a nivel de laboratorio para determinar las variables fisicoquímicas a las cuales se debe preparar el floculante LIPESA 1521M, el ingenio Riopaila pidió realizar una cotización para cambiar completamente la estación de preparación de floculante, esperando que de este modo eliminar errores en la preparación del mismo, mejorar la clarificación de jugo y reducir costos en insumos. Este documento se encuentra en poder del ingenio.

También se elaboró un documento que evidencia los resultados de los estudios realizados con base en el proyecto que se pretende desarrollar, describiendo de forma operacional el modo en que se debe preparar el floculante, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el presente trabajo (Ver Anexo 1).

La *Figura 37* resume los pasos operativos para la preparación del floculante y la *Figura 38* ilustra de forma general el equipamiento que tendrá la nueva estación de preparación de floculante cuando el ingenio Riopaila considere apropiado poner en marcha el proyecto.

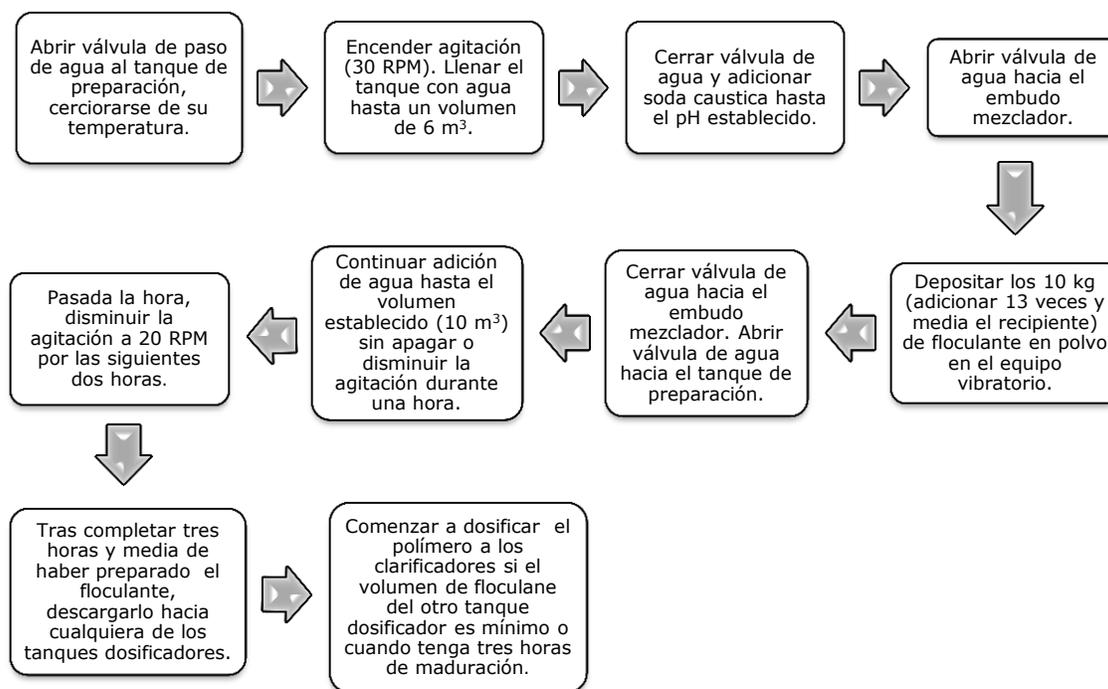


Figura 37. Diagrama de flujo básico para la preparación del floculante LIPESA 1521M.

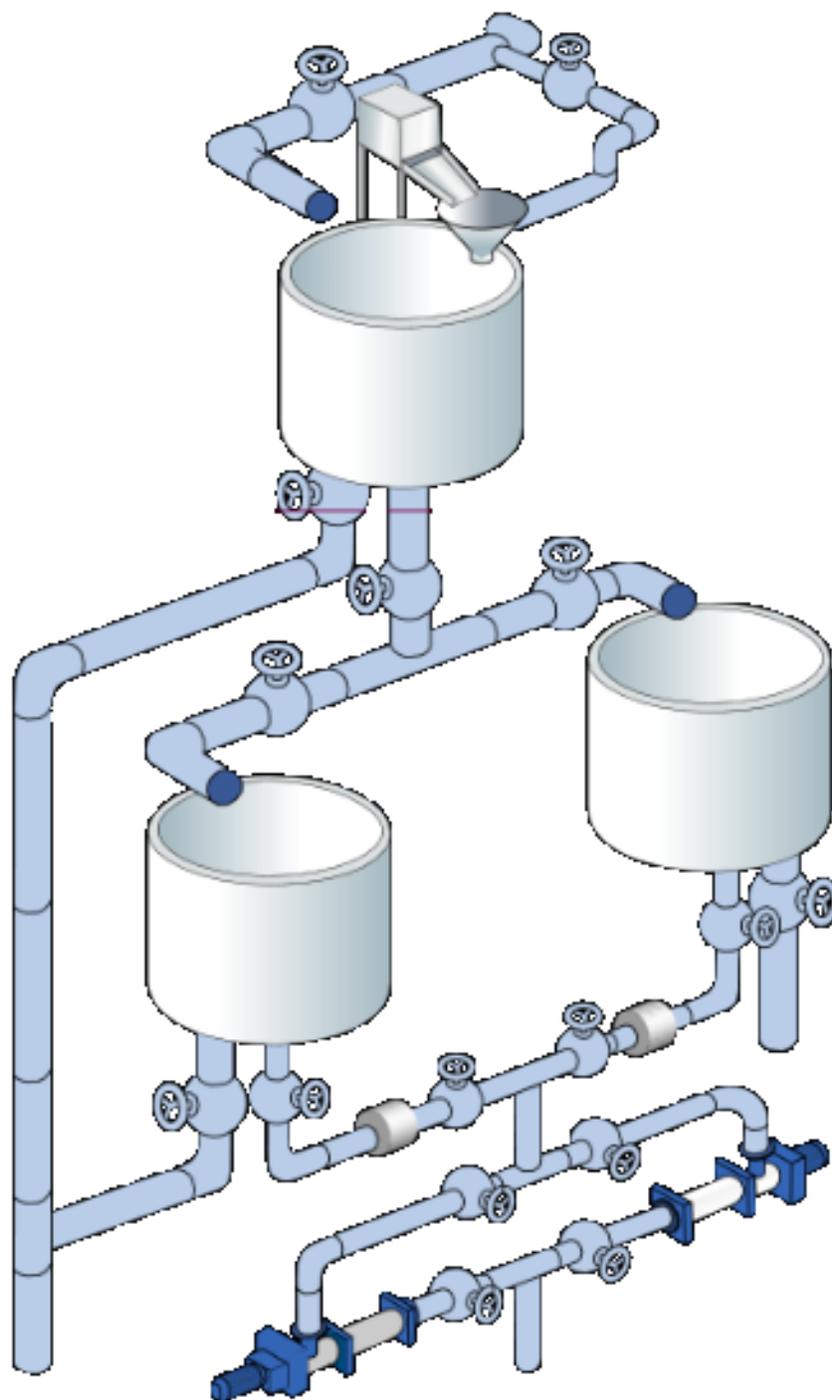


Figura 38. Sistema de preparación de floculante para la estación de clarificación de jugo en Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila.

6. METODOLOGÍA

6.1. MUESTRAS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS FISICOQUÍMICAS

En cada ensayo se desarrollaron las siguientes actividades:

- Preparación de floculante con las condiciones fisicoquímicas a evaluar (método de preparación, dosificación, pH, temperatura).
- Clarificaciones de jugo a escala (utilizando como agente de floculación la solución de floculante preparada), que permitieron establecer la condición fisicoquímica apropiada para preparar el floculante en una prueba determinada, considerando como factor de evaluación el valor de turbiedad de jugo claro obtenido.

Se tuvieron en cuenta valores del jugo diluido, es decir, antes de adicionar floculante y jugo clarificado (después de la adición de floculante). La observación de estos factores fueron propiamente los que influyeron en la decisión de cuál condición fisicoquímica es la indicada para preparar el floculante al momento de desarrollar el ensayo determinado de dosis, pH, temperatura o metodología de preparación.

6.1.1. JUGO DILUIDO (JD)

Para que las únicas variables determinantes en la calidad del jugo clarificado (obtenido a escala) fueran las correspondientes a la solución floculante preparada, se garantizó el control de variables propias del proceso como pH y temperatura final del jugo diluido justo antes de comenzar la clarificación. Para ello, se adicionó cal hasta alcanzar un pH constante y se calentó el jugo hasta obtener una misma temperatura en todos los ensayos.

VARIABLES CONTROLADAS JUGO DE CAÑA	
HORA MUESTREO ¹	01:30 p.m.
VOLUMEN JUGO ² (mL)	700
pH FINAL DEL JUGO ³	7.8
TEMPERATURA FINAL DEL JUGO ⁴ (°C)	98

Tabla 14. Variables controladas del jugo de caña en los análisis experimentales.

¹ Los muestreos de jugo se realizaron a la misma hora en todos los ensayos, con el objetivo de demostrar la variabilidad que posee el jugo de caña que entra al proceso a una misma hora, en diferentes días.

² Se garantizó que el volumen de jugo empleado en todos los análisis fuese 700 mL, ya que con este valor se realizaron cálculos importantes para el desarrollo del trabajo.

³ Debido a que en el ingenio el proceso de encalado varía según el pH inicial con el que entre el jugo al proceso, la cantidad de cal que se adiciona siempre es diferente, por lo tanto, el pH del jugo encalado (jugo apto para la clarificación) generalmente no tiene un mismo valor. Por tal motivo, se tomó la determinación de controlar la variable del pH del jugo encalado a un valor constante de 7.8 (pH indicado por la reglamentación interna de Riopaila). [24]

⁴ La temperatura ideal a la cual debe estar el jugo de caña antes de iniciar la clarificación es aproximadamente a 100°C. Sin embargo, la máxima temperatura que se logró alcanzar en el laboratorio al hacer la similitud del proceso de calentamiento fue 98°C. Por tal motivo, en todos los ensayos se garantizó que la temperatura final del jugo, justo antes de comenzar la clarificación fuese de este valor.

NOTA: Se registraron, junto con los resultados, variables propias del proceso tales como el pH del jugo diluido, antes de ser encalado.

6.1.1.1. DETERMINACIÓN PORCENTAJE SÓLIDOS DEL JUGO DILUIDO (°BRIX)

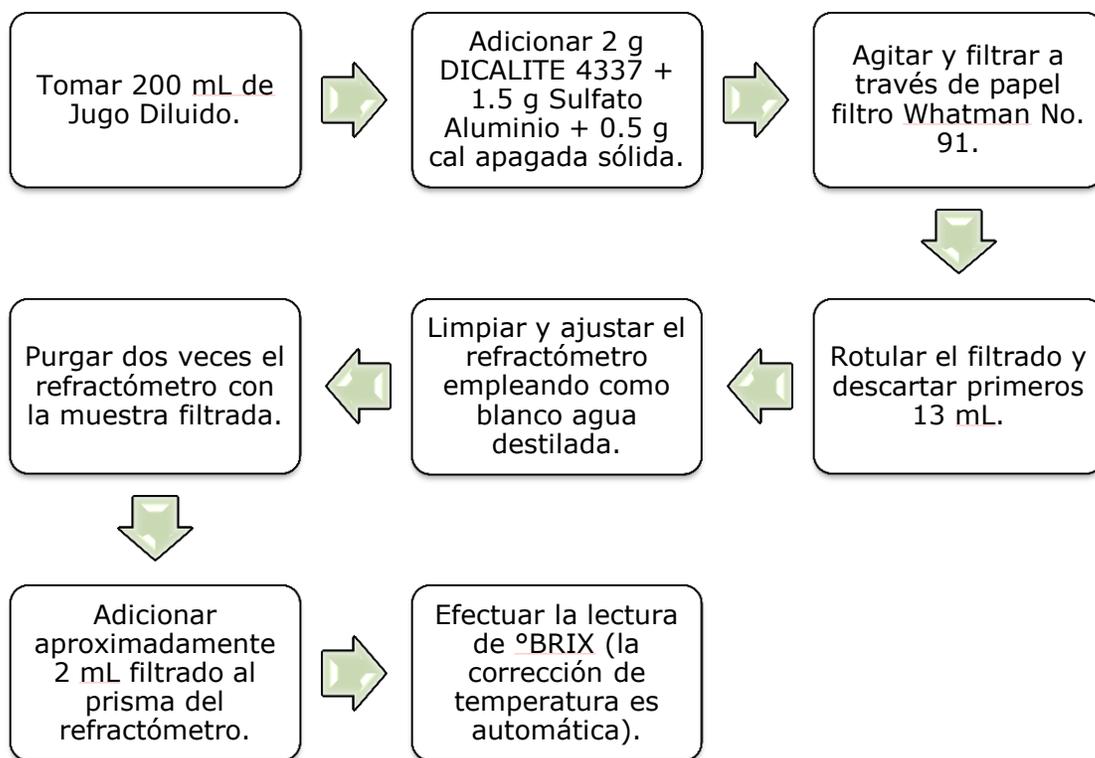


Figura 39. Diagrama de flujo de la Determinación del Porcentaje de Sólidos del Jugo Diluido.

6.1.1.2. DETERMINACIÓN DE LA POL DEL JUGO DILUIDO (PORCENTAJE APARENTE DE SACAROSA)

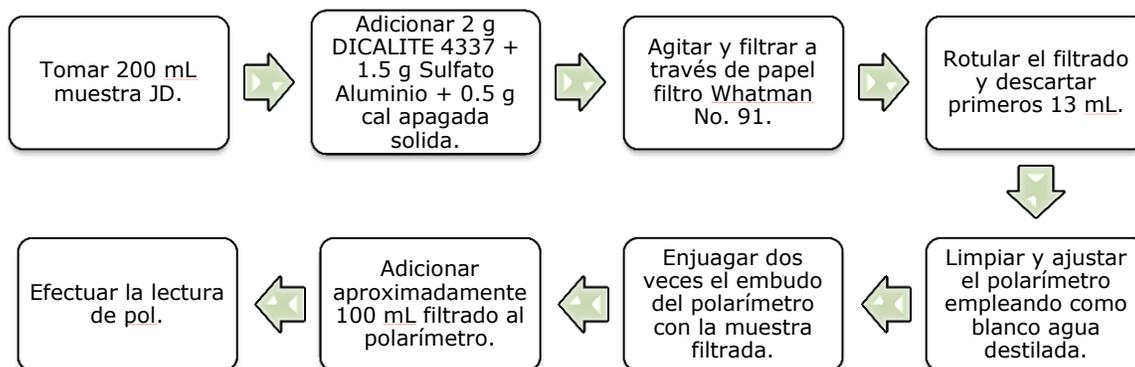


Figura 40. Diagrama de flujo de la Determinación de Pol del Jugo Diluido.

6.1.1.3 DETERMINACIÓN DE COLOR DEL JUGO DILUIDO (MÉTODO FOTOMÉTRICO)

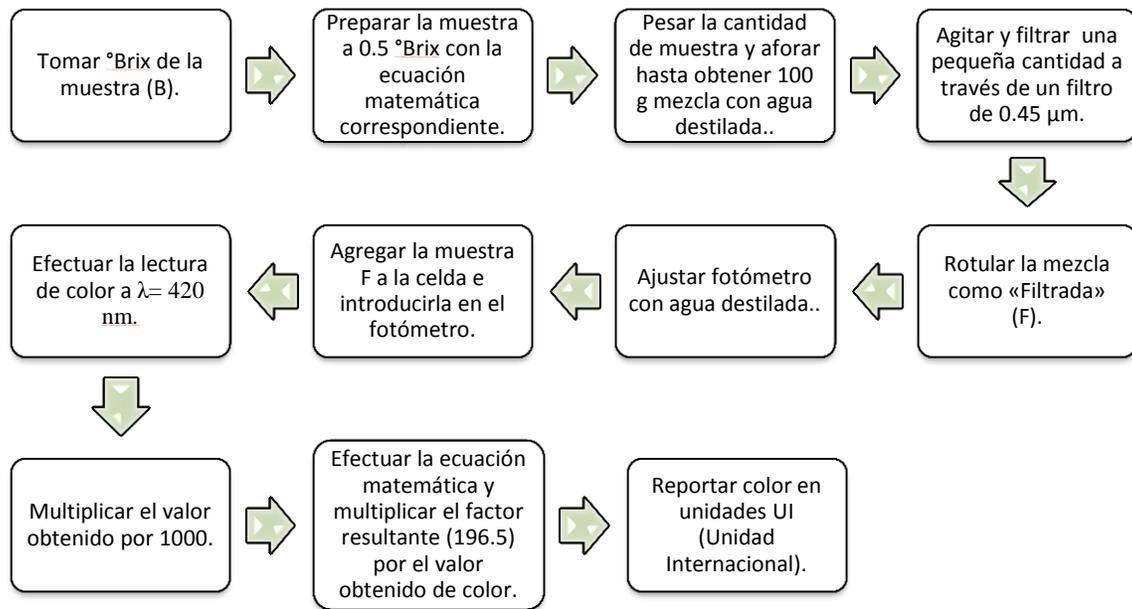


Figura 41. Diagrama de flujo de la Determinación de Color del Jugo Diluido.

6.1.1.4. DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD DEL JUGO DILUIDO (MÉTODO FOTOMÉTRICO)

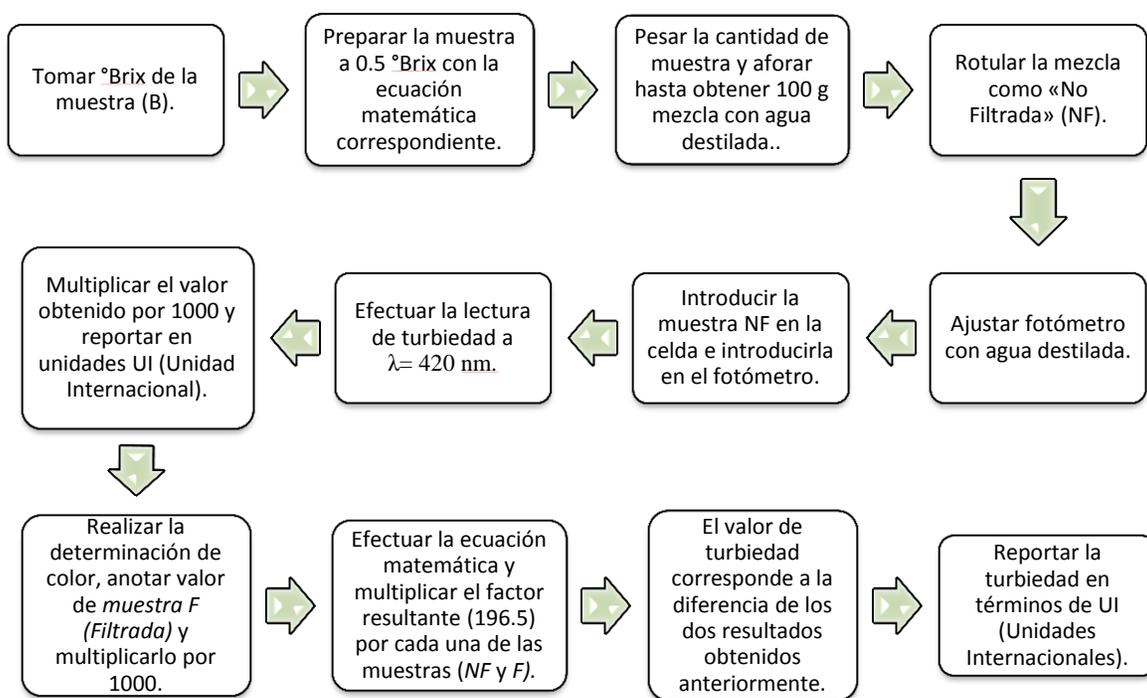


Figura 42. Diagrama de flujo de la Determinación de Turbiedad del Jugo Diluido.

