

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
QUÍMICA INDUSTRIAL**



**PROYECTO DE GRADO
PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIATURA EN QUÍMICA INDUSTRIAL**

**“APLICACIÓN DE UN COAGULANTE NATURAL OBTENIDO A
PARTIR DE LA PENCA DE TUNA (OPUNTIA FICUS INDICA) PARA
LA MEJORA DE LA CALIDAD EN AGUAS DE CONSUMO EN LA
LOCALIDAD DE ACHOCALLA”**

**POSTULANTE: DANIELA ALCÁZAR LEÓN
TUTORA: LIC. GRACIELA ESPINOZA HUANCA**

**LA PAZ – BOLIVIA
2015**

INDICE

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	ANTECEDENTES	2
1.3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3.1	Identificación del problema	4
1.3.2	Formulación del problema	4
1.4	OBJETIVOS	5
1.4.1	Objetivo General	5
1.4.2	Objetivos Específicos	6
1.5	JUSTIFICACIÓN	6
1.5.1	Justificación Social	6
1.5.2	Justificación Técnica	7
1.5.3	Justificación Ambiental	7
1.6	ALCANCE Y LOCALIZACIÓN	8
1.6.1	Alcance	8
1.6.2	Localización	8

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1.	UBICACIÓN FÍSICA Y GEOGRÁFICA DE LA LOCALIDAD DE ACHOCALLA	9
2.1.1	Vías de Acceso	9
2.1.2	Relieve Topográfico	9
2.1.3	Datos Demográficos	10
2.1.4	Aspectos Socioeconómicos	10

2.2. LA TUNA	10
2.2.1 Origen	11
2.2.2 Clasificación taxonómica	11
2.2.3 Clasificación científica	12
2.2.4 Desarrollo	12
2.2.5 Importancia ecológica	13
2.2.6 Requerimientos agro - climáticos para el cultivo de tuna	13
2.2.7 Características morfológicas de la planta	16
2.2.8 Composición química de la planta	19
2.3. CARACTERISTICAS ESPECIFICAS DE LA PENCA DE TUNA	20
2.3.1 Definición y características	20
2.3.2 Composición química de la penca	21
2.3.3 Usos e importancia de la penca de tuna	21
2.4. EL AGUA	22
2.4.1 Usos del agua	22
2.4.2 Estructura atómica	23
2.4.3 El agua en la Tierra	24
2.4.4 Aguas naturales	24
2.5. CALIDAD DEL AGUA	25
2.5.1 Importancia del control de calidad de aguas	26
2.5.2 Parámetros de control de calidad del agua	26
2.5.2.1 Parámetros organolépticos	26
2.5.2.2 Parámetros fisicoquímicos	28
2.5.2.3 Parámetros químicos	29
2.5.2.4 Parámetros microbiológicos	33
2.6 CONTAMINACION DEL AGUA	34
2.6.1 Tratamiento de aguas	35
2.6.2 Clarificación del agua	35
2.7 COAGULACION – FLOCULACION	36
2.7.1 Partículas en suspensión	37

2.7.2	Suspensiones coloidales	37
2.7.3	Teoría de la estabilidad de los coloides	37
2.8	COAGULACION	39
2.8.1	Factores que influyen en la coagulación	39
2.8.2	Coagulantes para el tratamiento de aguas	42
2.8.3	Coagulantes Inorgánicos	42
2.8.4	Coagulantes naturales	44
2.9	FLOCULACION	45
2.9.1	Importancia del proceso de floculación	46
2.10	PRUEBA DE JARRAS	46
2.10.1	Definición	46
2.10.2	Recomendaciones para llevar a cabo una prueba de jarras	47
2.10.3	Criterios para la evaluación final en la prueba de jarras	48

CAPITULO III
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1	LOCALIZACIÓN Y RECOLECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	50
3.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA MATERIA PRIMA	50
3.2.1	Determinación de la humedad inicial de la penca de tuna	51
3.2.2	Determinación de cenizas	52
3.2.3	pH	53
3.2.4	Velocidad de secado	54
3.2.5	Coefficiente de difusividad de la humedad a través del sólido	59
3.3	OBTENCIÓN DE COAGULANTE	62
3.3.1	Proceso de obtención de coagulante de penca de tuna	62
3.4	RENDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE COAGULANTE DE PENCA DE TUNA	70

3.4.1	Recolección y selección de pencas aptas	70
3.4.2	Balance de materia para el proceso de obtención del coagulante	71
3.4.3	Cálculo de rendimiento para el proceso de obtención del coagulante	76
3.5	CARACTERIZACIÓN DEL COAGULANTE OBTENIDO	77
3.5.1	Pruebas Físicas	77
3.5.2	Pruebas de solubilidad	77
3.6	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA	78
3.7	APLICACIÓN DE COAGULANTE	80
3.7.1	Descripción del equipo de prueba de jarras	80
3.7.2	Determinación de las condiciones óptimas de tratamiento	84
3.8	ENSAYOS DE PRUEBAS DE JARRAS	90
3.8.1	Ensayos de jarras para la determinación de la dosis óptima de coagulante de penca de tuna	90
3.8.2	Ensayos de jarras para la determinación de la velocidad óptima de agitación lenta	101
3.8.3	Ensayos de jarras para la determinación del tiempo de sedimentación óptimo	105
3.8.4	Parámetros óptimos finales de tratamiento	107
3.8.5	Comparación de efectividad entre el Coagulante de Penca de Tuna (<i>Opuntia Ficus Indica</i>) y el coagulante Sulfato de Aluminio	108
3.9	ANÁLISIS DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA ANTES Y DESPUES DEL TRATAMIENTO	110
3.9.1	Parámetros organolépticos	110
3.9.2	Parámetros fisicoquímicos	111
3.9.3	Parámetros químicos	113
3.9.4	Parámetros microbiológicos	116
3.9.5	Parámetros microbiológicos	