6.1.2. JUGO CLARIFICADO (JC)

La turbiedad del jugo claro es una de las propiedades que más se controlan en el ingenio y es por medio de la cual se pueden deducir deficiencias en la clarificación de jugo a causa del floculante. Por lo tanto, en los ensayos realizados a escala, el valor de turbiedad del jugo claro fue el que se consideró como factor de respuesta para establecer las variables fisicoquímicas de la preparación de floculante, el cual debe ser igual o menor a 3500 UI.

Teniendo el jugo claro, se realizaron las mismas determinaciones fisicoquímicas del jugo diluido para observar otros factores que también son relevantes en un ingenio como la cantidad de sacarosa aparente (pol) y solidos del jugo ($^{\circ}$ Brix).

Adicional a lo anterior, se observó el volumen de compactación de los lodos, según cada floculante preparado, factor que también conviene controlar para aumentar la velocidad de la clarificación y sobre el cual también influye la calidad del floculante.

6.1.2.1. DETERMINACIÓN PORCENTAJE SÓLIDOS DEL JUGO CLARO ($^{\circ}$ BRIX)

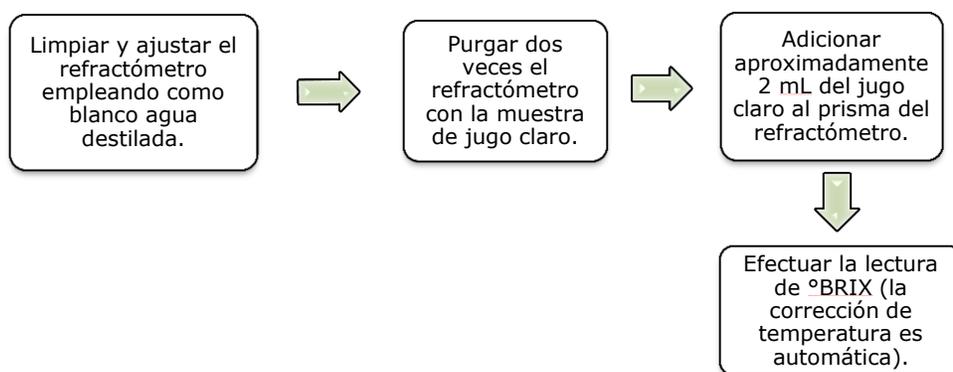


Figura 43. Diagrama de flujo de la Determinación del Porcentaje de Sólidos del Jugo Claro.

6.1.2.2. DETERMINACIÓN DE POL DEL JUGO CLARO (PORCENTAJE APARENTE DE SACAROSA)

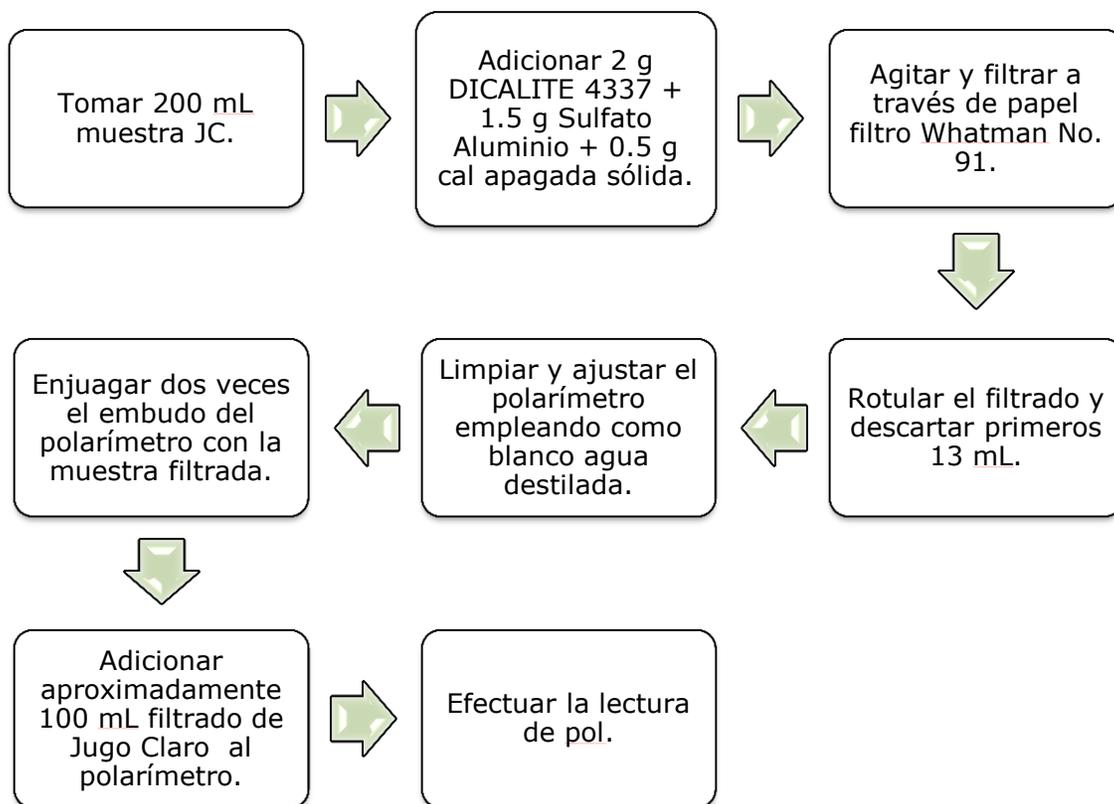


Figura 44. Diagrama de flujo de la Determinación de la Pol del Jugo Claro.

6.1.2.3. DETERMINACIÓN DE COLOR DEL JUGO CLARO (MÉTODO FOTOMÉTRICO)

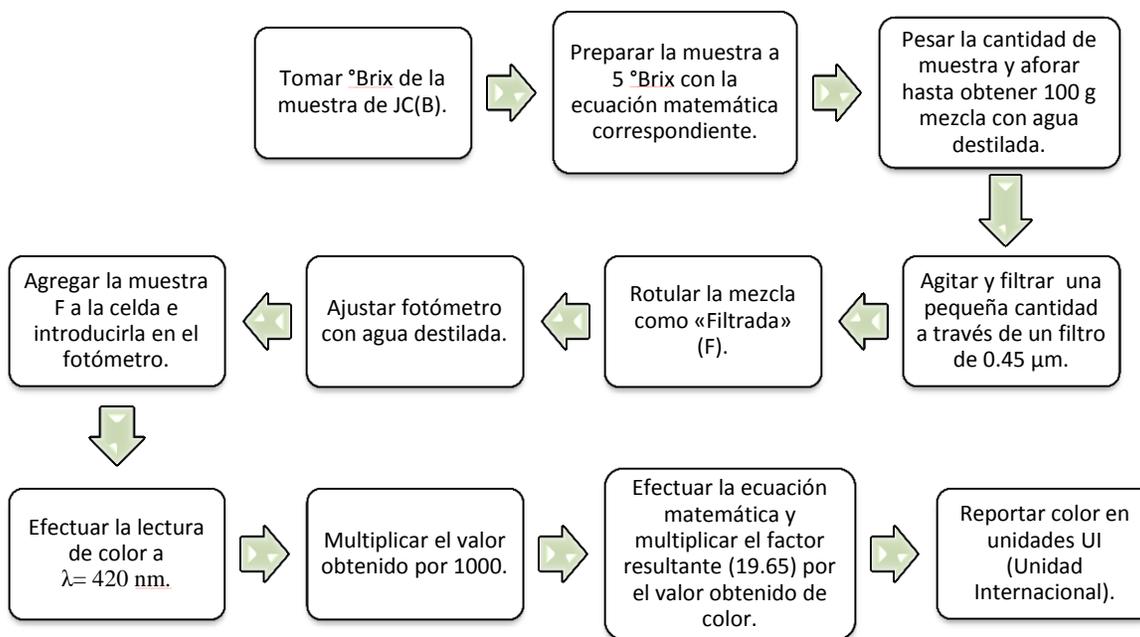


Figura 45. Diagrama de flujo de la Determinación de Color del Jugo Claro.

6.1.2.4. DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD DEL JUGO CLARO (MÉTODO FOTOMÉTRICO)

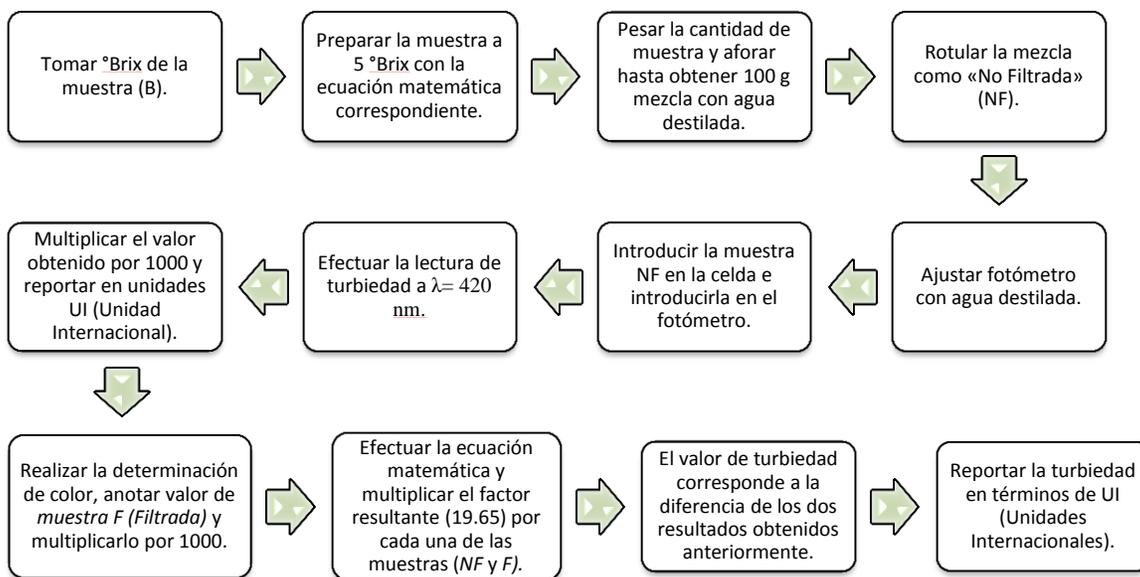


Figura 46. Diagrama de flujo de la Determinación de Turbiedad del Jugo Claro.

6.1.2.5. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LOS LODOS

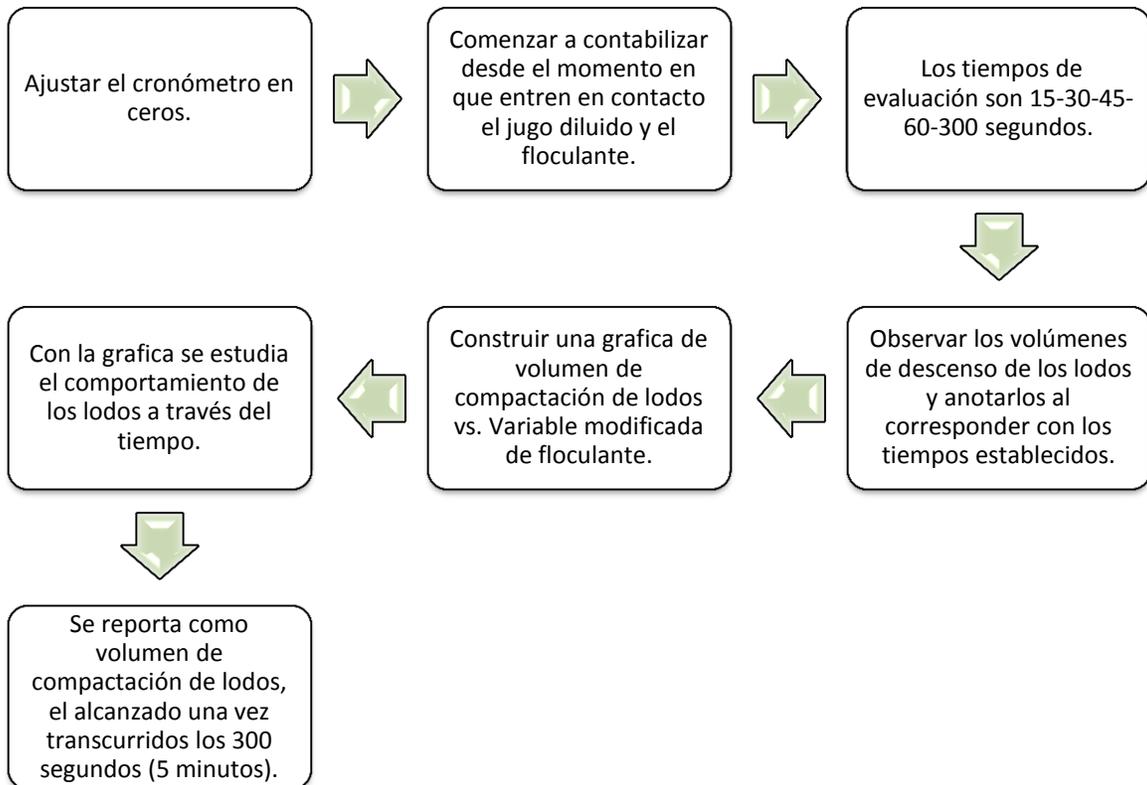


Figura 47. Diagrama de flujo de la Determinación del Volumen de Compactación de los Lodos.

6.1.3. FLOCULANTE

Para establecer las condiciones apropiadas de preparación de floculante, se realizaron cuatro pruebas. El resultado obtenido en una influyó en el desarrollo de la otra. De esta manera, las preparaciones a escala se realizaron de la misma forma, pero teniendo en cuenta la variable modificada.

Además de las cuatro pruebas, se realizó una prueba demostrativa para analizar la influencia que posee el tipo de agua (concentración iónica) con la que se prepare el floculante en su calidad.

Las variables que se controlaron en todos los ensayos fueron el volumen final de solución floculante, la concentración del mismo y por consiguiente, la cantidad de floculante en polvo que se debía adicionar para alcanzar la concentración deseada. También se garantizó que las soluciones tuvieran el mismo tiempo de maduración y velocidad de agitación, excepto en el primer ensayo de "Metodología de Preparación de Floculante" pues era importante que el tiempo de maduración y la agitación fuesen exactamente los que los operarios le estaban dando en la actualidad, para poder comparar con las sugerencias del proveedor.

VARIABLES CONTROLADAS PREPARACIÓN FLOCULANTE	
VOLUMEN DE SOLUCIÓN (mL)	800
CONCENTRACIÓN SOLUCIÓN (%)	0.1
CANTIDAD FLOCULANTE EN POLVO (g)	0.8
TIEMPO MÍNIMO DE MADURACION (h)	3
VELOCIDAD AGITACIÓN (RPM)	(1-2) h = 30
	(3-4) h = 20

Tabla 15. Variables controladas en el procedimiento de preparación de floculante a escala.

6.1.3.1. DETERMINACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE

6.1.3.1.1. PREPARACIÓN DE FLOCULANTE SEGÚN OPERARIOS

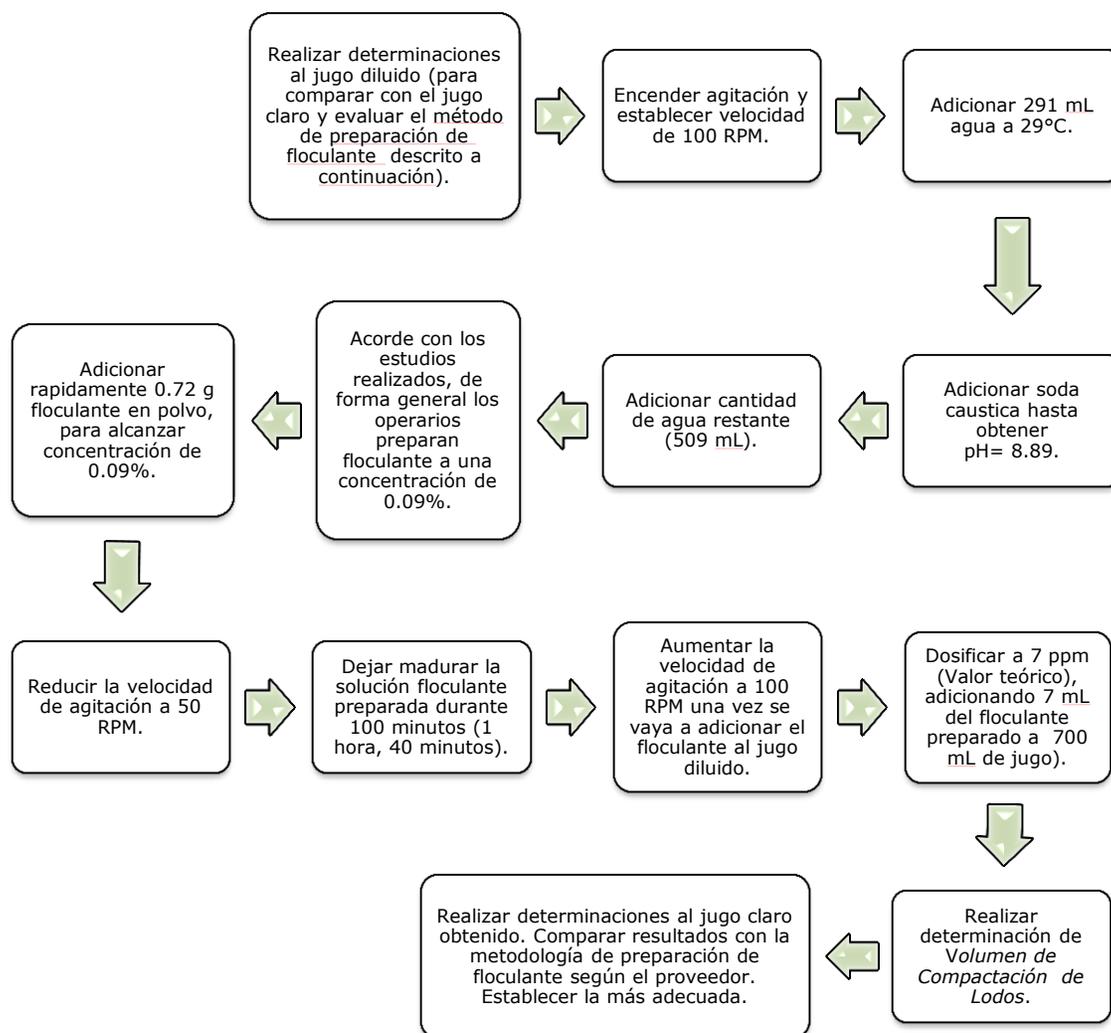


Figura 48. Diagrama de flujo de la Preparación de Floculante según Metodología de Operarios.

6.1.3.1.2. PREPARACIÓN DE FLOCULANTE SEGÚN ESPECIFICACIONES DEL PROVEEDOR

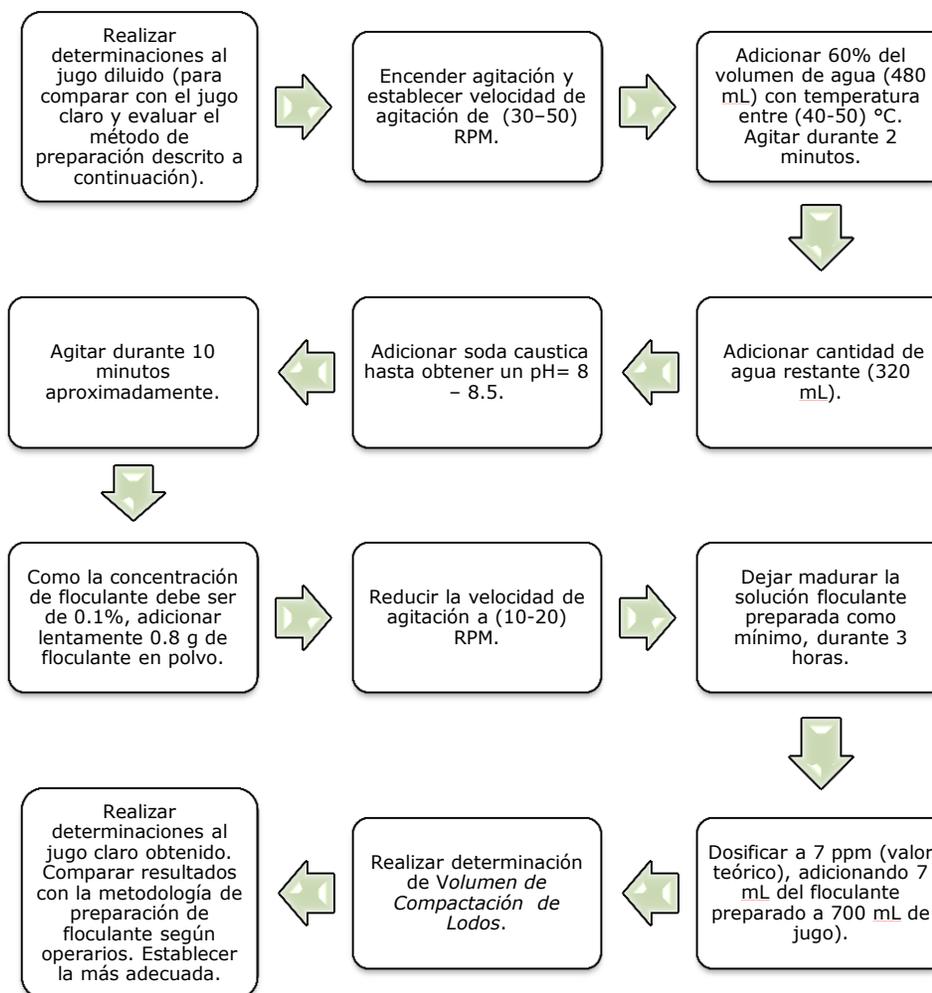


Figura 49. Diagrama de flujo de la Preparación de Floculante según Metodología recomendada por Proveedor.

6.1.3.2. DETERMINACIÓN DE LA DOSIS APROPIADA DE FLOCULANTE

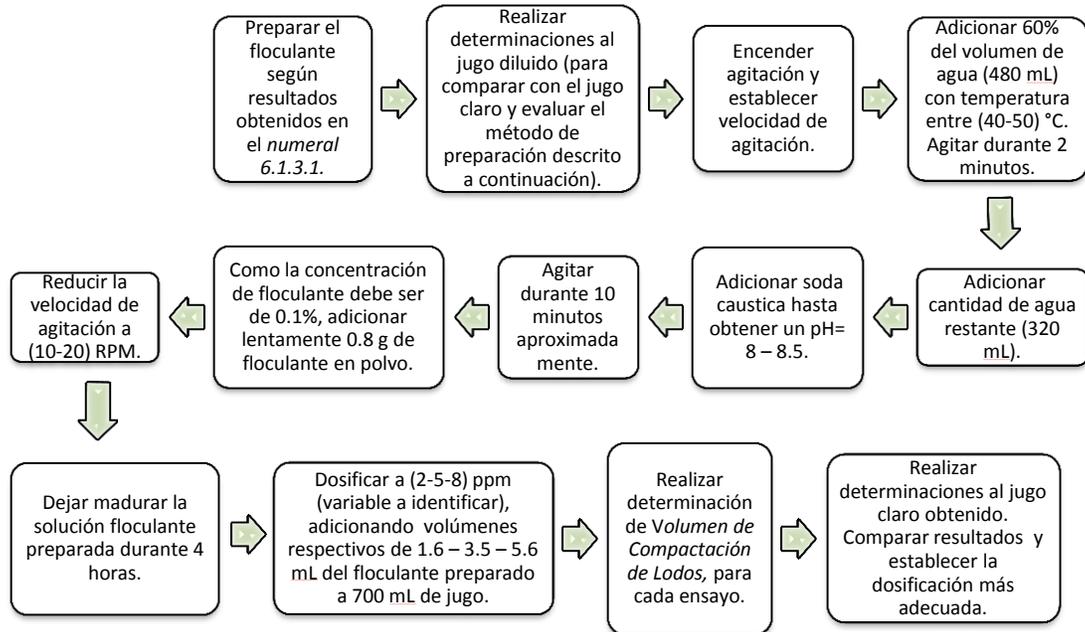


Figura 50. Diagrama de flujo de la Determinación de la Dosis Apropriada de Floculante.

6.1.3.3. DETERMINACIÓN DEL pH APROPIADO DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE

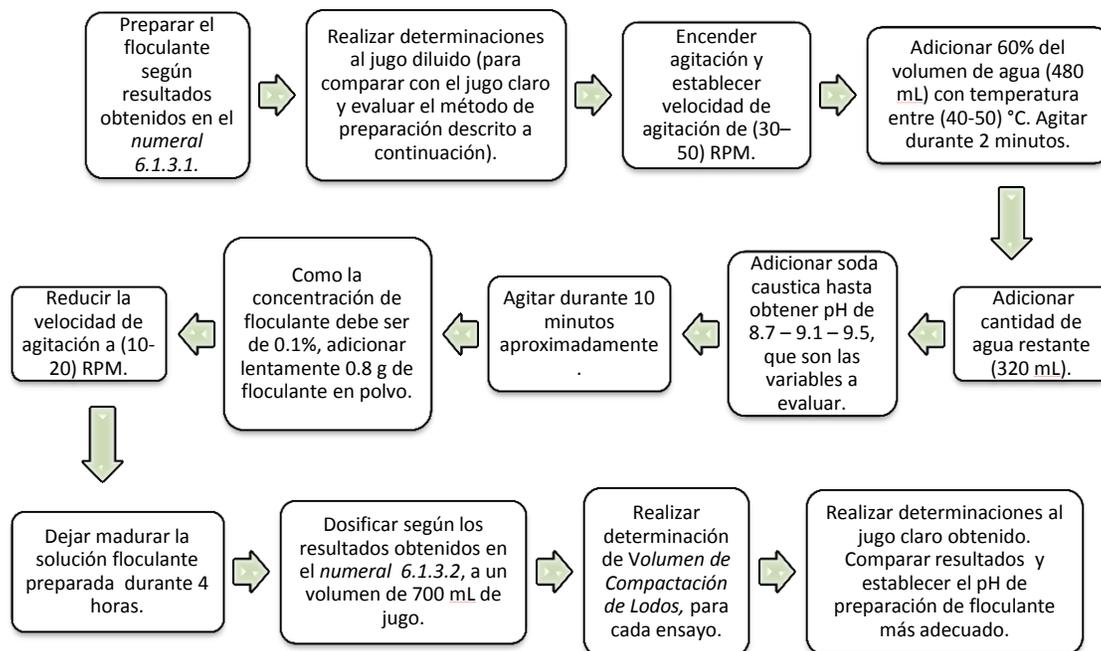


Figura 51. Diagrama de flujo de la Determinación del pH Apropriado de Preparación de Floculante.

6.1.3.4. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA APROPIADA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE

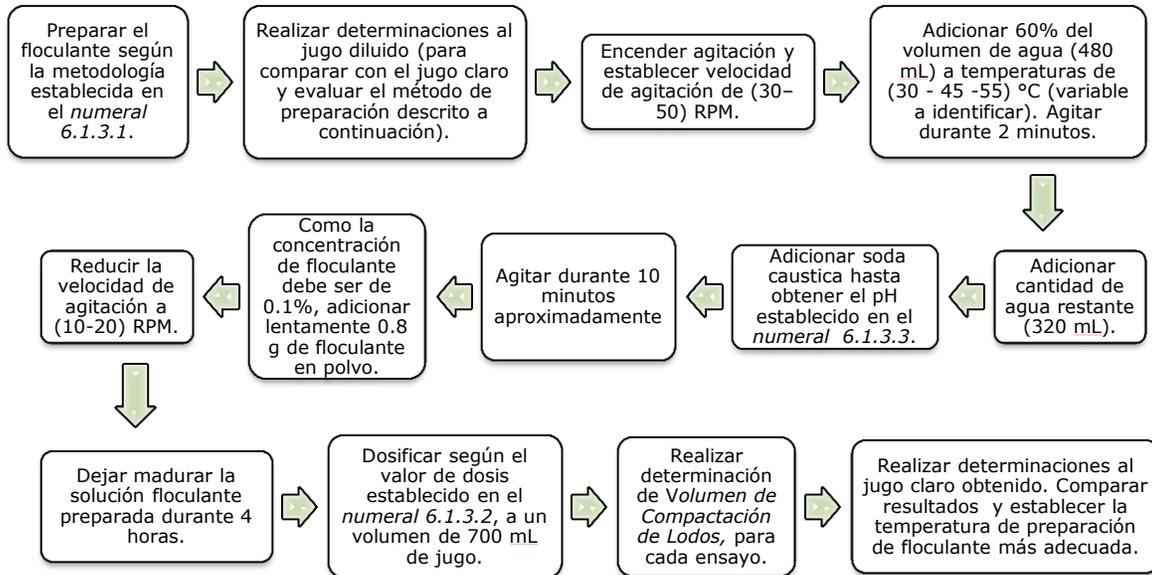


Figura 52. Diagrama de flujo de la Determinación de la Temperatura Apropriada de Preparación de Floculante.

6.1.3.5. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN IÓNICA DEL AGUA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE EN LA CALIDAD DEL MISMO Y EN LA CLARIFICACIÓN DE JUGO

6.1.3.5.1. PREPARACIÓN DE FLOCULANTE EMPLEANDO AGUA DESTILADA

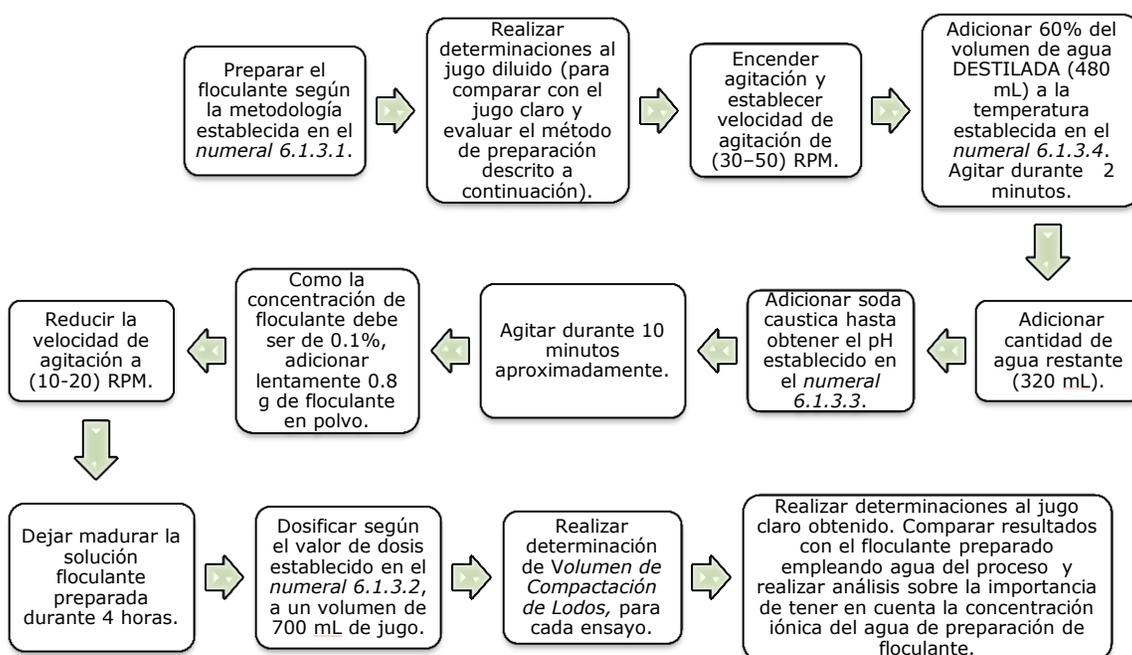


Figura 53. Diagrama de flujo de la Preparación de Floculante empleando Agua Destilada.

6.1.3.5.2. PREPARACIÓN DE FLOCULANTE EMPLEANDO AGUA DEL PROCESO

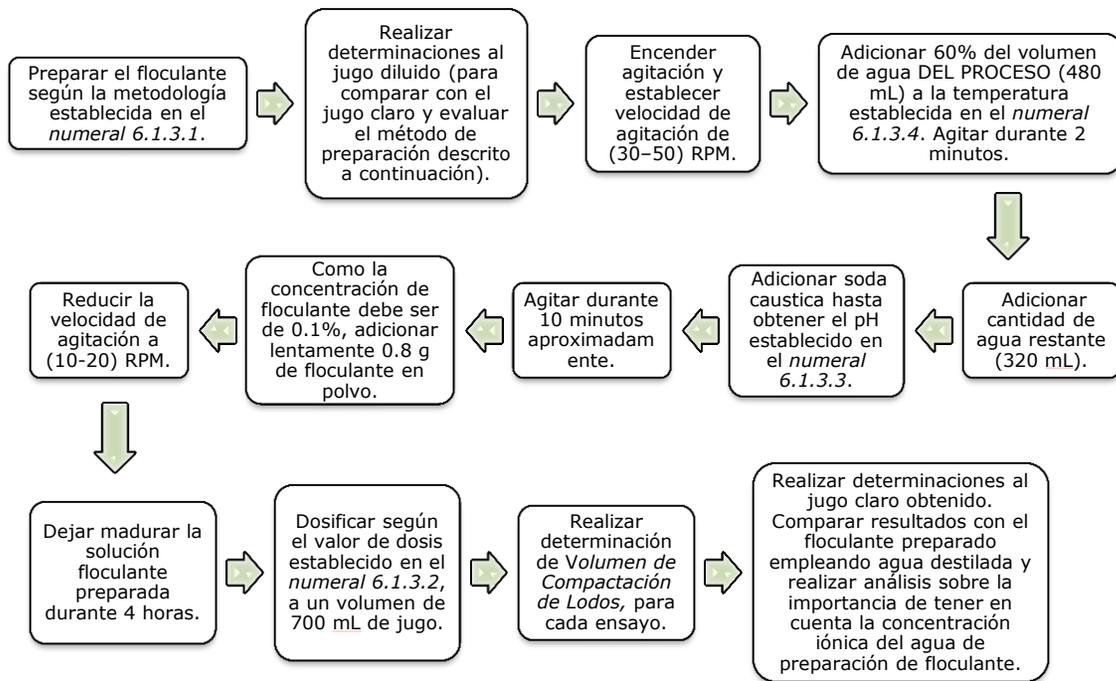


Figura 54. Diagrama de flujo de la Preparación de Floculante empleando Agua del Proceso.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1. RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE SEGÚN LOS OPERARIOS Y PROVEEDOR

En la *Tabla 16* se presentan las condiciones de entrada del jugo diluido que se empleó para este ensayo. El pH del jugo encalado (pH JD + CAL) y la temperatura final del mismo (T_F) fueron las únicas variables controladas. De esta forma, se garantiza que los resultados del jugo claro corresponden sólo a las modificaciones hechas del floculante.

JUGO DILUIDO (JD)	
VARIABLES	VALORES
pH ₀ JD	3.96
pH JD + CAL	7.8
TEMPERATURA FINAL T_F (°C)	98
° BRIX (%)	14.46
POL (%)	50.55
TURBIEDAD (UI)	61308.0
COLOR (UI)	16113.0

Tabla 16. Variables del jugo diluido para el análisis de Metodología de Preparación de Floculante.

Para este ensayo, se preparó floculante a una concentración de 0.1% (utilizada actualmente en el ingenio y recomendada por proveedor) y se dosificó a 7 ppm, el cual es el valor teórico empleado en el ingenio.

En la *Tabla 17* se ilustran los resultados obtenidos al preparar el floculante según la metodología actual de los operarios (comprobada con los resultados del estudio comparativo de preparación de floculante de dos de los operarios de la estación, indicados en la *Tabla 13* del presente trabajo) y los resultados al preparar el floculante según las recomendaciones dadas por el proveedor en la ficha técnica del producto LIPESA 1521M.

CONDICIONES DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE 0.1 % , 7 ppm						
MUESTRA	OPERARIOS			PROVEEDOR		
	TEMPERATURA H ₂ O (°C)	pH H ₂ O + SODA	TIEMPO DE MADURACIÓN (h)	TEMPERATURA H ₂ O (°C)	pH H ₂ O + SODA	TIEMPO DE MADURACIÓN (h)
1	29	9.00	1.7	40	8.30	4
2	29	8.92	1.7	40	8.30	4
3	29	9.06	1.7	40	8.31	4
PROMEDIO	29	8.99	1.7	40	8.30	4

Tabla 17. Variables controladas durante la preparación del floculante LIPESA 1521M para el análisis de Metodología de Preparación de Floculante.

La *Tabla 18* presenta los resultados obtenidos de jugo claro. Se resalta la columna de *Turbiedad* porque fue la variable que se consideró para tomar decisiones respecto a la metodología de preparación de floculante más adecuada.

En la *Tabla 19* se evidencian los volúmenes de compactación de los lodos de acuerdo a la metodología de preparación de floculante utilizada.

JUGO CLARO EXPERIMENTAL								
MUESTRA	PROVEEDOR				OPERARIOS			
	°BRIX (%)	POL (%)	TURBIEDAD (UI)	COLOR (UI)	°BRIX (%)	POL (%)	TURBIEDAD (UI)	COLOR (UI)
1	15.29	54.53	2672.40	22852.95	16.06	56.99	4657.05	20455.65
2	16.47	58.96	1945.35	23304.90	15.33	54.56	3045.75	22459.95
3	16.86	60.22	1984.65	19453.50	16.04	57.07	2377.65	22892.25
PROMEDIO	16.21	57.90	2200.80	21870.45	15.81	56.21	3360.15	21935.95
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.667	2.440	333.857	1718.973	0.339	1.165	956.748	1061.504
COEFICIENTE VARIACIÓN	4.12%	4.21%	15.17 UI	7.86 UI	2.15%	2.07%	28.47 UI	4.84 UI

Tabla 18. Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis de Metodología de Preparación de Floculante.

VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)										
MUESTRA	PROVEEDOR					OPERARIOS				
	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.
1	300	200	170	170	150	300	210	200	190	150
2	300	200	190	180	160	300	240	210	206	170
3	150	140	140	130	130	270	200	180	170	150
PROMEDIO	250.00	180.00	166.67	160.00	146.67	290.00	216.67	196.67	188.67	156.67

Tabla 19. Resultados del volumen de compactación de lodos para el análisis de Metodología de Preparación de Floculante.

7.1.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE

En la *Tabla 20* se resumen las turbiedades de jugo diluido y de los jugos claros obtenidos según la metodología de preparación de floculante empleada. Con estos valores se construyó una gráfica de turbiedad de jugo claro versus la metodología de preparación (Ver *Gráfico 2*), para evidenciar con mayor claridad los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos en el *Gráfico 2* evidencian que la diversidad de metodologías de preparación de floculante sí interviene de una u otra forma en la calidad de la clarificación.

Si bien las turbiedades del jugo claro obtenidas en la preparación de floculante con ambas metodologías se encuentran dentro de los límites permitidos de calidad (3500 UI), se observa que con la realización de la preparación de la solución floculante siguiendo las indicaciones del proveedor, se obtienen mejores resultados (turbiedad promedio del jugo claro: 2200.80 UI), proporcionando un jugo claro de mayor calidad, que deriva en efectos positivos en los demás procesos de producción de azúcar.

MUESTRA	TURBIEDAD JD (UI)	TURBIEDAD JC (UI)		
		OPERARIOS	PROVEEDOR	VALOR REFERENCIA
1	61308.0	4657.05	2672.40	3500
2		3045.75	1945.35	3500
3		2377.65	1984.65	3500
PROMEDIO		3360.15	2200.80	3500

Tabla 20. Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades de jugo claro según la Metodología de Preparación de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.

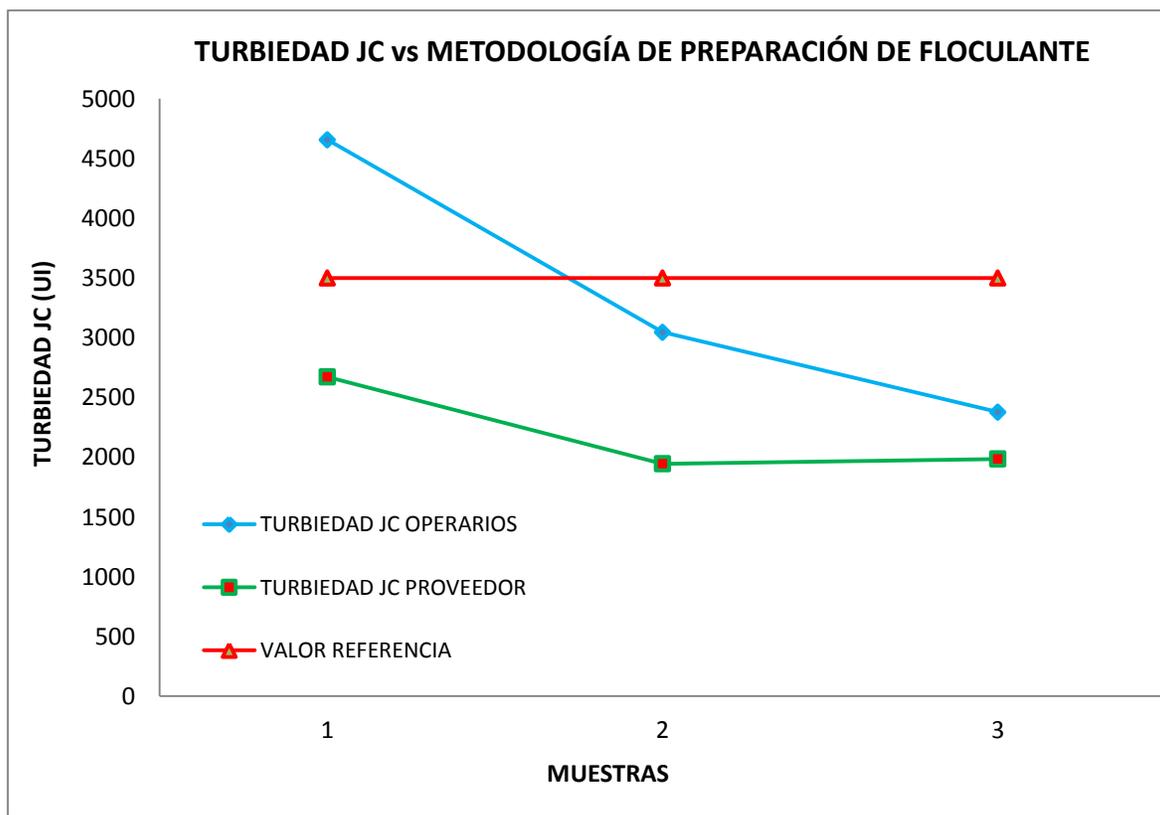


Gráfico 2. Turbiedad del jugo claro versus la Metodología de Preparación de Floculante.

En la *Tabla 21* se incluyeron los promedios del volumen de compactación de lodos y con estos resultados se construyó el *Gráfico 3*.

Como se mencionó en el presente trabajo, los lodos compactos son uno de los materiales que conviene obtener en la clarificación de jugo con el fin de que éste se produzca con una velocidad considerable para que el tiempo de permanencia del jugo en el clarificador sea cada vez menor y aumente la capacidad del proceso. Adicional a esto, es importante porque se producirán masas más compactas de lodos y se facilitará la filtración de los mismos, para recuperar la mayor cantidad posible de sacarosa durante el proceso de filtración de cachaza.

Teniendo en cuenta el anterior principio, la información que arrojan los resultados (Ver *Gráfico 3*) es que siguiendo las recomendaciones de preparación de floculante del proveedor, se obtienen lodos mucho más compactos. A pesar de que numéricamente la diferencia en compactación de lodos no es grande, en las fábricas y específicamente en los procesos industriales cualquier modificación, así sea en decimales, trae consigo herramientas adecuadas para inferir que hubo cambios significativos, y por tanto conviene prestarles atención.

PROMEDIO DE VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)		
TIEMPO (segundos)	METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN DE FLOC. OPERARIOS	METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN DE FLOC. PROVEEDOR
15	290.00	250.00
30	216.67	180.00
45	196.67	166.67
60	188.67	160.00
300	156.67	146.67

Tabla 21. Promedio de volumen de compactación de lodos para el análisis de la Metodología de Preparación de Floculante.

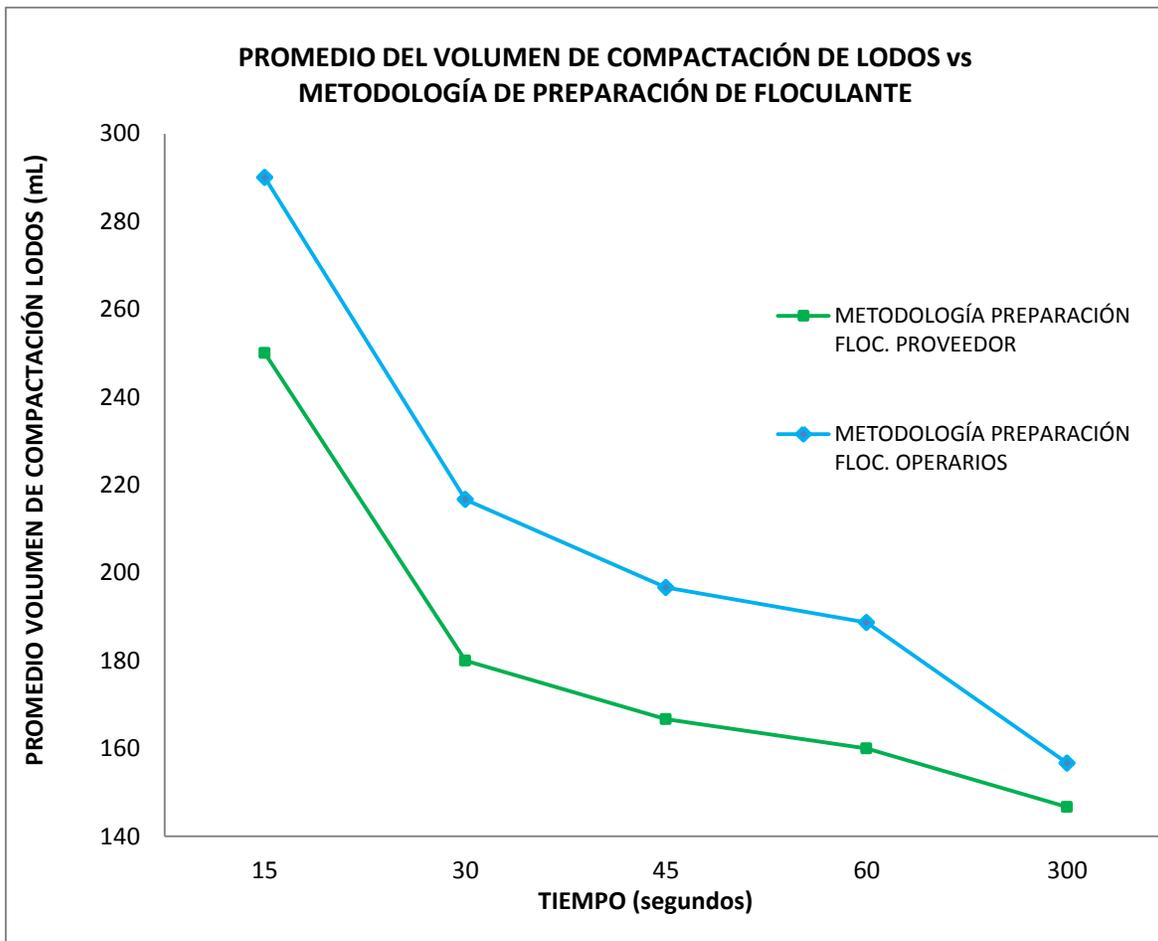


Gráfico 3. Promedio del volumen de compactación de lodos versus Metodología de Preparación de Floculante.

Por lo tanto, se concluye que la Metodología de Preparación de Floculante corresponde a la sugerida por el proveedor porque de este modo se producen jugos claros de menor turbiedad y la compactación de los lodos es mayor.

7.2. RESULTADOS DE LA DOSIS APROPIADA DE FLOCULANTE

La *Tabla 22* evidencia los resultados de jugo diluido, cuyas únicas variables modificadas fueron el pH del jugo encalado y la temperatura final del mismo.

JUGO DILUIDO (JD)				
VARIABLES	MUESTRAS			PROMEDIO
	1	2	3	
pH ₀ JD	3.96	5.27	4.83	4.69
pH JD + CAL	7.8	7.7	7.9	7.80
TEMPERATURA FINAL T _f (°C)	98	98	98	98,00
° BRIX (%)	14.81	13.18	9.64	12.54
POL (%)	52.96	46.56	34.64	44.72
TURBIEDAD (UI)	94713.0	16506.0	165256.5	92158.5
COLOR (UI)	17095.5	151305.0	19060.5	62487.0

Tabla 22. Variables del jugo diluido para el análisis de Dosis Apropriada de Floculante.

En la *Tabla 23* se presentan las condiciones en la que se preparó el floculante para este ensayo. La concentración a la cual se preparó fue de 0.1% y la metodología empleada fue la recomendada por el proveedor según los resultados obtenidos del ensayo 7.1 (Metodología de Preparación de Floculante según Operarios y Proveedor).

CONDICIONES DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE 0.1 %									
MUESTRA	TEMPERATURA H₂O (°C)			pH H₂O + SODA			TIEMPO DE MADURACIÓN (h)		
	2 ppm	5 ppm	8 ppm	2 ppm	5 ppm	8 ppm	2 ppm	5 ppm	8 ppm
1	40	40	40	8.29	8.29	8.28	4.0	4.0	4.0
2	40	40	40	8.30	8.31	8.29	4.0	4.0	4.0
3	40	40	40	8.30	8.30	8.29	4.0	4.0	4.0
PROMEDIO	40	40	40	8.30	8.30	8.29	4.0	4.0	4.0

Tabla 23. Variables controladas durante la preparación del floculante LIPESA 1521M para el análisis de Dosis Apropriada de Floculante.

La *Tabla 24* ilustra los resultados obtenidos de jugo claro empleando las soluciones preparadas de floculante y la en la *Tabla 25* se presentan los resultados del volumen de compactación de lodos de las clarificaciones a escala realizadas.

JUGO CLARO EXPERIMENTAL												
MUESTRA	° BRIX (%)			POL (%)			TURBIEDAD (UI)			COLOR (UI)		
	DOSIS 2 ppm Floc.	DOSIS 5 ppm Floc.	DOSIS 8 ppm Floc.	DOSIS 2 ppm Floc.	DOSIS 5 ppm Floc.	DOSIS 8 ppm Floc.	DOSIS 2 ppm Floc.	DOSIS 5 ppm Floc.	DOSIS 8 ppm Floc.	DOSIS 2 ppm Floc.	DOSIS 5 ppm Floc.	DOSIS 8 ppm Floc.
1	14.38	14.61	14.36	52.13	52.34	51.86	5757.45	4499.85	2593.80	20887.95	20986.20	23069.10
2	13.72	13.83	13.92	48.27	48.60	48.83	3517.35	2456.25	2377.65	19060.50	17901.15	17115.15
3	15.01	15.09	15.34	53.93	54.24	54.44	3478.05	2358.00	3242.25	15268.05	14639.25	13656.75
PROMEDIO	14.37	14.51	14.54	51.44	51.73	51.71	4250.95	3104.70	2737.90	18405.50	17842.20	17947.00
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.53	0.52	0.59	2.36	2.34	2.29	1065.38	987.33	367.38	2340.60	2591.467	3887.33
COEFICIENTE VARIACIÓN	3.66 %	3.58 %	4.08 %	4.59 %	4.53 %	4.43 %	25.06 UI	31.80 UI	13.42 UI	12.72 UI	14.52 UI	21.66 UI

Tabla 24. Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis de Dosis Apropiaada de Floculante.

VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)															
MUESTRA	DOSIS 2 ppm FLOCULANTE					DOSIS 5 ppm FLOCULANTE					DOSIS 8 ppm FLOCULANTE				
	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.
1	622	550	500	480	220	250	210	200	200	170	220	200	180	180	160
2	650	610	560	560	310	400	280	230	230	190	260	240	220	220	200
3	640	620	600	570	330	310	250	230	220	200	270	250	240	220	220
PROMEDIO	637.3	593.3	553.3	536.7	286.7	320.0	246.7	220.0	216.7	186.7	250.0	230.0	213.3	206.7	193.3

Tabla 25. Resultados del volumen de compactación de lodos para el análisis de Dosis Apropiaada de Floculante.

7.2.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA DOSIS APROPIADA DE FLOCULANTE

La *Tabla 26* es un resumen de la turbiedad de jugo diluido y las turbiedades de jugo claro del presente ensayo, con estos valores se construyó el *Gráfico 4*.

Los resultados obtenidos de *Turbiedad del Jugo Claro* evidenciados en el *Gráfico 4*, muestran que no es apropiado dosificar el floculante a 2 ppm, porque se obtiene un jugo claro que cumple mínimamente con las especificaciones de calidad (Turbiedad máxima de 3500 UI).

De los resultados obtenidos surgen además, otras dos conclusiones:

1. Si se analizan los resultados de forma práctica, las dosis de floculante de 5 y 8 ppm cumplen con la especificación de obtener un jugo claro con turbiedad inferior a 3500 UI. Por lo tanto, es posible decidir que se implementará la dosificación de floculante de 5 ppm, porque los gastos económicos de floculante en polvo serían menores.

El costo del floculante en polvo LIPESA 1521M para el ingenio Riopaila está valorado en \$ 8100/Kg.

En promedio, en el ingenio cada hora llegan a los clarificadores 500 m³ de jugo encalado, por lo tanto, dosis de 8 ppm de floculante implicarían un gasto del mismo de \$ 32400/hora y de \$ 777600/día para clarificar el jugo; mientras que dosis de 5 ppm implicarían un gasto de \$ 20250/hora y de \$ 486000/día para clarificar la misma cantidad de jugo, como se muestra con los siguientes cálculos:

COSTO (DOSIS 8 ppm)

$$* FLOC POLVO / HORA = \frac{500 m^3 Jugo}{1 Hora} \times \frac{8 g FLOC}{1 m^3 Jugo} \times \frac{1 Kg FLOC}{1000 g FLOC} \times \frac{\$ 8100}{1 Kg} = \$ 32400 / Hora$$

$$* FLOC POLVO / DÍA = \frac{\$ 32500}{Hora} \times \frac{24 Horas}{1 Día} = \$ 777600 / Día$$

COSTO (DOSIS 5 ppm)

$$* FLOC POLVO/HORA = \frac{500m^3Jugo}{1 Hora} \times \frac{5 g FLOC}{1 m^3Jugo} \times \frac{1 Kg FLOC}{1000 g FLOC} \times \frac{\$ 8100}{1 Kg} = \$ 20250/Hora$$

$$* FLOC POLVO/DÍA = \frac{\$ 20250}{Hora} \times \frac{24 Horas}{1 Día} = \$ 486000/Día$$

Las cifras se incrementan si se hace el cálculo por meses, o por años. Por lo tanto, es posible concluir que por cuestiones económicas, conviene dosificar el floculante para la clarificación de jugo, a 5 ppm porque con este valor se obtienen resultados de jugo claro admisibles por los requerimientos de calidad.

2. Sin embargo, esta variable se debe ver como una inversión más que como un gasto económico.

Si el análisis se hace de forma numérica, se observa que la dosis de aplicación de floculante con la que se obtienen jugos más claros (de menor turbiedad) es la de 8 ppm. Por lo tanto, el ingenio debe considerar que esa diferencia de \$ 291600/Día es beneficiosa si se hace una relación de costo/beneficio. Además, como se obtienen mejores resultados en el jugo claro con la dosis de 8 ppm, esto disminuirá costos en insumos en procesos posteriores para intentar clarificar los demás materiales.

MUESTRA	TURBIEDAD JD (UI)	TURBIEDAD JC (UI)			VALOR DE REFERENCIA
		DOSIS FLOCULANTE 2 ppm	DOSIS FLOCULANTE 5 ppm	DOSIS FLOCULANTE 8 ppm	
1	94713.00	4250.95	3104.70	2737.90	3500.00
2	16506.00	3517.35	2456.25	2377.65	3500.00
3	165257.00	3478.05	2358.00	3242.25	3500.00
PROMEDIO	92158.50	3748.80	2639.60	2785.90	3500.00

Tabla 26. Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades de jugo claro según la Dosis de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.