CAPITULO IV
RESULTADOS Y COMENTARIOS

4.1	CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE LA MATERIA PRIMA	117
4.2	OBTENCIÓN DE COAGULANTE	118
4.3	RENDIMIENTO DE OBTENCION DE COAGULANTE DE	
	PENCA DE TUNA	120
4.4	CARACTERIZACION DEL COAGULANTE OBTENIDO	123
4.4.1	Pruebas Físicas	123
4.4.2	Pruebas de solubilidad	124
4.5	RECOLECCION DE MUESTRAS DE AGUA	124
4.6	APLICACION DE COAGULANTE	
4.6.1	Recomendaciones generales del proceso	125
4.6.2	Ensayos de jarras para la determinación de la dosis óptima de coagulante de penca de tuna	125
4.6.3	Ensayos de jarras para la determinación de la velocidad óptima de agitación lenta	130
4.6.4	Ensayos de jarras para la determinación del tiempo de sedimentación óptimo	132
4.6.5	Parámetros óptimos finales de tratamiento	133
4.6.6	Comparación de efectividad entre el Coagulante de Penca de Tuna (<i>Opuntia Ficus Indica</i>) y el coagulante Sulfato de Aluminio	134
4.7	ANALISIS DE PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA PREVIO Y POSTERIOR AL TRATAMIENTO CON PENCA DE TUNA	138
4.7.1	Parámetros organolépticos	138
4.7.2	Parámetros fisicoquímicos	139
4.7.3	Parámetros químicos	140

4.7.4	Parámetros microbiológicos	141
-------	----------------------------	-----

CAPITULO IV

RESULTADOS Y COMENTARIOS

5.1.	<u>CONCLUSIONES</u>	142
5.2.	<u>RECOMENDACIONES</u>	144

BIBLIOGRAFIA

ANEXO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO

–	Recolección de materia prima	146
–	Tratamiento de la materia prima en laboratorio	147
–	Obtención del coagulante de penca de tuna	148
–	Toma de muestras de agua para el tratamiento	149
–	Preparación de la solución del coagulante de penca de tuna	150
–	Prueba de jarras	151

ANEXO DOCUMENTACIONAL DEL PROCESO

–	Certificados de análisis microbiológico	
---	---	--

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Clasificación Taxonómica	11
Tabla N° 2: Clasificación Científica	12
Tabla N° 3: Composición científica	19
Tabla N° 4: Composición química	20
Tabla N° 5: Composición química de la penca	21
Tabla N°6: Parámetros organolépticos de calidad de aguas	27
Tabla N°7: Parámetros físico-químicos de calidad de aguas	29
Tabla N°8: Parámetros químicos de calidad de aguas	33
Tabla N°9: Parámetros químicos de calidad de aguas	34
Tabla N° 10: Valores del índice de Willcomb	49
Tabla N° 11: Datos para la determinación del pH	54
Tabla N° 12: Datos para la determinación de la velocidad de secado	55
Tabla N° 13: Datos para la determinación de la curva de secado	58
Tabla N° 14: Medidas y pesos de pencas recolectadas	70
Tabla N° 15: Balance de masa por operación en el Lote N° 1	72
Tabla N° 16: Balances de masa por operación en el lote N° 2	73
Tabla N° 17: Balances de masa por operación en el lote N° 3	75
Tabla N° 18: Datos por lote	76
Tabla N° 19: Pruebas físicas	77
Tabla N° 20: Pruebas de solubilidad	78
Tabla N° 21: Codificación de muestras	84
Tabla N° 22: Valores del índice de Willcomb	90
Tabla N° 23: Prueba de jarra N° 1	91
Tabla N° 24: Prueba de jarra N° 2	92
Tabla N° 25: Prueba de jarra N° 3	93
Tabla N° 26: Prueba de jarra N° 4	94
Tabla N° 27: Prueba de jarra N° 5	95
Tabla N° 28: Prueba de jarra N° 6	97

Tabla N° 29: Prueba de jarra N° 7	98
Tabla N° 30: Prueba de jarra N° 8	99
Tabla N° 31: Prueba de jarra N° 9 a 20 rpm	102
Tabla N° 32: Prueba de jarra N° 10 a 40 rpm	103
Tabla N° 33: Prueba de jarras N° 11 a 30 rpm	104
Tabla N° 34: Prueba de jarra N° 12	105
Tabla N° 35: Prueba de jarra N° 13	106
Tabla N° 36: Cuadro de resumen de parámetros finales óptimos	107
Tabla N° 37: Prueba de jarras N° 14 (Sulfato vs Coagulante de Tuna)	108
Tabla N° 38: Prueba de jarras N° 14 (Sulfato vs Coagulante de Tuna)	109
Tabla N° 39: Parámetros organolépticos	111
Tabla N° 40: Parámetros fisicoquímicos	112
Tabla N° 41: Parámetros químicos analizados	115
Tabla N° 42: Parámetros microbiológicos analizados	116
Tabla N° 43: Caracterización de la penca de tuna	117
Tabla N° 44: Tamaño de cortado de pencas para secado	119
Tabla N° 45: Pruebas físicas	123
Tabla N° 46: Pruebas de solubilidad	124
Tabla N° 47: Comparación general de dosificación (Muestra A)	126
Tabla N° 48: Comparación general de dosificación (Muestra B)	127
Tabla N° 49: Resumen de parámetros finales óptimos	133
Tabla N° 50: Penca de tuna Vs Sulfato de Aluminio (Muestra A)	134
Tabla N° 51: Penca de tuna Vs Sulfato de Aluminio (Muestra B)	136
Tabla N° 52: Resultados de parámetros organolépticos	138
Tabla N° 53: Resultados de parámetros fisicoquímicos	139
Tabla N° 54: Resultados de parámetros químicos analizados	140
Tabla N° 55: Resultados de parámetros microbiológicos analizados	141
Tabla N° 56: Parámetros óptimos finales de tratamiento	142