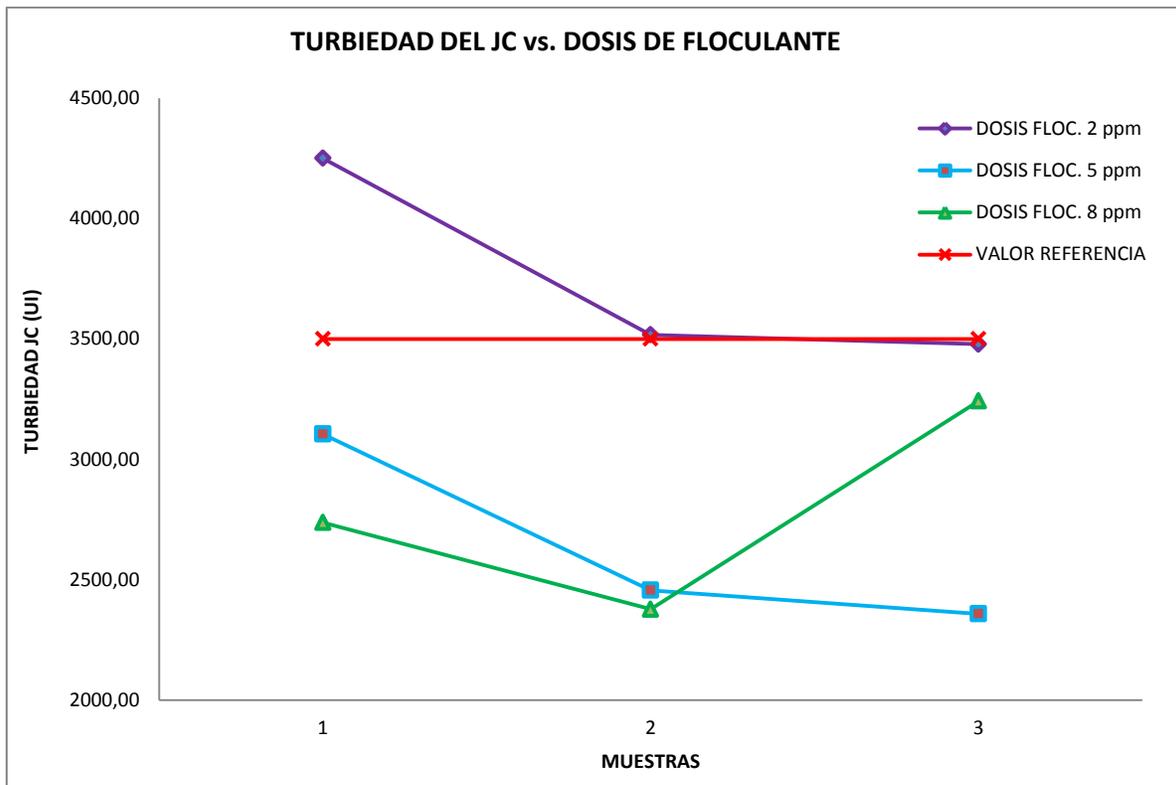


Gráfico 4. Turbiedad del jugo claro versus la Dosis de Floculante.

En la *Tabla 27* se promediaron los resultados del volumen de compactación de lodos según la dosis de floculante empleada. Con estos valores se construyó el *Gráfico 5*.

Se observa en el *Gráfico 5* que con una dosis de 2 ppm de floculante no se consiguen lodos compactos, mientras que con las otras dos dosis de floculante (5 ppm y 8 ppm) se obtienen lodos compactos fácilmente sedimentables, siendo la dosis de 8 ppm la que produce mejores resultados.

PROMEDIO DE VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)			
TIEMPO (segundos)	DOSIS FLOC. 2 ppm	DOSIS FLOC. 5 ppm	DOSIS FLOC. 8 ppm
15	637.33	320.00	250.00
30	593.33	246.67	230.00
45	553.33	220.00	213.33
60	536.67	216.67	206.67
300	286.67	186.67	193.33

Tabla 27. Promedio de volumen de compactación de lodos para el análisis de Dosis Apropiaada de Floculante.

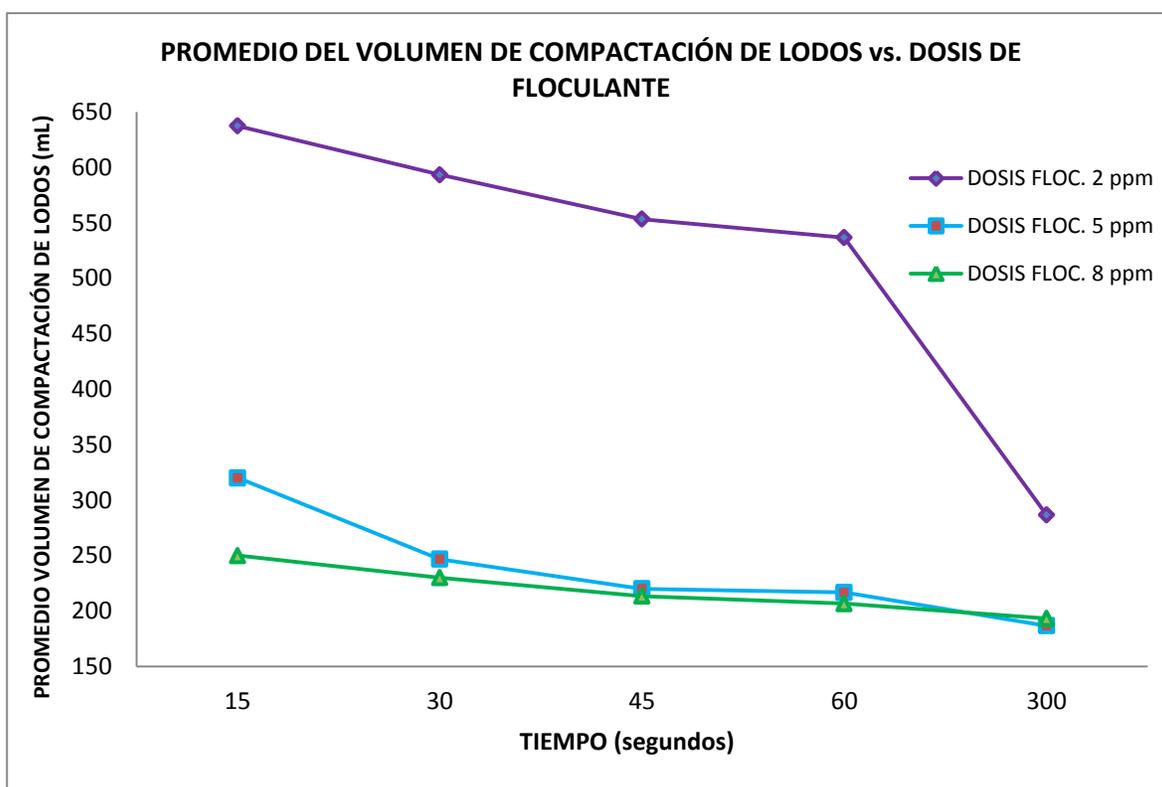


Gráfico 5. Promedio del volumen de compactación de lodos versus Dosis de Floculante.

Por los motivos señalados, se concluye que la Dosis Apropiaada de Floculante para la clarificación de jugo en el ingenio Riopaila, es de 8 ppm.

7.3. RESULTADOS DEL pH APROPIADO DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE

En la *Tabla 28* se ilustran las variables del jugo diluido para este ensayo, de las cuales sólo se modificó el pH del jugo encalado y la temperatura final del mismo.

JUGO DILUIDO (JD)				
VARIABLES	MUESTRAS			PROMEDIO
	1	2	3	
pH ₀ JD	5.36	4.53	4.16	4.68
pH JD + CAL	7.9	7.7	7.6	7.73
T _f (°C)	98	98	98	98
° BRIX (%)	14.16	12.7	12.18	13.01
POL (%)	50.89	44.7	42.06	45.88
TURBIEDAD (UI)	8980.05	30850.50	13303.05	17711.20
COLOR (UI)	1866.75	1866.75	2436.60	2056.70

Tabla 28. Variables del jugo diluido para el análisis de pH Apropiado de Preparación de Floculante.

Para este ensayo, se preparó el floculante a una concentración de 0.1%, siguiendo la metodología de proveedores y dosificando a 8 ppm, valor apropiado de acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo 7.2 (Dosis Apropiaada de Floculante). Las condiciones de preparación de floculante se incluyeron en la *Tabla 29*.

CONDICIONES DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE [0.1 %], DOSIS 8 ppm									
MUESTRA	TEMPERATURA H ₂ O (°C)			pH H ₂ O + SODA			TIEMPO DE MADURACIÓN (h)		
	PREP. FLOC. pH 8.7	PREP. FLOC. pH 9.1	PREP. FLOC. pH 9.5	PREP. FLOC. pH 8.7	PREP. FLOC. pH 9.1	PREP. FLOC. pH 9.5	PREP. FLOC. pH 8.7	PREP. FLOC. pH 9.1	PREP. FLOC. pH 9.5
1	40	40	40	8.73	9.11	9.49	4	4	4
2	40	40	40	8.70	9.12	9.49	4	4	4
3	40	40	40	8.71	9.11	9.50	4	4	4
PROMEDIO	40	40	40	8.71	9.11	9.49	4	4	4

Tabla 29. Variables controladas durante la preparación del floculante LIPESA 1521M para el análisis de pH Apropiado de Preparación de Floculante.

Los resultados de jugo claro según el pH de preparación de floculante se incluyeron en la *Tabla 30* y los resultados del volumen de compactación de lodos en la *Tabla 31*.

JUGO CLARO EXPERIMENTAL (JC)												
MUESTRA	° BRIX (%)			POL (%)			TURBIEDAD (UI)			COLOR (UI)		
	PREP. FLOC. pH 8.7	PREP. FLOC. pH 9.1	PREP. FLOC. pH 9.5	PREP. FLOC. pH 8.7	PREP. FLOC. pH 9.1	PREP. FLOC. pH 9.5	PREP. FLOC. pH 8.7	PREP. FLOC. pH 9.1	PREP. FLOC. pH 9.5	PREP. FLOC. pH 8.7	PREP. FLOC. pH 9.1	PREP. FLOC. pH 9.5
1	14.69	14.52	14.63	52.54	52.00	52.20	5423.40	3654.90	3144.00	20278.80	22420.65	22499.25
2	13.26	13.48	13.69	46.86	48.07	48.38	844.95	746.70	786.00	14619.60	14776.80	14187.30
3	12.59	12.77	12.61	42.97	43.38	43.27	2495.55	1395.15	1237.95	10945.05	12183.00	12379.50
PROMEDIO	13.51	13.59	13.64	47.46	47.82	47.95	2921.30	1932.25	1722.65	15281.15	16460.15	16355.35
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.876	0.719	0.825	3.930	3.524	3.658	1893.233	1246.532	1021.842	3839.094	4345.697	4406.636
COEFICIENTE VARIACIÓN	6.48 %	5.29 %	6.05 %	8.28 %	7.37 %	7.63 %	64.81 UI	64.51 UI	59.32 UI	25.12 UI	26.40 UI	26.94 UI

Tabla 30. Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis de pH Apropiado de Preparación de Floculante.

VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)															
MUESTRA	PREP. FLOC. pH 8.7					PREP. FLOC. pH 9.1					PREP. FLOC. pH 9.5				
	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.
1	300	250	210	200	190	400	300	250	200	150	---	---	---	---	---
2	490	390	330	300	240	550	450	400	350	250	430	350	300	290	250
3	250	220	200	200	190	300	250	230	210	180	250	230	220	216	200
PROMEDIO	346.7	286.7	246.7	233.3	206.7	416.7	333.3	293.3	253.3	193.3	340.0	290.0	260.0	253.0	225.0

Tabla 31. Resultados del volumen de compactación de lodos para el análisis de pH Apropriado de Preparación de Floculante.

7.3.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL pH APROPIADO DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE

Los resultados de turbiedad de jugo diluido y las turbiedades de jugo claro se resumieron en la *Tabla 32*, con estos valores se construyó el *Gráfico 6*.

Los resultados ilustrados en el *Gráfico 6*, demuestran que en efecto sí se observan variaciones en la *Turbiedad del Jugo Claro* cuando se modifica la variable pH durante la preparación del floculante.

Los mejores resultados se obtienen cuando el pH de preparación de floculante es modificado entre el rango de 9.1 y 9.5, siendo el último valor el que ofrece jugos más claros (turbiedades menores). Esto es lógico considerando que a pH básicos, el polímero activa de forma más eficiente todos sus radicales aniónicos para promover la floculación.

MUESTRA	TURBIEDAD JD (UI)	TURBIEDAD JC (UI)			
		PREP. FLOC. pH 8.7	PREP. FLOC. pH 9.1	PREP. FLOC. pH 9.5	VALOR DE REFERENCIA
1	8980.05	5423.40	3654.90	3144.00	3500
2	30850.50	844.95	746.70	786.00	3500
3	13303.05	2495.55	1395.15	1237.95	3500
PROMEDIO	17711.20	2921.30	1932.25	1722.65	3500

Tabla 32. Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades de jugo claro según el pH de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.

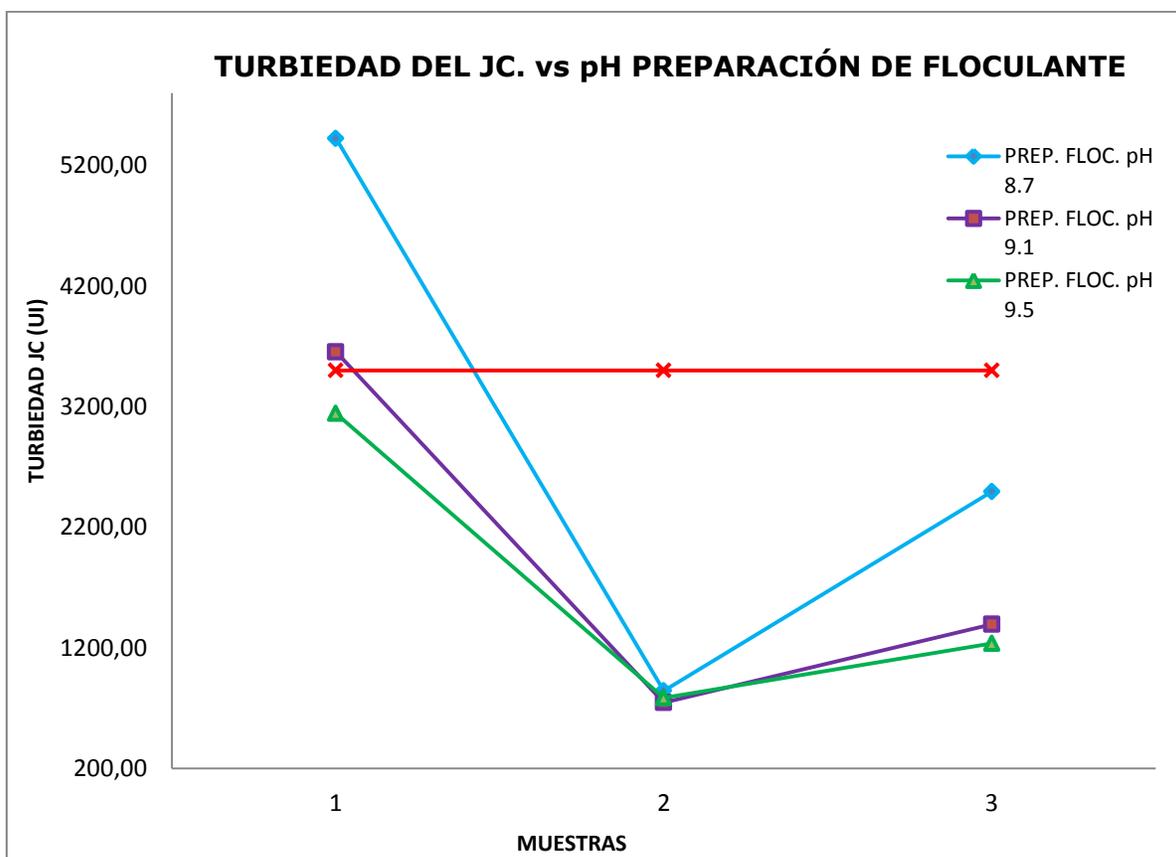


Gráfico 6. Turbiedad del jugo claro versus pH de Preparación de Floculante.

Para hacer un mejor análisis del volumen de compactación de lodos, se incluyeron solo los promedios de estos en la *Tabla 33*. Con estos valores se construyó el *Gráfico 7*.

Respecto al *Volumen de Compactación de Lodos* (Ver *Gráfico 7*), la modificación del pH de preparación no tiene mucha incidencia en comparación con los resultados obtenidos de otras variables modificadas en los demás ensayos. Aun así, preparaciones de floculante a un pH de 9.5 demuestran obtener lodos más compactos durante la clarificación de jugo.

PROMEDIO DE VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)			
TIEMPO (segundos)	PREP. FLOC. pH 8.7	PREP. FLOC. pH 9.1	PREP. FLOC. pH 9.5
15	346.7	416.7	340.0
30	286.7	333.3	290.0
45	246.7	293.3	260.0
60	233.3	253.3	253.0
300	206.7	193.3	225.0

Tabla 33. Promedio del volumen de compactación de lodos versus pH de Preparación de Floculante.

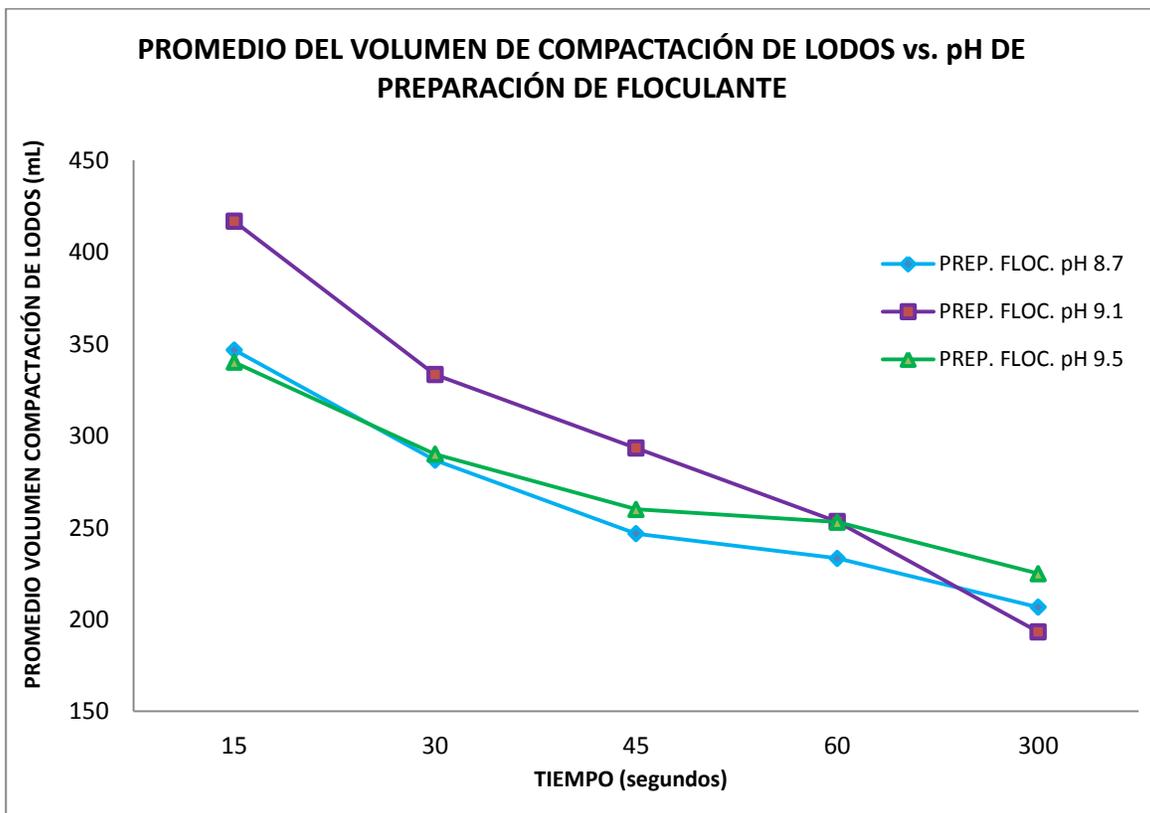


Gráfico 7. Promedio del volumen de compactación de lodos versus pH de Preparación de Floculante.

Por todo lo presentado, se concluye que el *pH Apropiado de Preparación de Floculante* corresponde al valor de 9.5.

7.4. RESULTADOS DE LA TEMPERATURA APROPIADA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE

En la *Tabla 34* se presentan los resultados del jugo diluido. Las únicas variables modificadas fueron el pH del jugo encalado y la temperatura final del mismo.

JUGO DILUIDO (JD)				
VARIABLES	MUESTRAS			PROMEDIO
	1	2	3	
pH ₀ JD	4.30	3.50	4.27	4.02
pH JD + CAL	7.6	7,61	7.60	7.60
TEMPERATURA FINAL T _f (°C)	98	98	98	98
° BRIX (%)	13.51	13.62	11.66	12.93
POL (%)	48.78	48.40	40.57	45.92
TURBIEDAD (UI)	127725.0	151698.0	175081.5	151501.5
COLOR (UI)	17488.5	14737.5	15720.0	15982.0

Tabla 34. Variables del jugo diluido para el análisis de la Temperatura Apropia de Preparación de Floculante.

La *Tabla 35* muestra las condiciones a las cuales se preparó el floculante para el presente ensayo, siendo la concentración de 0.1%, el pH de 9.5 (según los resultados obtenidos en el ensayo 7.3, pH Apropia de Preparación de Floculante) y dosificándolo a 8 ppm.

CONDICIONES DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE [0.1 %], DOSIS 8 ppm, pH 9.5									
MUESTRA	TEMPERATURA H ₂ O (°C)			pH H ₂ O + SODA			TIEMPO DE MADURACIÓN (h)		
	TEMP. 30°C	TEMP. 45°C	TEMP. 55°C	TEMP. 30°C	TEMP. 45°C	TEMP. 55°C	TEMP. 30°C	TEMP. 45°C	TEMP. 55°C
1	30	45	56	9.51	9.51	9.50	4	4	4
2	29	45	55	9.50	9.50	9.51	4	4	4
3	30	45	55	9.50	9.50	9.50	4	4	4
PROMEDIO	30	45	55	9.50	9.50	9.50	4	4	4

Tabla 35. Variables controladas durante la preparación del floculante LIPESA 1521M para el análisis de Temperatura Apropia de Preparación de Floculante.

En la *Tabla 36* se ilustran los resultados del jugo claro según cada clarificación a escala realizada y la *Tabla 37* muestra los volúmenes de compactación de lodos obtenidos al emplear las diferentes soluciones floculantes preparadas.

JUGO CLARO EXPERIMENTAL (JC)												
MUESTRA	° BRIX (%)			POL (%)			TURBIEDAD (UI)			COLOR (UI)		
	TEMP 30°C	TEMP 45°C	TEMP 55°C	TEMP 30°C	TEMP 45°C	TEMP 55°C	TEMP 30°C	TEMP 45°C	TEMP 55°C	TEMP 30°C	TEMP 45°C	TEMP 55°C
1	16.00	15.78	15.85	60.01	57.97	58.39	1375.50	1493.40	1493.40	14737.50	14796.45	14482.05
2	14.52	14.16	14.32	51.25	49.99	50.67	844.95	707.40	589.50	15228.75	14560.65	14992.95
3	12.65	12.85	12.31	43.74	44.11	42.58	3478.05	3144.00	3124.35	18687.15	17390.25	17763.60
PROMEDIO	14.39	14.26	14.16	51.67	50.69	50.55	1899.50	1781.60	1735.75	16217.80	15582.45	1574.20
DESVIACIÓN ESTANDAR	1.37	1.20	1.45	6.65	5.68	6.45	1137.02	1015.40	1048.94	1757.57	1281.93	1441.68
COEFICIENTE VARIACIÓN	9.53 %	8.40 %	10.24 %	12.87 %	11.21 %	12.77 %	59.86 UI	56.99 UI	60.43 UI	10.84 UI	8.23 UI	9.16 UI

Tabla 36. Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis de Temperatura Apropia de Preparación de Floculante.

VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)															
MUESTRA	PREP. FLOC. pH 8.7					PREP. FLOC. pH 9.1					PREP. FLOC. pH 9.5				
	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.
1	300	280	260	250	210	270	250	230	200	190	320	270	240	220	200
2	250	230	200	200	180	250	220	210	210	180	230	200	200	200	180
3	280	230	200	190	150	200	180	160	150	150	200	190	180	170	150
PROMEDIO	276.7	246.7	220.0	213.3	180.0	240.0	216.7	200.0	186.7	173.3	215.0	195.0	190.0	185.0	165.0

Tabla 37. Resultados del volumen de compactación de lodos para el análisis de Temperatura Apropia de Preparación de Floculante.

7.4.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA TEMPERATURA APROPIADA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE

La *Tabla 38* resume la turbiedad de jugo diluido y las turbiedades de jugo claro obtenidas, con estos valores se construyó el *Gráfico 8*.

Se observa en el *Gráfico 8*, que las tres temperaturas modificadas proporcionan *Turbiedades de Jugo Claro* mínimas en comparación con el límite establecido, lo que indica que como tal, la temperatura de preparación de floculante no tiene una incidencia relevante en el proceso de clarificación de jugo.

La influencia de la temperatura radica en la rapidez de homogenización de la solución floculante, ya que homogenizaciones más rápidas garantizarán un tiempo de maduración más extenso y por tanto, una solución floculante de mayor calidad.

MUESTRA	TURBIEDAD JD (UI)	TURBIEDAD JC (UI)			
		TEMP. 30°C	TEMP. 45°C	TEMP. 55°C	VALOR DE REFERENCIA
1	127725.0	1375.50	1493.40	1493.40	3500
2	151698.0	844.95	707.40	589.50	3500
3	175081.5	3478.05	3144.00	3124.35	3500
PROMEDIO	151501.5	1899.50	1781.60	1735.75	3500

Tabla 38. Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades de jugo claro según la Temperatura de Preparación de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.

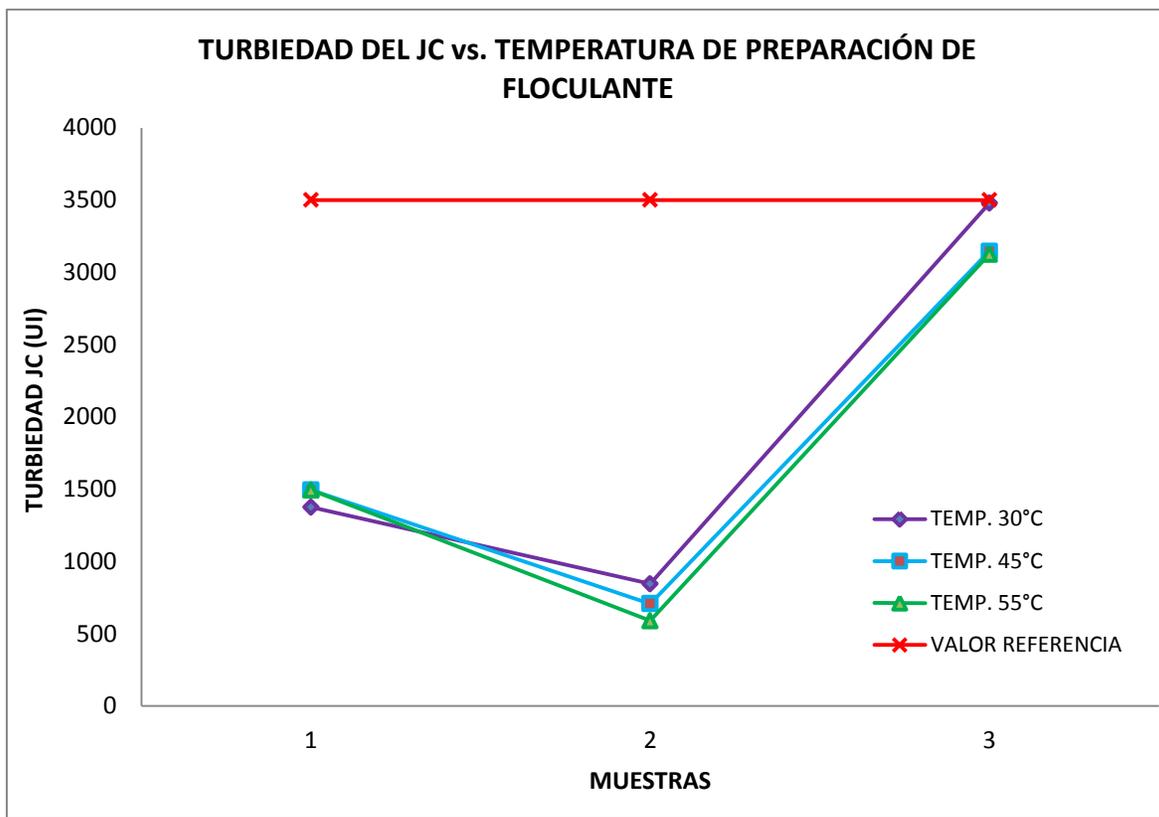


Gráfico 8. Turbiedad del jugo claro versus Temperatura de Preparación de Floculante.

En la *Tabla 39* se muestran los promedios del volumen de compactación de lodos según las clarificaciones a escala realizadas y con estos valores se construyó el *Gráfico 9*.

En medio de la similitud de resultados, temperaturas de preparación de floculante a 55°C producen lodos más compactos (Ver *Gráfico 9*), facilitando que el proceso de clarificación se lleve a cabo a una mayor velocidad y se aumente la capacidad del proceso.

PROMEDIO DE VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)			
TIEMPO (segundos)	TEMP. 30°C	TEMP. 45°C	TEMP. 55°C
15	276.7	240.0	215.0
30	246.7	216.7	195.0
45	220.0	200.0	190.0
60	213.3	186.7	185.0
300	180.0	173.3	165.0

Tabla 39. Promedio del volumen de compactación de lodos versus Temperatura de Preparación de Floculante.

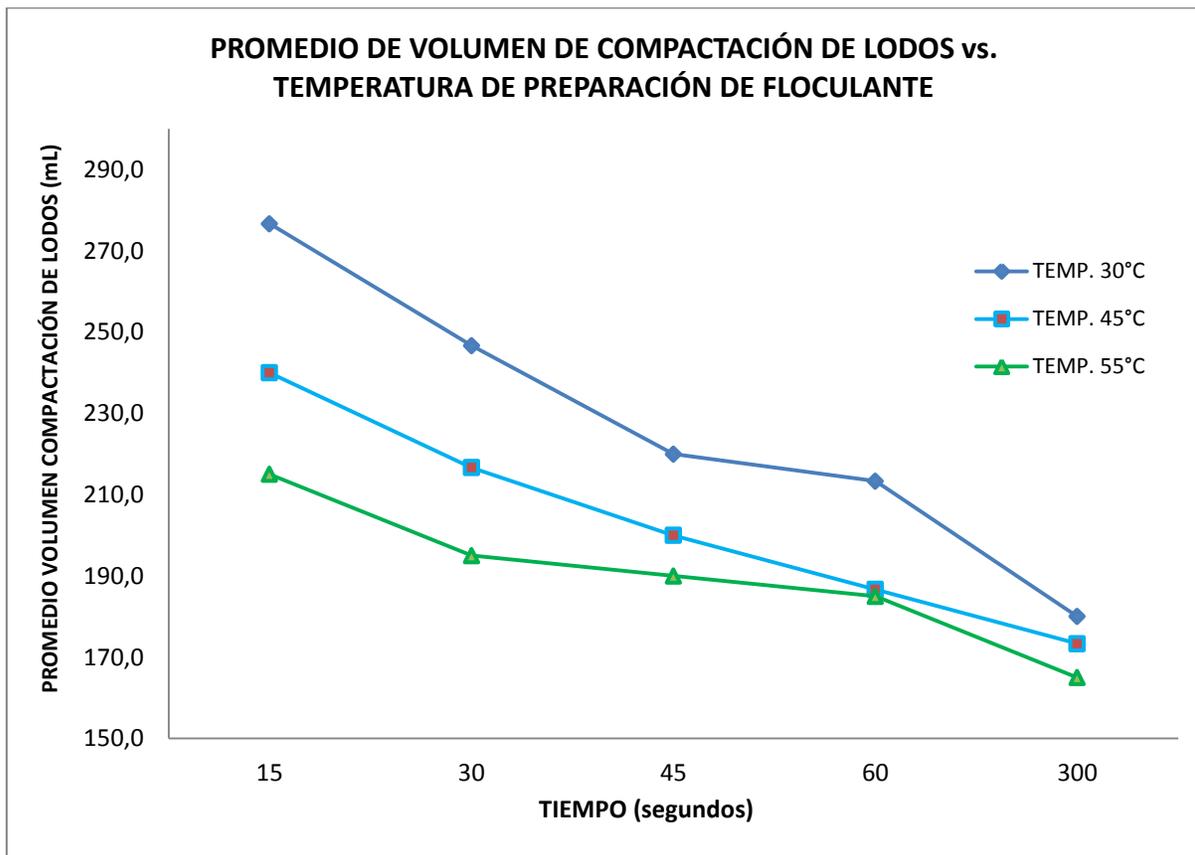


Gráfico 9. Promedio del volumen de compactación de lodos versus Temperatura de Preparación de Floculante.

Por todo lo presentado, se concluye la *Temperatura Apropriada para la Preparación de Floculante* corresponde al valor de 55°C.

7.5 RESULTADOS DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN IÓNICA DEL AGUA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE EN LA CALIDAD DEL MISMO Y EN LA CLARIFICACIÓN DE JUGO

En la *Tabla 40* se presentan los resultados del jugo diluido. El pH del jugo encalado y la temperatura del mismo, fueron las únicas variables controladas.

JUGO DILUIDO (JD)	
VARIABLES	VALORES
pH ₀ JD	4.37
pH JD + CAL	7.7
TEMPERATURA FINAL T _f (°C)	98
° BRIX (%)	12.18
POL (%)	42.76
TURBIEDAD (UI)	136567.5
COLOR (UI)	15916.5

Tabla 40. Variables del jugo diluido para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.

Para este ensayo el floculante se preparó a una concentración de 0.1%, un pH de 9.5, una temperatura de 55°C (según los resultados del ensayo 7.4, Temperatura Apropiada de Preparación de Floculante) y se dosificó a 8 ppm.

El agua destilada se empleó como medio de baja dureza para poder evaluar la influencia de esta variable en la calidad del floculante preparado y poder realizar la comparación con el tipo de agua que se emplea actualmente en el ingenio. Los resultados se presentan en la *Tabla 41*.

CONDICIONES DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE [0,1 %]								
DOSIS DE 8 ppm								
MUESTRA	PREPARACIÓN DE FLOC. CON H ₂ O DESTILADA				PREPARACIÓN DE FLOC. CON H ₂ O DEL PROCESO			
	CONDUCTIVIDAD H ₂ O (µs/cm)	TEMP H ₂ O (°C)	pH H ₂ O	TIEMPO DE MADURACIÓN (h)	CONDUCTIVIDAD H ₂ O (µs/cm)	TEMP H ₂ O (°C)	pH H ₂ O	TIEMPO DE MADURACIÓN (h)
1	2.25	55	9.5	4	189.6	55	9.5	4
2	2.06	55	9.5	4	188.8	55	9.5	4
3	2.05	55	9.5	4	182.7	55	9.5	4
PROMEDIO	2.12	55	9.5	4	187.0	55	9.5	4

Tabla 41. Variables controladas durante la preparación del floculante LIPESA 1521M para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.

La *Tabla 42* muestra los resultados obtenidos de jugo claro según el tipo de agua empleada durante la preparación del floculante y en la *Tabla 43* se evidencia los volúmenes de compactación de lodos obtenidos.

JUGO CLARO EXPERIMENTAL (JC)								
MUESTRA	PREPARACIÓN DE FLOC. CON H ₂ O DESTILADA				PREPARACIÓN DE FLOC. CON H ₂ O DEL PROCESO			
	°BRIX (%)	POL (%)	TURBIEDAD (UI)	COLOR (UI)	°BRIX (%)	POL (%)	TURBIEDAD (UI)	COLOR (UI)
1	12.81	45.37	1296.90	13224.45	13.14	46.23	1355.85	12576.00
2	14.74	52.19	1283.76	12772.50	13.16	46.27	1493.40	12517.05
3	13.06	45.67	1270.60	12654.60	12.76	45.98	1237.95	12320.55
PROMEDIO	13.54	47.74	1283.75	12883.85	13.02	46.16	1362.40	12471.20
DÉSVIACIÓN ESTANDAR	0.857	3.147	10.737	245.603	0.184	0.128	104.390	109.210
COEFICIENTE VARIACIÓN	6.33 %	6.59 %	0.84 UI	1.91 UI	1.41 %	0.28 %	7.66 UI	0.88 UI

Tabla 42. Resultados obtenidos de jugo claro para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.

VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)										
MUESTRA	PREPARACIÓN DE FLOC. CON H₂O DESTILADA					PREPARACIÓN DE FLOC. CON H₂O DEL PROCESO				
	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.	15 seg.	30 seg.	45 seg.	60 seg.	300 seg.
1	210	200	190	190	180	210	200	200	200	170
2	230	220	210	200	190	250	230	230	220	200
3	220	200	190	180	170	250	240	230	220	200
PROMEDIO	220.0	206.7	196.7	190.0	180.0	236.7	223.3	220.0	213.3	190.0

Tabla 43. Resultados del volumen de compactación de lodos para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.

7.5.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN IÓNICA DEL AGUA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE EN LA CALIDAD DEL MISMO Y EN LA CLARIFICACIÓN DE JUGO

La *Tabla 44* resume la turbiedad de jugo diluido y las turbiedades de jugo claro obtenidas. Con estos valores se construyó el *Gráfico 10*.

Los resultados presentados en el *Gráfico 10* demuestran que con preparaciones de floculante empleando dos tipos diferentes de agua, se obtienen resultados que se encuentran dentro de los límites permitidos de *Turbiedad en el Jugo Claro*.

Sin embargo, se observa que preparando el floculante con agua de menor dureza (conductividad de 2.12 $\mu\text{s/cm}$), las Turbiedades del Jugo Claro que se obtienen son más constantes y menores, mientras que las Turbiedades del Jugo Claro obtenidas con el agua de preparación de floculante que actualmente se emplea en el proceso (conductividad de 187 $\mu\text{s/cm}$) divergen más entre sí.

MUESTRA	TURBIEDAD JD (UI)	TURBIEDAD JC (UI)		
		PREPARACIÓN DE FLOC. CON H ₂ O DESTILADA	PREPARACIÓN DE FLOC. CON H ₂ O DEL PROCESO	VALOR REFERENCIA
1	136567.5	1296.90	1355.85	3500
2		1283.76	1493.40	3500
3		1270.60	1237.95	3500
PROMEDIO		1283.75	1362.40	3500

Tabla 44. Resultados de la turbiedad del jugo diluido y las turbiedades de jugo claro según la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante, en contraste con el valor de referencia de turbiedad del jugo claro.

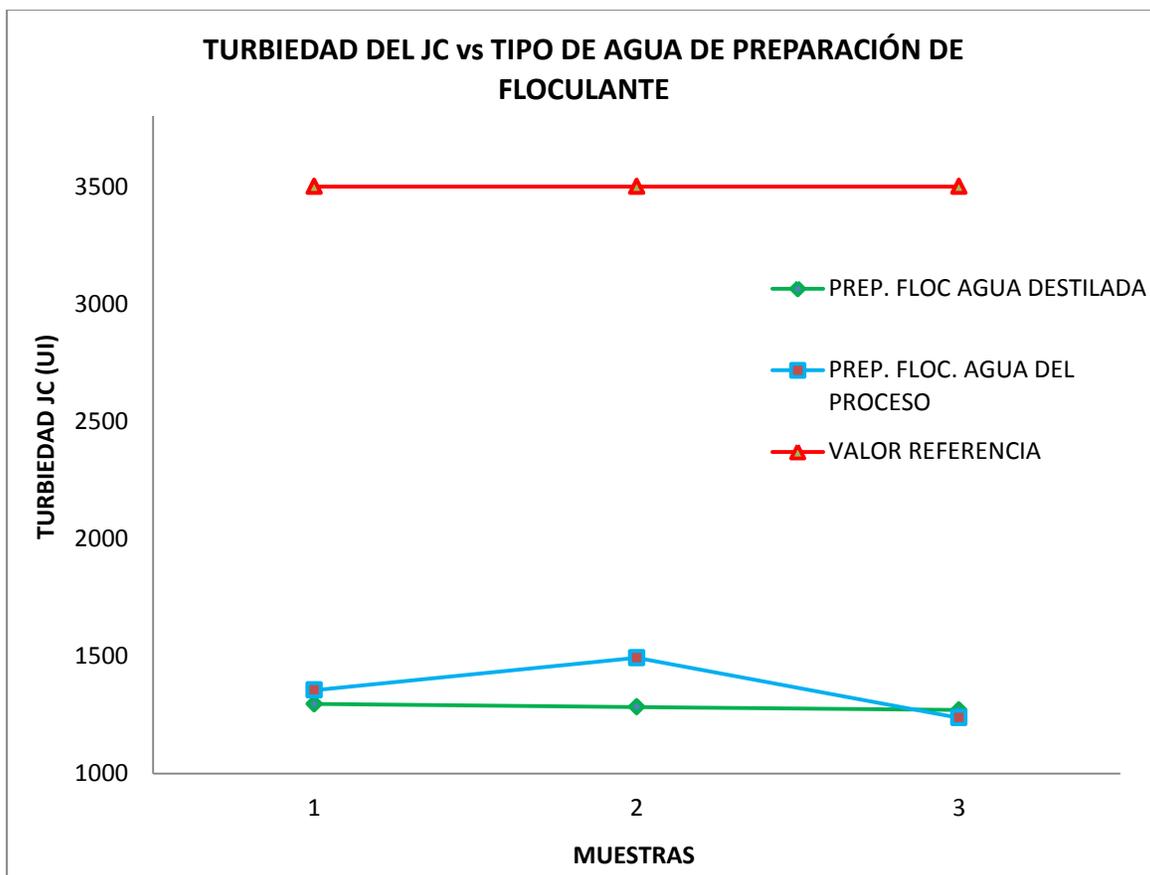


Gráfico 10. Turbiedad del jugo claro versus Tipo de Agua de Preparación de Floculante.

En la *Tabla 45* se indican los promedios del volumen de compactación de lodos según las clarificaciones a escala realizadas y con estos valores se construyó el *Gráfico 11*.

El *Gráfico 11* evidencia que se obtienen lodos mucho más compactos cuando se emplea agua destilada (de menor dureza), lo cual se relaciona directamente con la capacidad de los radicales aniónicos del floculante para aglomerar mayor cantidad de impurezas catiónicas, las cuales solo corresponden al jugo, y no a las que propiamente trae el agua de preparación de floculante cuando posee alta dureza.

Los *Volúmenes de Compactación de Lodos* difieren entre sí porque durante la clarificación del jugo las impurezas buscan acercarse electrostáticamente a radicales libres del floculante, pero como estos se encuentran ya ocupados por otro tipo de impurezas (del agua de preparación), la clarificación y como tal la compactación de los lodos, se torna lenta hasta que las impurezas encuentren lugar en la cadena del polímero para aglomerarse.

PROMEDIO DE VOLUMEN DE COMPACTACIÓN DE LODOS (mL)		
TIEMPO (segundos)	PREPARACIÓN DE FLOC. CON H₂O DESTILADA	PREPARACIÓN DE FLOC. CON H₂O DEL PROCESO
15	220.0	236.7
30	206.7	223.3
45	196.7	220.0
60	190.0	213.3
300	180.0	190.0

Tabla 45. Promedio de volumen de compactación de lodos para el análisis del Efecto de la Concentración Iónica del Agua de Preparación de Floculante.

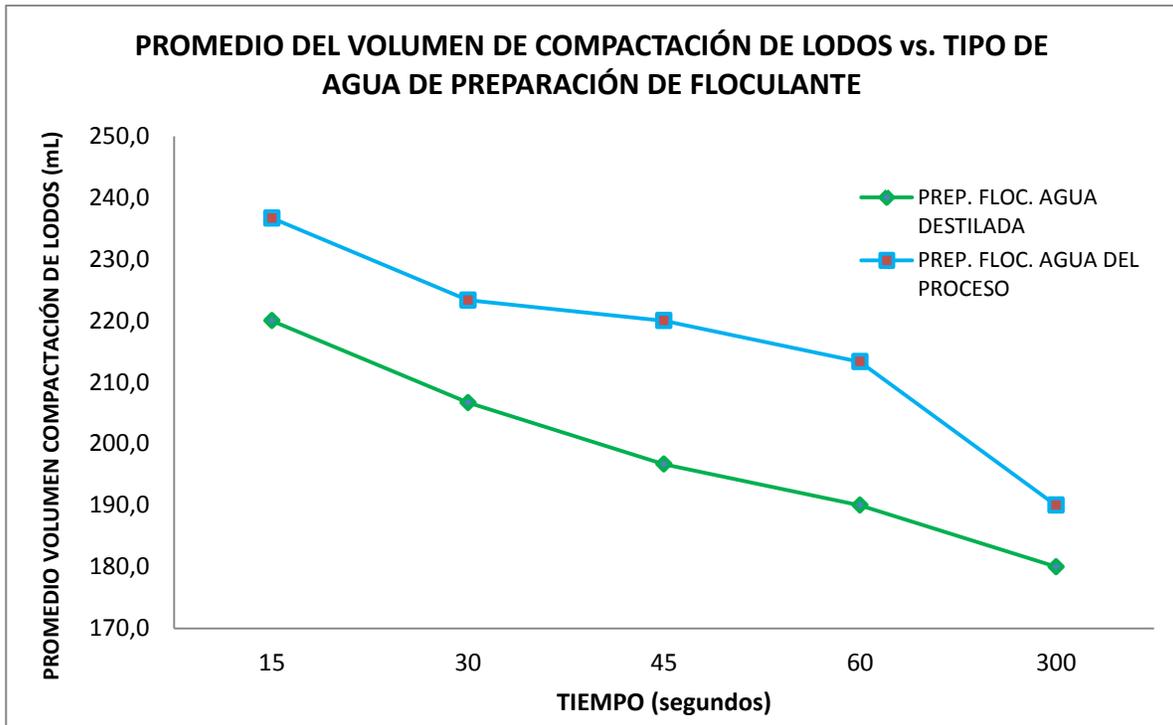


Gráfico 11. Promedio del volumen de compactación de lodos versus el Tipo de Agua de Preparación de Floculante.

Por lo presentado anteriormente, se concluye que durante la *Preparación del Floculante se debe emplear Agua Potable y de Baja Dureza.*

8. CONCLUSIONES

- La dosificación de floculante, y en general cualquier variable de preparación de floculante que represente costos adicionales para el ingenio, deben ser vistas como una inversión más que como un gasto económico, porque tal como se demostró con los ensayos de dosis realizados, si bien actualmente se aplica el floculante al proceso en dosis de 7 ppm, conviene modificar este valor a 8 ppm porque es con el cual se obtienen turbiedades más bajas en el jugo claro (según el rango de dosis estudiado) y lodos más compactos, propios de una clarificación de jugo buena calidad.
- El pH al cual se debe preparar la solución floculante para la clarificación de jugo en el ingenio Riopaila es del valor de 9.5, pues se observó con el rango ensayado, que es la zona alcalina en la cual tienen mayor eficiencia los floculantes aniónicos como LIPESA 1521M para producir jugos claros de turbiedades mínimas y lodos compactos.
- Los resultados obtenidos de temperatura de preparación de floculante, arrojaron información valiosa que le permite al ingenio establecer la temperatura (55°C) a la cual debe realizar la preparación de su solución floculante (según el rango de temperatura evaluado) para garantizar total homogenización y obtener valores de turbiedad en jugo claro y compactación de lodos mínimos.
- Los resultados obtenidos en el ensayo del efecto de la concentración iónica del agua de preparación de floculante, demuestran la importancia de emplear agua de baja dureza durante la preparación del floculante para la clarificación de jugo, pues con este tipo de agua se garantiza la total acción del floculante y activación completa y libre de todos sus radicales aniónicos para ejercer el proceso de floculación y acelerar la clarificación de jugo, obteniendo materiales de buena calidad (jugo claro de baja turbiedad y lodos compactos).
- Otra conclusión a tener en cuenta, además de las condiciones de preparación de floculante mencionadas, es la importancia del tiempo de maduración del floculante (entre tres y cuatro horas), pues aunque la preparación haya sido correcta, si la solución no se deja madurando el tiempo necesario, su acción no será influyente en la clarificación como consecuencia de que las cadenas del polímero no se encuentran totalmente estables y activas.
- Las condiciones de preparación de la solución floculante, tanto mecánicas como fisicoquímicas, al igual que el equipamiento que debe tener la

estación de preparación de floculante en el ingenio Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila, se podrán poner en marcha cuando Riopaila ejecute los cambios de mejoramiento que se tienen planeados con el proyecto: *“Mejoramiento del sistema de preparación de floculante en la estación de clarificación de jugo”*.

- Las variables que se deben controlar para la preparación de floculante son iguales para todos los floculantes aniónicos utilizados en la clarificación de jugo de las industrias azucareras. Sin embargo, los parámetros fisicoquímicos de las mismas deben ser establecidos por cada industria tras hacer pruebas de laboratorio, para llegar a conclusiones numéricas a nivel industrial según sea la capacidad de proceso característica de la fábrica.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que cuando exista la posibilidad de realizar trabajos prácticos relacionados con el tema de preparación de floculante, se tengan en cuenta más ensayos y mayor cantidad de muestras si el proceso lo permite, para evaluar mayores modificaciones y establecer de forma precisa las variables adecuadas de preparación de floculante para la clarificación de jugo del ingenio Riopaila.
- Con el objetivo de igualar la metodología de preparación de floculante en el ingenio Riopaila, la empresa debe reducir o eliminar las diferencias entre las metodologías de cada operario a través de capacitaciones profundas, donde se evidencie e interiorice que la forma adecuada de preparar el floculante LIPESA 1521M para la clarificación de jugo es siguiendo las recomendaciones del proveedor LIPESA S.A y teniendo en cuenta las condiciones establecidas en el presente trabajo, pues se observó que de esta forma se obtiene un jugo de menor turbiedad, es decir de mejor calidad y una producción más compacta de lodos.
- En vista de los inconvenientes señalados a lo largo del trabajo respecto a la preparación actual de floculante para la clarificación de jugo del ingenio Riopaila, se recomienda hacer uso tan pronto sea posible de la información suministrada en el presente trabajo, en el manual operacional desarrollado y en la cotización elaborada respecto a la estación de preparación de floculante, con el objetivo de mejorar este procedimiento y garantizar la producción de jugos más claros, reducir costos en insumos y promover la mejora continua del proceso de clarificación de jugo.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Romero, J., Torres J. Estudio de las variables en el proceso de clarificación de jugos diluidos de caña de azúcar. Tesis de grado. Universidad del Valle, Colombia. Facultad de Ingenierías. Ingeniería Química. Cali 1996.
- [2] Norma Técnica Colombiana, NTC 2369. Industrias Alimentarias. Floculantes derivados de la acrilamida utilizados en la clarificación del agua potable y de los jugos y jarabes de la caña de azúcar. Bogotá D.C. Octubre de 1994.
- [3] Svarovsky L. Solid-Liquid Separation. Cuarta Edición. Londres: Editorial Elsevier; 2000.
- [4] Cifuentes O; Campaña H; Kotik D. tema seis: ENOHSA Floculación. Ingeniería Sanitaria. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Bahía Blanca. Argentina. Consultado 26/09/2011. Disponible en la web: http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ing_sanitaria/ENOHSA%20Flocucion.pdf
- [5] Giraldo, M. Evaluación del efecto de materia extraña vegetal (hojas, cogollos, chulquines) en el proceso de clarificación de jugos de caña de azúcar. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Ingeniería Agroindustrial. Palmira 2005.
- [6] René Ochoa C. Propuesta para Automatización del Proceso de Clarificación del Jugo de Caña, por medio de Controladores de Lazos Múltiples. Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Mecánica. Guatemala 2008.
- [7] Rodríguez J; Gil Zapata N; Castillo Monroy E; Erazo V. Caracterización y Evaluación de Algunos Floculantes Industriales Utilizados para la Clarificación de Jugos de Caña de Azúcar en Colombia. Documento de trabajo No. 670. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA). Santiago de Cali. Junio 2009.
- [8] Smith B; Romo R; Molina J; Chen J. La Consistencia de la Performance de Floculantes Poliméricos en la Clarificación de Jugo de Caña. Revista Sugar y Azúcar Vol. 77 No.77 (1982): 59-66.
- [9] Cardel González J; Ramírez Soberon R; Ragasol Barbey V. Polímero Floculante a base de Acrilamida y Coagulante a base de Hidroxicloruro de

Aluminio y Poliamina-melamina para el Acondicionamiento de Agua Cruda. No de documento: NRF-200-PEMEX-2007. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios (PEMEX). Consultado: 23/09/2011. Disponible en la web:<http://www.pemex.com//files/content/NRF-200-PEMEX-2007.pdf>

[10] Rein P. Cane Sugar Engineering. Berlin: Editorial Bartens; 2007. Chapter 10: Clarification.

[11] Coagulación y Floculación del Agua. Tratamiento de agua. Dégremont. Consultado: 29/10/2011. Disponible en la web: http://cienciafyq.edumoot.com/pluginfile.php/823/mod_resource/content/1/coagulacion_floculacion_agua%20sencillo.pdf

[12] Preparación de Polímeros Aniónicos en Polvo para su Uso en la Industria Azucarera. Documento. Limpiadores Industriales y Petroleros S.A (LIPESA). Noviembre 1998.

[13] Morales S; Flores P. El Uso de Floculantes en la Industria Azucarera. Revista Cuba Azúcar. Ene.-Mar. (1975): 43-53.

[14] Fernández Cossio S. Respuesta Tisular a Materiales de Relleno. Estudio Experimental. Tesis de grado. Universidad Santiago de Compostela. Facultad de Medicina y Odontología. España 2007.

[15] Honig P. Principios de Tecnología Azucarera. Tomo I: Propiedades de los Azucares y No-azucares La Purificación de los Jugos. Compañía Editorial: CONTINENTAL S.A. Noviembre de 1974.

[16] Larrahondo J. Calidad de la Caña de Azúcar. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, 1995. p. 337 - 354.

[17] Morales Cuellar C. Análisis del porcentaje de remoción de turbidez como un Indicador de la eficiencia de los clarificadores de jugo tipo DORR de Ingenio San Carlos. Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingenierías. Escuela de Ingeniería Química. Guatemala, Agosto de 2005.

[18] Diagrama del Proceso de Obtención de Azúcar. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA). Santiago de Cali, Colombia. Disponible en la web: http://www.cenicana.org/pop_up/fabrica/diagrama_obtencion.php

[19] Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. En la web:

<http://books.google.com.co/books?id=HavGX8wguv4C&pg=PA50&dq=gomas+y+ceras++de+la+ca%C3%B1a+de+azucar&hl=es&sa=X&ei=rIsxT8SHDYv2gAe6m6CUBQ&sqi=2&ved=0CDMQ6AEwAA#v=onepage&q=gomas%20y%20ceras%20de%20la%20ca%C3%B1a%20de%20azucar&f=false>

[20] Documento: caracterización y evaluación de algunos floculantes industriales utilizados para la clarificación de jugos de caña de azúcar en Colombia. CENICAÑA. 2009.

[21] Smith B; Romo R; Molina J; Chen J. La Consistencia de la Performance de Floculantes Poliméricos en la Clarificación de Jugo de Caña. Revista Sugar y Azúcar. Volumen 77. Número 7. p. 59, 62-66. Julio 1982. Disponible en el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA). Santiago de Cali, Colombia.

[22] Documento: Concepto de la Clarificación. Disponible en el Ingenio Riopaila Castilla S.A., planta Riopaila.

[23] Rocasolano A. El Calor como Agente de Coagulación. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físico-químicas y Naturales de Zaragoza, Tomo II (1917). p. 92-97. Disponible en la web:
http://zaguan.unizar.es/revistas/acadCiencias/S1_T02_A1917/S1_T02_A1917_06.pdf

[24] Norma Interna de Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila. Clarificación de jugo. Instructivo del proceso "Elaborar Azúcar y Derivados" FEL-002.No. Edición: 6.

[25] Greenwood J; Rainey T; Doherty W. Light scattering study on the size and structure of calcium phosphate/hydroxyapatite flocs formed in sugar solutions. Revista Colloid and Interface Science 306(1):pp. 66-71. 2007. Disponible en la web:<http://eprints.qut.edu.au/14792/1/14792.pdf>

[26] Doherty W; Rackemann D. Some aspects of calcium phosphate chemistry in sugarcane clarification. Revista: International Sugar Journal, 111(1327).pp. 448-455. 2009. Disponible en la web:
<http://eprints.qut.edu.au/34335/1/c34335.pdf>

[27] Evangelista I. Grupo de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad Jaume I de Castellón. Hidrogeoquímica. Lección 17: Procesos de Adsorción. Disponible en la web: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>

[28] Gil N. Consideraciones acerca del desempeño operacional de las estaciones de clarificación y filtración. Publicado en: Carta Trimestral, CENICAÑA, 2008. Volumen 30, números 3 y 4. p. 15-19. Disponible en el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA). Santiago de Cali, Colombia.

[29] Tridib T; Ranjan B. Flocculation: A New Way to Treat the Waste Water. Revista: Journal of Physical Sciences. Volumen 10, p. 93-127. 2006. Disponible en la web: <http://vidyasagar.ac.in/journal/math/vol10/JPS10art9.pdf>

[30] Sassia P. Polímeros de la Acrilamida y Copolímeros Derivados para el Tratamiento de Aguas. Revista Iberoamericana de Polímeros; Consultado: 02/10/2011; Disponible en la web: <http://www.gedar.com/PDF/Residuales/GEDAR-Catalogo-Preparacion-Floculante.pdf>

[31] Documento: Ficha Técnica del Polímero Aniónico LIPESA 1521M. Código BT L-1521. Elaborado por Limpiadores Industriales y Petroleros S.A (LIPESA).

11.

ANEXO A



**MANUAL OPERACIONAL PARA
LA PREPARACIÓN DEL FLOCULANTE LIPESA
1521M EN LA ESTACIÓN DE
CLARIFICACIÓN DE JUGO DE RIOPAILA
CASTILLA S.A, PLANTA RIOPAILA**

**Elaborado por
LAURA VIVIANA MARÍN OCAMPO**

Las condiciones de preparación de la solución floculante, tanto mecánicas como fisicoquímicas se establecieron acorde a los cambios de mejoramiento que Riopaila tiene planeado realizar con el proyecto: *“Mejoramiento del sistema de preparación de floculante en la estación de clarificación de jugo”*.

El proyecto consiste en cambiar y reubicar los dos tanques actuales con un tamaño aproximado de 6 m³ (de preparación y dosificación) por tres de una capacidad de 10 m³ (uno de preparación, dos de dosificación), al igual que el sistema de bombeo y los accesorios que se requieren para controlar de forma más eficiente y constante la preparación de floculante, incluyendo su tiempo de maduración para lograr que su calidad sea mayor.

El proyecto se desarrolla bajo la necesidad de obtener turbiedades más bajas en el jugo claro y observar si se pueden reducir costos en insumos o si se puede obtener una excelente relación costo - beneficio.

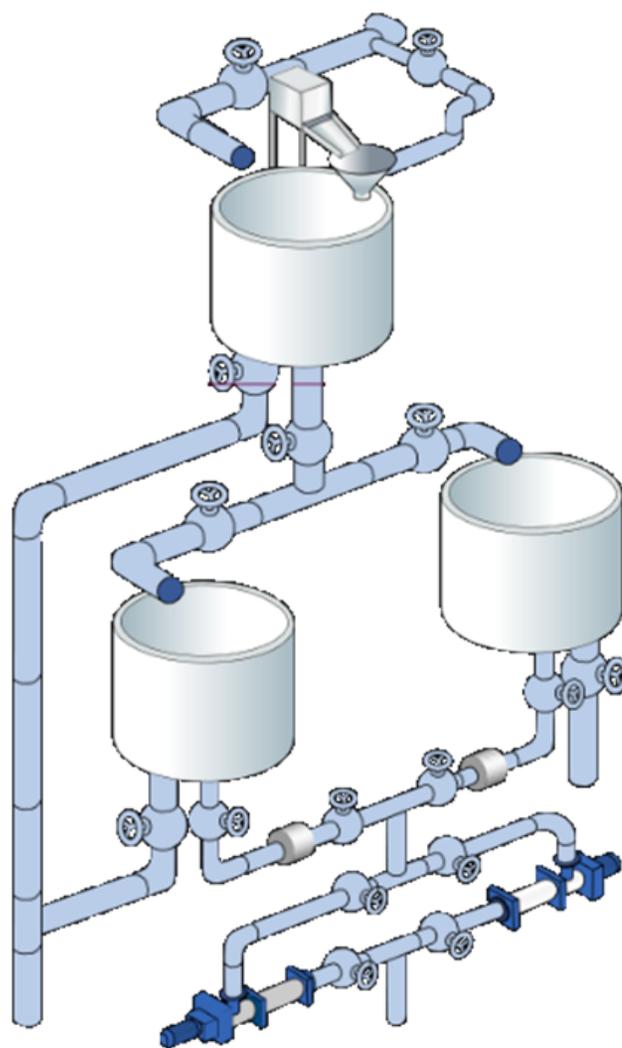
CONDICIONES FÍSICOQUÍMICAS DE PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN FLOCULANTE

H₂O DE PREPARACIÓN	
TEMPERATURA (°C)	55 ± 5
pH	9.5 ± 0.5
TIPO	POTABLE, DE BAJA DUREZA

FLOCULANTE TANQUE (TK) DE 10 m³	
CONCENTRACIÓN (%)	0.1
CANTIDAD FLOCULANTE EN POLVO (Kg)	10
NÚMERO DE VECES DE ADICIÓN DEL RECIPIENTE	13 ± 0.8
TIEMPO DE MADURACIÓN MÍNIMO (h)	3
VELOCIDAD AGITACIÓN (RPM)	(1-2) h= 30 (3-4) h= 20

DOSIFICACIÓN SOLUCIÓN FLOCULANTE (8 ppm)		TIEMPO EN DESOCUPARSE TKS DOSIFICADORES SEGÚN FLUJO DE FLOCULANTE
TONELADAS DE JUGO ENCALADO	L/min FLOCULANTE	HORAS (h)
100-200	14	11.90
200-300	22.5	7.41
300-400	31	5.38
400-500	39.5	4.22
500-600	48	3.47
600-700	74.5	2.24
700-800	65	2.56

Sistema de preparación de floculante para la clarificación de jugo en Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila



AGUA DE PREPARACIÓN:

El agua de preparación del floculante debe ser limpia, de baja dureza y temperatura cercana a los 55°C, para facilitar la homogeneidad de la solución y disminuir el tiempo que tarda la misma.

Por ello, el operario debe cerciorarse que la procedencia del agua con la que prepara la solución floculante sea del tanque elevado, donde se recolectan las aguas condensadas del calderín II con temperatura próxima de 40-60 °C. Dado a que posiblemente en ocasiones (por condiciones de operación de la fábrica) el agua tenga una temperatura demasiado elevada (evidenciada por medio del termómetro bimetálico), el operario deberá aplicar también agua fría potable proveniente de la planta de tratamiento, con el objetivo de equilibrar la temperatura hasta los niveles admisibles de preparación de floculante. Recordar que si bien la temperatura facilita la disolución del polvo en el agua, también puede actuar como una perturbación externa y por lo tanto debilitará la formación de las cadenas de polímero, obteniendo un floculante de baja calidad.

En los peores casos, cuando no se disponga de este tipo de agua se requiere entonces que como requisito mínimo el agua con la que se vaya a preparar la solución floculante sea limpia para que el floculante no comience a ejercer su acción antes de entrar en contacto con el jugo.

Para modificar el pH del agua, el operario debe adicionar soda caustica hasta lograr un valor cercano a 9.5, verificando este valor con el electrodo que está disponible en el tanque de preparación; debe hacerlo de forma pausada para permitir que el agua y la soda se mezclen apropiadamente y se generen lecturas de pH correctas. Adiciones aceleradas pueden arrojar valores de pH erróneos que se obtienen al momento en que entran en contacto el agua y la soda, mas no en el momento en que realmente se mezclan.

Se recomienda limpiar con abundante agua el electrodo después de cada preparación para que no queden remanentes del polímero o soda que generen lecturas erradas.

ADICIÓN DE FLOCULANTE EN POLVO:

Cuando el operario conozca los valores de pH y temperatura del agua de preparación, puede comenzar la adición de floculante, la cual debe ser por medio del *Vibrador de Tolva Eriez* para evitar la formación de grumos u "ojos de pescado" y lograr una mayor dispersión del polvo en el agua, por tanto, una mezcla más homogénea.

Mientras se esté adicionando en forma vibrátil, se deberá abrir la válvula del agua que entra el embudo mezclador para permitir que el floculante y el agua entren en contacto antes de caer en el tanque de preparación. Cuando se termine de agregar el floculante en polvo, continuar la adición del agua por medio de la tubería que entra directamente al tanque, hasta alcanzar el volumen. Todo este proceso debe acompañarse de una agitación moderada no mayor a 30 RPM.

Si se dispone de una balanza analítica, el operario debe pesar en esta una cantidad de floculante en polvo aproximada de 10 kilogramos.

Si no se dispone de una balanza analítica que cuantifique de forma precisa y exacta la cantidad de floculante que se debe adicionar para obtener una solución con una concentración de 0.1 %, se deberá contar con el recipiente empleado para este fin actualmente, el cual puede contener aproximadamente 724 gramos estando totalmente lleno.

Por lo tanto, la cuantía de floculante debe ser constante y correcta, y el operario debe encargarse responsablemente de añadir los 10 Kg establecidos del polímero en polvo LIPESA 1521M, con ayuda del recipiente destinado para tal fin.

Teniendo en cuenta la capacidad del recipiente, se encontró que para alcanzar la concentración requerida, el operario deberá agregar al equipo vibratorio 13.8 veces (es decir, aproximadamente trece veces y media) el recipiente totalmente lleno con el floculante en polvo.

AGITACIÓN DE LA SOLUCIÓN FLOCULANTE

La velocidad de agitación máxima que la cadena del polímero puede soportar sin sufrir daños en su estructura o disminuir su calidad, es de 50 RPM.

El operario deberá encender el motor de agitación del tanque de preparación desde el momento en que comience a adicionar agua y el resto de sustancias (soda caustica y floculante) para promover su mezcla.

La velocidad del motor debe ser de máximo de 30 RPM durante todo este procedimiento y hasta dos horas después. Pasado este tiempo, el operario deberá disminuir la velocidad a 20 RPM durante las próximas dos horas.

Con todo este procedimiento se garantiza la homogeneidad de la solución sin la necesidad de disminuir la calidad de la misma a causa del rompimiento de la cadena del polímero por perturbaciones externas como agitaciones aceleradas.

TIEMPO DE MADURACIÓN

Con el diseño de los nuevos tanques dosificadores de floculante (de 10 m³ de capacidad) se pretende aumentar el tiempo de maduración a más de tres horas. Por lo tanto, cada solución floculante que se dosifique a los clarificadores debe tener, por obligación y como mínimo este tiempo de maduración.

DOSIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN FLOCULANTE

La dosificación de floculante para una cantidad aproximada de 400-500 toneladas de jugo encalado es de 39.5 L/min, es decir que para que los tanques dosificadores queden vacíos y se haya dosificado toda la solución floculante, tienen que pasar en promedio cuatro horas y media.

NOTA: Tener en cuenta que el tiempo que tarden los tanques en desocuparse depende del flujo de floculante que se esté manejando. Los tanques se desocuparan más rápido cuando estén manejando flujos grandes de floculante y viceversa.

Ejemplo explicativo:

En el tanque dosificador I se encuentra la solución preparada de floculante y el tiempo de maduración que lleva es de dos horas y media. El operario está a punto de cerrar la válvula de salida de floculante del dosificador II porque su volumen es mínimo, y se dispone a abrir la válvula de salida de floculante del

tanque dosificador I y como este tarda cuatro horas y media en desocuparse (según un flujo promedio de 400-500 toneladas de jugo encalado), el floculante de dicho tanque tendrá en total más de las cuatro horas de maduración requeridas, siendo lo ideal.

De la misma forma cuando se esté terminando la solución floculante del tanque dosificador I, el floculante del tanque dosificador II tiene que tener como mínimo tres horas de maduración, para que a medida que se dosifica esté cumpliendo el tiempo requerido de maduración. Todo esto con la finalidad de disponer siempre de floculante y de garantizar que cada solución que se prepare tenga mínimo sus cuatro horas de maduración antes de ser dosificada.

Es incorrecto pensar que: "se debe dosificar el floculante apenas se prepara, pues como tarda cuatro horas en desocuparse el tanque, tendrá el tiempo de maduración requerido". Seguir este principio significaría dosificar la solución floculante sin que cumpla correctamente las cuatro horas de maduración: EL TIEMPO QUE DEMORE EL TANQUE EN DESOCUPARSE ES DIFERENTE DEL TIEMPO QUE SE REQUIERE PARA COMENZAR A DOSIFICAR LA SOLUCIÓN.

Cuando el jugo encalado venga con niveles elevados de sólidos insolubles o cuando se observe deficiencias en la clarificación se debe aumentar el flujo de floculante, es decir la dosificación.

ES ERRÓNEO pensar que la corrección que se debe tomar es adicionar más cantidad de floculante en polvo, ya que de este modo solo se aumenta la concentración y es muy factible que se produzcan "ojos de pescado" a causa de la existencia de mayor cantidad de sólidos para el mismo volumen de agua (sobresaturación), por consiguiente, se conseguirá un floculante de baja calidad.

La acción que se debe tomar es simplemente aumentar la dosificación de la solución. En estos casos, despreciar la cantidad de jugo encalado que este entrando.

En este orden de ideas, para cumplir lo establecido anteriormente el operario tendrá que preparar cada cuatro horas y media floculante para descargarlo a cualquiera de los tanques dosificadores (según flujo de Jugo Encalado de 400-500 toneladas).

Por turno entonces se harán cuando más dos preparaciones, disminuyendo el consumo de polímero y por tanto no solo se reducen costos sino que se espera se aumente el beneficio que consigue la empresa al obtener mejores resultados en la clarificación y valores menores de turbiedad en el jugo claro a causa de un floculante de excelente calidad.

LIMPIEZA DE LOS TANQUES

El operario debe limpiar todos los tanques con abundante agua caliente después de cada preparación. Para facilitar esta acción y disminuir el tiempo que pueda tardar, se cuenta con un sistema sencillo de tubería que dirige todos los "desechos" hacia la sequia.

El operario abre las válvulas hacia el tanque dosificador que se encuentre vacío. Después de cada preparación, el agua adicionada al tanque de preparación se dirigirá hacia el tanque dosificador vacío y de allí ira directo a la sequia por el sistema de tubería.

A parte de esto, los tres tanques se deben limpiar internamente al menos una vez por semana, con el objetivo de retirar los remanentes de floculante que se encuentren adheridos a las paredes.

CÁLCULOS NECESARIOS PARA ESTABLECER ALGUNOS VALORES DE ESTE MANUAL

DATOS RELEVANTES:

Capacidad del recipiente: 724 g

Concentración requerida: $0.1 \% = \frac{0.1 \text{ floculante en polvo}}{100 \text{ solución}}$

Volumen de la solución final (capacidad del tanque de preparación): 10 m^3

- *CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE FLOCULANTE QUE SE DEBE ADICIONAR AL TANQUE PARA LOGRAR 0.1 % EN LA SOLUCIÓN FINAL:*

$$10 \text{ m}^3 \text{ solución floculante} \times \frac{0.1 \text{ m}^3 \text{ floculante en polvo}}{100 \text{ m}^3 \text{ solución floculante}} \times \frac{1000 \text{ L floculante en polvo}}{1 \text{ m}^3 \text{ floculante en polvo}} = 10 \text{ Kg floculante en polvo}$$

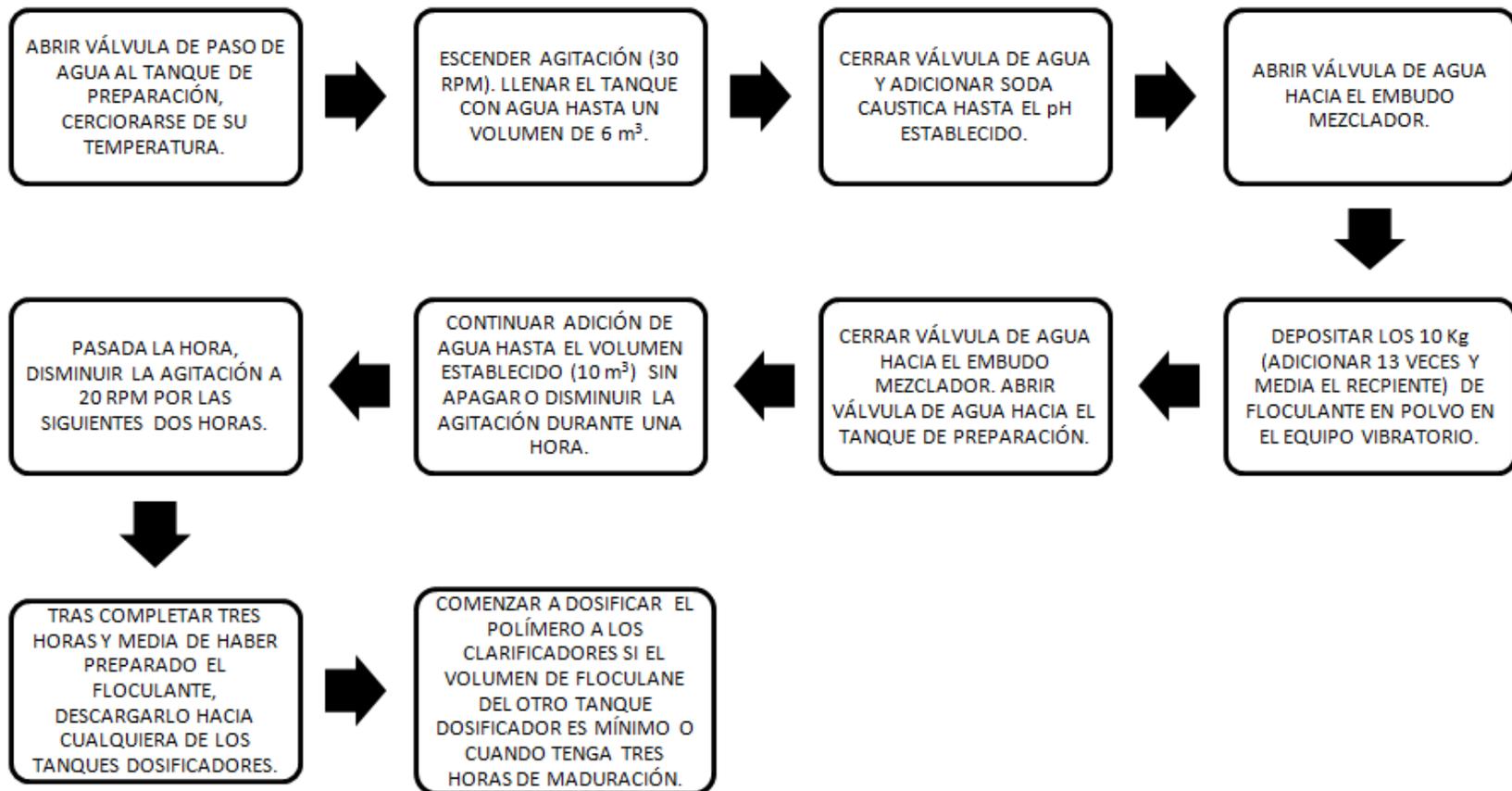
- *CÁLCULO DE LAS VECES QUE SE DEBE ADICIONAR EL RECIPIENTE CON FLOCULANTE EN POLVO AL VIBRADOR, PARA LOGRAR LOS 10 Kg (10000 g):*

$$\frac{10000 \text{ g}}{724 \text{ g}} = 13.8$$

- *CÁLCULO DEL TIEMPO QUE TARDAN LOS TANQUES DOSIFICADORES EN DESOCUPAR EL CONTENIDO DE FLOCULANTE:
Ejemplo realizado con un flujo de 400 TON jugo/hora (flujo de floculante de 39.5 L/min)*

$$10000 \text{ L SOLUCION FLOCULANTE} \times \frac{1 \text{ MINUTO}}{39.5 \text{ L SOLUCION FLOCULANTE}} \times \frac{1 \text{ HORA}}{60 \text{ MINUTOS}} = 4.22 \text{ HORAS}$$

DIAGRAMA DE FLUJO BÁSICO PARA EL SISTEMA DE PREPARACIÓN DE FLOCULANTE LIPESA 1521 M



Sistema de preparación de floculante para la clarificación de jugo en Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila