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografía N° 1: Planta de Tuna (Opuntia Ficus Indica)	11
Fotografía N° 2: Planta de Tuna (Opuntia Ficus Indica)	16
Fotografía N° 3: Pencas de Tuna (Opuntia Ficus Indica)	17
Fotografía N° 4: Diversidad de colores de las flores de Tuna	18
Fotografía N° 5: Diversidad de frutos	19
Fotografía N° 6: Pencas de tuna	20
Fotografía N° 7: Sulfato de aluminio	43
Fotografía N° 8: Coagulante de penca de tuna (Opuntia Ficus Indica)	45
Fotografía N° 9: Prueba de jarras	47
Fotografía N° 10: Recolección de materia prima	50
Fotografía N° 11: Determinación de la humedad	51
Fotografía N° 12: Pencas aptas libres de enfermedades	63
Fotografía N° 13: Pencas dañadas con hongos	63
Fotografía N° 14: Pelado de pencas	64
Fotografía N° 15: Secado de Tiras de Penca de tuna	66
Fotografía N° 16: Molido de pencas secas	67
Fotografía N° 17: Tamizado	67
Fotografía N° 18: Extracción de pigmentos con etanol	68
Fotografía N° 19: Coagulante final libre de pigmentos	69
Fotografía N° 20: Lugares de toma de muestra de agua (Punto 1)	78
Fotografía N° 21: Lugares de toma de muestra de agua (Punto 2)	79
Fotografía N° 22: Equipo de prueba de jarras usado	81
Fotografía N° 23: Preparación de muestras de agua	85
Fotografía N° 24: Preparación de dosis de coagulante	86
Fotografía N° 25: Adición de coagulante y etapa de coagulación	88
Fotografía N° 26: Prueba de jarras N° 5	96
Fotografía N° 27: Prueba de jarras N° 8	100

Fotografía N° 28: Colorímetro CO-1 0-100, 0-500	110
Fotografía N° 29: Análisis Químico Volumétrico	113
Fotografía N° 30: Residuos del tamizado	124
Fotografía N° 31: Extracción de agua posterior al tratamiento	125

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Árbol de problemas	4
Figura N° 2: Estructura atómica del agua	23
Figura N° 3: Proceso de clarificación del agua	35
Figura N° 4: Proceso de clarificación del agua	36
Figura N° 5: Teoría de estabilidad de coloides	38
Figura N° 6: Tamaño de cortado de pencas	54
Figura N° 7: Procedimiento de Obtención de Coagulante de Penca de Tuna	62
Figura N° 8: Tamaño de cortado de las pencas de tuna	65
Figura N° 9: Balance de masa del lote N° 1	72
Figura N° 10: Balance de masa del lote N° 2	74
Figura N° 11: Balance de masa del lote N° 2	75
Figura N° 12: Gráfico del equipo de prueba de jarras	80
Figura N° 13: Paletas de acero inoxidable	82
Figura N° 14: Jarras de 1 litro	83
Figura N° 15: Sifón para tomar muestras	83

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico N° 1: Variación de la humedad Vs. Velocidad de secado	58
Gráfico N° 2: Tiempo (t) vs Ln (X)	61
Gráfica N° 3: Porcentaje de pérdida por operación en el Lote -2	120
Gráfica N° 4: Porcentaje de pérdida por operación en el Lote -2	121

Gráfica N° 5: Porcentaje de pérdida por operación en el Lote -3	122
Gráfica N° 6: Dosificación de la muestra A – Dosificación Vs % de remoción	126
Gráfica N° 7: Dosificación de la muestra B – Dosificación Vs % de remoción	128
Gráfica N° 8: Velocidad vs Turbiedad (final) – Muestra A	130
Gráfica N° 9: Velocidad vs Turbiedad (final) – Muestra B	131
Gráfica N° 10: Prueba de jarras N° 12	132
Gráfica N° 11: Prueba de jarras N° 12	133
Gráfica N°12: Turbiedad (final) obtenida con el Coagulante de Penca de Tuna vs. Turbiedad (final) obtenida con el Sulfato de Aluminio – Muestra A	135
Gráfica N°13: Turbiedad (final) obtenida con el Coagulante de Penca de Tuna Vs. turbiedad (final) obtenida con el Sulfato de Aluminio – Muestra B	136

1. INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION

El agua es esencial para la vida y es necesaria para el desarrollo social, sanitario y económico de las poblaciones, así como para el mantenimiento del equilibrio medioambiental de los ecosistemas. En la actualidad, la falta de agua dulce en nuestro planeta es una problemática real causada principalmente por la escasez de lluvias, sobreexplotación de los acuíferos y la contaminación del medio natural.

El acceso al agua potable es un derecho fundamental para el ser humano e indispensable para cubrir sus necesidades básicas. A pesar de ello, actualmente 1.500 millones de personas viven sin acceso al agua potable, y casi un 50 por ciento de la población total de los países que está en vías de desarrollo¹ padece en un momento dado algún problema de salud debido a la falta de agua y saneamiento. Esta situación obliga a la población a consumir agua directamente de ríos y vertientes, sin ningún tipo de tratamiento previo, lo que representa un grave riesgo para su salud, que va asociado con la aparición de gran parte de las enfermedades transmitidas por el agua tales como hepatitis A, disentería, cólera o fiebre tifoidea.²

Bolivia es uno de los países con alto contenido de agua, ocupando el 16° lugar entre 180 países con respecto a la disponibilidad de recursos hídricos.³ Sin embargo, con una clara desigualdad en cuanto a su distribución y accesibilidad.

En este proyecto se presenta una alternativa tecnológica convencional para la mejora de calidad de aguas naturales.

A partir de métodos adecuados se procedió a obtener el coagulante a partir de la **penca de tuna** (*Opuntia Ficus Indica*), comprobando un rendimiento de obtención aceptable. Posteriormente se comprobó la factibilidad de su uso en aguas naturales en la Localidad de Achocalla del Departamento de La Paz.

¹ Informe Mundial sobre el Agua publicado en 2009 por la UNESCO

² Programa 21 (Naciones Unidas, 1992)

³ Informe Mundial sobre el Agua publicado en 2009 por la UNESCO

1.2 ANTECEDENTES

El agua destinada a la bebida y a la preparación de alimentos debe estar exenta de microorganismos capaces de provocar enfermedades, y de sustancias minerales y orgánicas que puedan ocasionar efectos fisiológicos perjudiciales. El agua denominada “potable”, debe ser aceptable desde el punto de vista estético, es decir, debe estar libre de turbidez, color y sabor perceptibles, así como de sabores desagradables, además debe tener una temperatura razonable.⁴

En poblaciones en vías de desarrollo varios son los factores que dificultan la distribución de agua potable, tales como la falta de recursos económicos y la lejanía de algunas poblaciones a las redes de abastecimiento público. Esta circunstancia obliga a los pobladores a abastecerse directamente de aguas superficiales procedentes de ríos y vertientes, sin ningún tipo de tratamiento. Es por esto que los países en vías de desarrollo han adaptado una serie de tecnologías de tratamiento y almacenamiento domiciliario de agua que son accesibles, simples y económicas con el fin de mejorar la calidad de aguas y por supuesto la calidad de vida. Entre los sistemas disponibles, los más utilizados a pequeña escala, son: ebullición, cloración, filtración del agua con medios porosos, luz ultravioleta, método SODIS, coagulantes naturales, etc. Una de las que está siendo estudiada es la utilización de extractos naturales de plantas para la clarificación del agua, estas sustancias actúan de modo similar a los coagulantes inorgánicos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo el color y la turbidez inicial de ésta, algunos de estos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas. Su origen natural, garantiza la inocuidad para el ser humano.

En la actualidad, el uso de coagulantes de origen inorgánico para la potabilización, tales como el Sulfato de Aluminio o el Cloruro Férrico, es cuestionada debido a los problemas medioambientales que comprenden la generación de lodos tóxicos, además de la relación con la enfermedad neurodegenerativa de Alzheimer y el empeoramiento de enfermedades como el cáncer.

⁴ Metodología de extracción de coagulantes naturales para clarificación de agua superficial

En 1990 se publicó una lista de coagulantes naturales de origen vegetal que tradicionalmente se habían utilizado en África, la India y América del Sur, entre ellos, se encontraban las semillas de almendra, albaricoque, melocotón, *Cactus Opuntia*, legumbres, guisantes, lentejas, nueces, habas y *Moringa Oleifera.*, algunos de ellos al ser estudiados han proporcionado resultados positivos y efectivos en relación a su actividad de mejora de calidad de aguas.⁵ En Bolivia se han estado realizando algunos proyectos al respecto como por ejemplo:

- Utilización de productos nativos para la clarificación de aguas de consumo
- Estudio de una alternativa para la producción de un floculante natural a partir de la **penca de la tuna**

Estos proyectos servirán como base para poder determinar el método más adecuado de obtención del coagulante natural.

Como antecedente social, en la Localidad de Achocalla ubicada en la provincia Murillo del Departamento de La Paz, la provisión del agua en los hogares, escuelas, postas sanitarias, corrientes de riego, etc. proviene de fuentes superficiales captadas de ríos y vertientes. Esta agua no cuenta con ningún tipo de tratamiento de desinfección, ni control de calidad previo al consumo y se provee directamente a través de pequeños sistemas de almacenamiento y distribución construidos por la comunidad y financiados por la alcaldía con el apoyo de ONG'S.

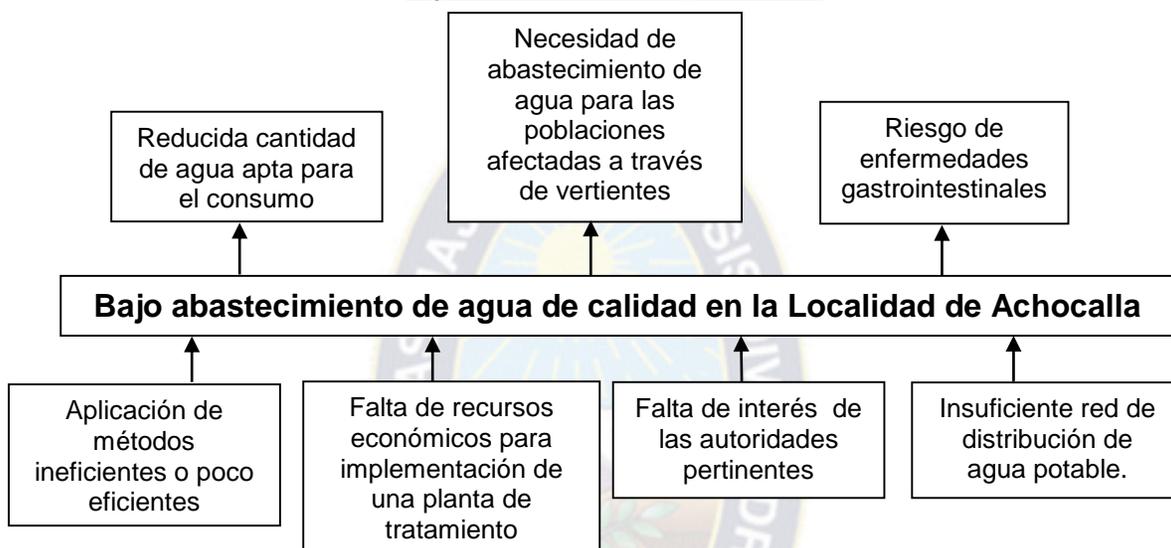
⁵ Jahn S.A.A, Dirar H.; *Studies on natural water coagulants in the Sudan*

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Identificación del problema

Se presenta a continuación un árbol de problemas que servirá de ayuda para determinar cuál es el problema que se pretende solucionar con este proyecto.

Figura N° 1: Árbol de problemas



1.3.2 Formulación del problema

El dicho de que “el agua es vida” es casi innegable. El agua es el elemento imprescindible de la vida pues no existe ningún ser vivo que pueda mantenerse sin este recurso natural. La NCPEPB (Nueva Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia) reconoce esta importancia y declara en el Artículo 373, que “El agua constituye un derecho fundamentalísimo para la vida”⁶. Lastimosamente la falta de acceso al agua potable es aún reducida en nuestro país, y especialmente en el sector rural⁷, es por esto que los habitantes buscan alternativas para la obtención de aguas en condiciones adecuadas para su consumo. El agua que consumen pertenece a fuentes naturales como por ejemplo la lluvia, ríos, riachuelos, vertientes, lagunas y por último fuentes subterráneas

⁶ Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia - 2009

⁷ Informe Mundial sobre el Agua publicado en 2009 por la UNESCO

como los pozos acuíferos. El agua recolectada es muchas veces consumida sin previo tratamiento, y esto puede generar a los consumidores enfermedades gastrointestinales, que llegarían a causar incluso la muerte especialmente a niños menores de cinco años. Lastimosamente muchas veces las demandas de las comunidades rurales no son escuchadas por las autoridades pertinentes.

Este caso se refleja en la Localidad de Achocalla ubicada a 30 minutos de la Sede de Gobierno donde los comunarios demuestran preocupación por que el agua que se consume tiene considerable contenido de hierro, parásitos, color, turbiedad y coliformes fecales puesto que no es potable, según aseguró a EL DIARIO, el presidente de la Asociación de Medio Ambiente y Turismo de Achocalla.

Según las investigaciones, con lo único que cuenta esta comunidad son estanques para acumular agua de las vertientes para luego distribuirlas sin tratamiento alguno a través de cañerías que las llevan hasta los domicilios o piletas públicas. Es por esto que los vecinos piden que el MMAyA (Ministerio de Medio ambiente y Aguas) que contribuya al cumplimiento de la Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia y ayude a solucionar el acceso de la población al agua domiciliaria de calidad, así mismo solicitan el apoyo en la implementación de “sistemas de tratamiento y potabilización de aguas”.⁸

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

- Mejorar la calidad de aguas naturales de consumo en la Localidad de Achocalla, mediante la aplicación de un coagulante natural obtenido a partir de la **penca de tuna** (*Opuntia Ficus Indica*), como opción de un tratamiento alternativo convencional.

⁸ El Diario (Bolivia) 26-Feb-2010

1.4.2 Objetivos Específicos

- Obtener un coagulante natural a partir de **penca de tuna** (*Opuntia Ficus Indica*) y realizar su posterior caracterización, mediante la aplicación de técnicas de laboratorio.
- Localizar puntos adecuados de muestreo en la Localidad de Achocalla.
- Realizar el muestreo de aguas naturales para los ensayos respectivos en la región estudiada, siguiendo la Norma Boliviana NB- 496.
- Determinar la cantidad de coagulante necesaria para el tratamiento de las muestras de agua mediante el empleo del método de prueba de jarras.
- Aplicar el coagulante natural obtenido en las muestras de agua natural recolectadas.
- Aplicar sulfato de aluminio en las muestras de agua natural recolectadas, para comparación con los resultados obtenidos mediante la utilización de coagulante de Penca de tuna .
- Realizar un análisis fisicoquímico, químico y microbiológico en las muestras de agua recolectadas, antes y posterior al tratamiento convencional para la comparación de efectividad entre el coagulante natural obtenido de penca de tuna y el sulfato de aluminio.

1.5 JUSTIFICACION

1.5.1 Justificación Social

Las poblaciones de las comunidades del valle de la Localidad de Achocalla se encuentran en un proceso intenso de urbanización y densificación. Una de las consecuencias de esta urbanización acelerada es evidentemente la creación de demanda adicional de servicios básicos, entre ellos el de agua potable. Actualmente estas poblaciones se han provisto de agua de varias cooperativas, asociaciones y comités que se valen de la existencia de varias vertientes en la parte alta del valle. Estas vertientes proveen de agua tanto para riego como para agua domiciliaria. Durante el diagnóstico se comprobó que en su gran mayoría no se realiza ningún control de calidad del agua consumida y por lo tanto tampoco se

realiza ninguna desinfección. Debido a esto existe un número significativo de enfermedades diarreicas en la población, presentándose un porcentaje del 10.25% de muertes por este tipo de enfermedades en niños menores de 5 años⁹

Por situaciones similares es que los países desarrollados vienen efectuando en el contexto de las políticas de cooperación al desarrollo, planes estratégicos de intervención y cooperación en los que el acceso al agua potable y al saneamiento básico es considerado como una prioridad social.

1.5.2 Justificación Técnica

En los últimos años científicos de todo el mundo han intentado hallar, entre la flora y la fauna, especies endémicas capaces de remover con eficiencia las impurezas presentes en el agua destinada para consumo humano. La solución para mejorar la situación sanitaria y condiciones de vida de la población afectada, pasa por orientar la investigación presente y futura al desarrollo de tecnologías innovadoras, eficaces, sostenibles, económicas, fiables y fáciles de manejar, que sean socialmente aceptadas por la comunidad, y que permitan dotar de agua de calidad a la población rural.¹⁰

1.5.3 Justificación Ambiental

En la actualidad, el creciente interés por el tema ambiental, los estándares internacionales de calidad y medio ambiente ha motivado el surgimiento de nuevas técnicas de mejoramiento de calidad de aguas. Actualmente se utilizan productos químicos para la clarificación de aguas naturales, estos productos al acumularse aumentan el riesgo de contaminación para el medio ambiente, favoreciendo a la destrucción de la capa de ozono y al calentamiento global. Es por esto que al aplicarse los coagulantes naturales, estos residuos no afectarían al medio ambiente. Otro beneficio que se obtendría ambientalmente sería la disminución de residuos del cultivo de tuna, ya que los productores de tuna deben

⁹ Atlas de Municipios INE

¹⁰ Objetivos de Desarrollo para el Milenio (Naciones Unidas, 2000)

realizar podas periódicas de las pencas para que así exista una mejor producción de esta fruta, estas pencas actualmente son desechadas generando así más residuos medio ambientales que se descomponen e incentivan a la proliferación de insectos.

1.6 ALCANCE Y LOCALIZACION

1.6.1 Alcance

Este proyecto pretende principalmente alcanzar la obtención de coagulante natural a partir de **penca de tuna** (*Opuntia Ficus Indica*) y su posterior aplicación en muestras de aguas naturales con contenido de color y turbiedad. Muestras que serán obtenidas de fuentes hídricas ubicadas en la Localidad de Achocalla de la provincia Murillo del departamento de La Paz.

1.6.2 Localización

- Para la obtención del coagulante, se recolectó la materia prima (**pencas de tuna**) de la misma Localidad de Achocalla del Departamento de La Paz.
- El muestreo de aguas se realizó en la Localidad de Achocalla de la provincia Murillo del Departamento de La Paz, se realizó muestreos en diferentes puntos para determinar el punto más factible para la aplicación del coagulante, escogiéndose los puntos con mayor presencia de turbiedad.
- La obtención de coagulante y los análisis de las muestras de agua previos y posteriores a la aplicación del coagulante se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de la carrera de Química Industrial de la Facultad de Tecnología.
- La determinación de la cantidad adecuada de coagulante mediante el método de prueba de jarras se realizó en el Instituto de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Mayor de San Andrés, ubicadas en predios del Monoblock Central.

3. MARCO TEORICO

2.1. UBICACIÓN FÍSICA Y GEOGRÁFICA DE LA LOCALIDAD DE ACHOCALLA

Desde épocas remotas Achocalla representa un importante atractivo turístico con campos de cultivo, crianza de ganados y recursos naturales de fauna y flora.

El Municipio de Achocalla fue creado por decreto Ley del 24 de Octubre de 1947 con los Cantones de Asunta Quillviri, Villa Concepción, Capital – Cantón Achocalla, Distrito 6-Alpacoma, Distrito 7-Norte Achocalla, Distrito 8-Los Ángeles y Distrito 9.

Achocalla es un valle que forma parte de la provincia Murillo del Departamento de La Paz, se encuentra ubicada entre las coordenadas (16°34'5.76" de Latitud Sud y 68°10'15.55" de Longitud Oeste). Cuenta con una extensión de 339.6 Km². Se encuentra a 30 km del centro de la ciudad de La Paz. La localidad de Achocalla está limitada al norte con la ciudad del Alto, al sur con Layuri, al este con la ciudad de La Paz y al oeste limita con las provincias de Los Andes e Ingavi.

2.1.5 Vías de Acceso

Una de las vías principales de acceso es la carretera que va de la zona sur del Departamento de La Paz hacia Mallasa, luego de pasar Mallasilla continúa subiendo hacia el valle de Achocalla, uniendo distintas urbanizaciones y comunidades de este Municipio.

La otra vía principal de acceso es desde El Alto, iniciando al otro lado del cruce entre la carretera a Oruro y la Av. Litoral, en el sector denominado Molino Andino donde se encuentra el acceso que baja hacia el Valle a Achocalla.

2.1.6 Relieve Topográfico

El área del Valle u Hoyada de Achocalla se abre de manera similar al valle de la ciudad de La Paz. El límite de la ciudad de El Alto y de los Distritos 8 y 9 de Achocalla que se encuentran en la meseta (Altiplano) terminan en un barranco, donde empieza el Valle u Hoyada de Achocalla.

Este Valle u hoyada tiene dos sectores, la parte alta que es más húmeda, donde se encuentran vertientes y las lagunas de Jacha Khota y la laguna Pacajes. En la zona alta se ubica la plaza principal, alrededor de esta se presenta uno de los lugares con mayor densidad poblacional del Municipio.

2.1.7 Datos Demográficos

Según los datos del censo 2012 la población del municipio asciende a 16,993 habitantes¹¹, de los cuales un porcentaje corresponde al área urbana y otro al área rural. De acuerdo a los datos obtenidos de los anteriores censos poblacionales en Bolivia y las proyecciones realizadas esta población aumentaría hasta 17,862 el año 2023 y hasta 24,631 el año 2036.

2.1.8 Aspectos Socioeconómicos

El Municipio de Achocalla presenta un carácter en transición entre rural y urbano. Especialmente en el valle se observa que existen zonas de cultivo al lado de las urbanizaciones. Las zonas más densamente pobladas se encuentran aledañas a los caminos. La zona del valle húmedo de Achocalla presenta más población y más actividad de todo tipo y posee las vertientes que sirven tanto para consumo doméstico como para riego. La base económica de este Municipio está constituida por la agricultura, agropecuaria, turismo, artesanías y crianza de ganados.

2.2. LA TUNA

La tuna o nopal es una especie herbácea arborescente, arbustiva o rastrera, con forma simple o de matorral. No requiere tierras de gran calidad, puede crecer en terrenos poco fértiles y de escasa humedad y puede vivir hasta 80 años.

Esta planta se encuentra incluida dentro del género de las Cactáceas, que se distribuyen por toda América tropical y la región mediterránea. Existen varias especies americanas que se desarrollan favorablemente en lugares cálidos,

¹¹ Instituto Nacional de Estadísticas (INE)

semicálidos y desérticos, tales como “*O. ficus indica*, *O. amyclae*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*”.

2.2.9 Origen

La tuna es una especie originaria de América. Ha sido aprovechada en un primer momento por culturas tecnológicamente avanzadas en la agropecuaria como lo son las civilizaciones Inca y Azteca. Por otra parte se sabe que la planta de tuna (*Opuntia Ficus Indica*) es originaria del Perú, Bolivia, como también de las planicies de México, desde las cuales se han llevado su cultivo al resto del mundo.

Fotografía N° 1: Planta de Tuna (*Opuntia Ficus Indica*)



Fuente: Periódico La Patria

2.2.10 Clasificación taxonómica

En la clasificación científica la tuna pertenece al género *Opuntia*, dentro de la familia de las *Cactáceas*. Según Romero¹² se clasifica la tuna de la siguiente manera:

Tabla N° 1: Clasificación Taxonómica

Clase	Angiosperma
Subclase	Dicotiledónea
Orden	Cactales
Familia	Cactácea
Género	Opuntia
Especie	Opuntia Ficus Indica

Fuente: Periódico La Patria

¹² Romero - Manual de Cultivo de la Tuna y Producción de Cochinilla, Ayacucho Perú (1990).

2.2.11 Clasificación científica

El primer nombre español es Higo de las Indias, que alude a su origen, las "Nuevas Indias" y de allí su primer nombre científico: *Cactus ficus-indica* L. Según bibliografía¹³ se clasifica a la tuna de la siguiente manera:

Tabla N° 2: Clasificación Científica

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Caryophyllales
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Género	Opuntia
Especie	<i>ficus-indica</i>
Nombre binomial	<i>O. ficus-indica</i>

Fuente: "El Cultivo De Tuna" *Opuntia ficus índica*.

2.2.12 Desarrollo

En zonas áridas y semiáridas existen diferentes factores ambientales que limitan el crecimiento normal de las plantas, tales como temperaturas altas y bajas, escasez de agua y limitación en la disponibilidad de nutrientes.

La evolución de las cactáceas en estos ambientes ha conducido a que las diferentes especies del género *Opuntia* desarrollen características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas que les permitan adaptarse a estas condiciones ambientales adversas.

La proliferación masiva de ciertos tejidos parenquimatosos, asociados con un aumento en el tamaño de las vacuolas y una disminución en los espacios intercelulares, le permite a la planta acumular agua en breves períodos de humedad.

¹³ "El Cultivo De Tuna" *Opuntia ficus índica*. Gerencia Regional Agraria La Libertad, Perú.

La *Opuntia ficus indica* se desarrolla adecuadamente en suelos marginales, planos o pendientes. Se recomienda en suelos alcalinos, desarrollándose mejor con la utilización de abonos y riego durante la etapa de crecimiento. La planta soporta bruscos cambios de temperatura, sin embargo, se desarrolla mejor entre los 18 a 26 °C. Por lo que se refiere a precipitación pluvial es poco exigente, ya que se encuentra en zonas con lluvias de 125 o más milímetros al año, aunque los excesos de humedad pueden provocar enfermedades fungosas y daños por insectos. En cuanto a la altitud, esta planta se cultiva en nuestro país entre los 1800 a 2800 msnm.¹⁴

2.2.13 Importancia ecológica

La *Opuntia ficus indica* puede ser un recurso importante en la economía rural y de las zonas áridas en general, por los altos rendimientos que se pueden obtener en la fruta de la tuna y demás usos. Además de que es recomendable en las superficies que no cuentan con una precipitación pluvial adecuada para la siembra de especies más exigentes en agua y suelo, que la *Opuntia ficus indica*.

Esta planta es muy eficaz para adaptarse y crecer donde confluyen mayor número de factores limitantes que no son favorables para la mayoría de especies vegetales.

2.2.14 Requerimientos agro - climáticos para el cultivo de tuna

- Propagación y plantación

La **tuna** puede propagarse de forma sexual o vegetativa, siendo esta última práctica la más utilizada debido a que es más sencilla y se logra mantener las características de la planta madre, mientras que la propagación por semillas se utiliza para el mejoramiento genético. Desde el punto de vista botánico, las areolas son tejidos capaces de producir nuevos brotes, flores o raíces. Por tanto, cladodios, flores y frutos en desarrollo son capaces de originar una nueva planta,

¹⁴ “El cultivo de tuna” *Opuntia ficus indica*. Gerencia Regional Agraria La Libertad

ya que todos estos órganos poseen areolas; aunque sólo los cladodios se usan para la propagación de la tuna.

- **Longevidad de la plantación**

La longevidad promedio de las plantaciones de **tuna** a nivel comercial es de 5 a 7 años, alcanzando algunas veces hasta 10 años en terrenos apropiados, con pH Neutro, con labores culturales permanentes y con buenos rendimientos. Con un buen manejo de plagas y labores oportunas la planta de tuna puede llegar a vivir hasta 80 años alcanzando de 80 a 90 t/ ha/año de masa fresca.

- **Suelo**

Los mejores suelos para las plantaciones de **tuna** son los de origen calcáreo con textura arenosa, con buen drenaje, profundidad media y con un pH neutro o de preferencia alcalino. El suelo deberá tener buena fertilidad natural y al menos 30 cm de profundidad para garantizar un buen vigor de las plantas.

- **Agua**

Aunque el cultivo de la **tuna** es tolerante a la falta de agua, si se pretende establecer una plantación para la producción de verdura deberá ser accesible y cercano a una fuente de agua, con el fin de proporcionarle el manejo adecuado a la plantación, y obtener mejores rendimientos.

- **Condiciones climáticas**

En cuanto a las condiciones climáticas requeridas para su desarrollo, es necesaria una temperatura media anual de 16-28° C; una precipitación pluvial media anual de 150-1800 mm, la altitud tiene un margen de 800 - 1800 msnm. En general, los rangos mencionados se refieren a condiciones óptimas de desarrollo de la planta de tuna, sin embargo, la especie, prolifera fuera de estas características. Una vez establecida la plantación, se adapta a condiciones o áreas disturbadas, aunque requieren de labores y cuidados para lograr buenos rendimientos y duración de la plantación.

- Poda

La poda es una práctica clave en el manejo de la **tuna**, ya que permite dar forma a las plantas, mejorar la calidad de los frutos y facilitar labores tales como la cosecha y el control fitosanitario del cultivo.

La poda de formación implica la eliminación de paletas que estén muy juntas o tiendan a cruzarse, las paletas ubicadas horizontalmente o las que se encuentran en sentido perpendicular a la hilera, dejando idealmente 2 paletas por paleta madre. La poda de tunales permite mayor entrada de luz a las plantas, con lo que aumenta la producción de fruta y se facilita la cosecha.

En cuanto a las podas en esta planta se distinguen cuatro tipos de podas¹⁵:

- ✓ **Podas de producción.-** Deben realizarse cuando brotan un número excesivo de pencas, siendo recomendable eliminar algunas de ellas, para mantener en equilibrio de la planta.
- ✓ **Poda de formación.-** Se realiza la eliminación de las pencas mal ubicadas, y de las que dan sombra a otras pencas, el sol ayuda a una mejor formación de frutos.
- ✓ **Poda de sanidad.-** Consiste en eliminar pencas en mal estado, es decir, con malformaciones y aquellas dañadas por plagas y enfermedades.
- ✓ **Poda de renovación.-** Llevada a cabo en plantaciones con edades de 10 a 15 años se efectúa cuando la planta ha perdido vigor por su vejez, se eliminan casi todas las pencas, dejando solo el tronco.

¹⁵ Manual Técnico de la Tuna - Romero

2.2.15 Características morfológicas de la planta¹⁶

Esta planta es muy singular en su especie, presentándose las siguientes características:

- Raíces

Son algo superficiales, pero forman un sistema denso, extendido y robusto, de forma cilíndrica, con superficies delgadas y crecen formando una malla, razón por la cual evitan la erosión. La raíz crece rápidamente alcanzando hasta cinco metros a los cuatro años de edad.

- Tallo

La **tuna** es una especie herbácea arborescente de tres a cinco metros de alto y tres a cuatro metros de copa a su tronco, es leñoso y mide entre 20 a 50cm de diámetro. El tallo, a diferencia de otras especies de cactáceas, está conformado por un tronco y ramas aplanadas que posee cutícula gruesa de color verde de función fotosintética y de almacenamiento de agua en los tejidos.

Fotografía N° 2: Planta de Tuna (Opuntia Ficus Indica)



Fuente: Manual Técnico de la Tuna

¹⁶ Manual Técnico de la Tuna - Romero

- **Pencas**

También denominadas cladodios de 30 a 60cm de largo x 20 a 40cm de ancho y de 2 a 3cm de espesor. De color verde opaco con areolas que contienen espinas más o menos numerosas de color amarillo.

Estas estructuras transforman la luz en energía química a través de la fotosíntesis y están recubiertos por una cutícula del tipo lipídica, interrumpida por la presencia de estomas, los mismos que permanecen cerrados durante el día. La cutícula del cladodio evita la deshidratación provocada por las altas temperaturas del verano. La hidratación normal del cladodio alcanza hasta un 95% de agua en peso. Las pencas y tallos tienen espinas.

Fotografía N° 3: Pencas de Tuna (*Opuntia Ficus Indica*)



Fuente: Manual Técnico de la Tuna

- **Hojas**

Sólo en cladodios internos, transformadas en espinas en forma de garra, engrosadas en su base, para defensa. Las hojas desaparecen cuando las pencas han alcanzado un grado de desarrollo y en cuyo lugar quedan las espinas.

- **Flores**

Las flores que presenta la Opuntia Ficus Indica, son solitarias, están localizadas en la parte superior de la penca y miden de 6 a 7 cm de longitud. Cada areola produce por lo general una flor, aunque no en una misma época de floración, unas pueden brotar el primer año, otras el segundo y tercer año. Las flores se abren entre 35 a 40 días de su brote. Sus pétalos son de colores vivos: amarillo, anaranjado, rojo, rosa. Sépalos numerosos de color amarillo claro a rojizo o blanco.

Fotografía N° 4: Diversidad de colores de las flores de Tuna



Fuente: Manual Técnico de la Tuna

- **Fruto**

Es una baya de forma ovoide esférica de color verde y toma diferentes colores cuando maduran, son comestibles, agradables y dulces; la pulpa es gelatinosa

conteniendo numerosas semillas, sus dimensiones y coloración varían según la especie; presentan espinas finas y frágiles de 2 a 3 mm de longitud.

Fotografía N° 5: Diversidad de frutos



Fuente: Manual Técnico de la Tuna

2.2.16 Composición química de la planta

Según Romero¹⁷ la planta presenta la siguiente composición química:

Tabla N° 3: Composición científica

Elemento	% en masa	Minerales	(mg/100gr)
Humedad	81.4	Calcio	57.0
Proteínas	1.1	Fósforo	32.0
Lípidos	0.4	Hierro	1.2
Glúcidos	13.5		
Fibra	3.1		
Cenizas	0.5		

Fuente: Romero - Manual de Cultivo de la Tuna

¹⁷ Romero - Manual de Cultivo de la Tuna y Producción de Cochinilla, Ayacucho Perú (1990).

- Según estudios en la Facultad de Bioquímica de la Universidad San Francisco Xavier se tienen los siguientes resultados:

Tabla N° 4: Composición química

Componente	Planta (%)
Proteína bruta	1.55
Lípidos	0.26
Carbohidratos	11.50
Fibra cruda	---
Pectinas	3.12
Cenizas	---
Agua	93.57

Fuente: Romero - Manual de Cultivo de la Tuna.

2.3. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE LA PENCA DE TUNA

2.3.4 Definición y características

Se conoce como **penca** a los tallos aplastados, carnosos, cubiertos de pequeños agrupamientos de pelos rígidos y por lo general, de espinas.

Fotografía N° 6: Pencas de tuna



Fuente: Elaboración propia

La **penca**, conocida también como paleta o cladodio, tiene la forma oval y mide entre treinta a cuarenta centímetros de longitud por veinte de ancho.

2.3.5 Composición química de la penca

En Sucre (Chuquisaca), la Facultad de Bioquímica de la Universidad San Francisco Xavier, presenta los siguientes resultados:

Tabla N° 5: Composición química de la penca

Rubro	Composición (%)
Proteína bruta	11.6
pH	5.0
Grasa	2.4
Carbohidratos	64.2
Fibra cruda	7
Cenizas	12.6
Humedad	92

Fuente: Departamento de Bioquímica de la Universidad San Francisco Xavier

2.3.6 Usos e importancia de la penca de tuna

Por su elevado contenido de nutrientes, las **penca de tuna** se constituyen en un alimento delicioso, se comen en una gran variedad de platillos, tales como las ensaladas. También se consumen asadas y figuran como ingrediente en diversos platillos típicos. De las penca tiernas se puede preparar escabeche también se emplea en la obtención de bebidas, mermeladas y un sinfín de usos alimenticios¹⁸.

En cuanto al uso medicinal las **penca** son ricas en agua y contienen además sales minerales (calcio, fósforo, hierro) y vitaminas, sobre todo la vitamina C. Además, la **penca de tuna** es una gran fuente de fibra que contribuye a estimular

¹⁸ Productividad ecológica y valor forrajero de tunales, (Opuntia ficus-índica)

el mejor trabajo del intestino, por lo que resulta un gran complemento en la dieta diaria de las personas que deseen obtener un peso saludable. Otra propiedad interesante es aquella relacionada con el ácido crasuláceo (CAM) que inhibe o suspende el crecimiento de varias especies bacterianas.

En cuanto al uso industrial el mucílago o goma, obtenido por el prensado de la penca se utiliza para la fabricación de películas adherentes de gran finura, que sirven como impermeabilizante de paredes y techos en viviendas. La penca de tuna destaca también en el campo cosmético, principalmente en beneficio del cuero cabelludo y el cabello ya que ayuda a desinflamarlo y contribuyendo a una profunda hidratación del cuero cabelludo, otorgándole un brillo duradero.

2.4. EL AGUA

El agua (del latín *aqua*) es uno de los recursos naturales que, a diferencia de muchos otros, resulta imprescindible para el desarrollo de la vida humana. A diferencia de la mayoría de los recursos naturales, como por ejemplo, el petróleo, posee la cualidad de renovarse continuamente en virtud de su ciclo hidrológico¹⁹.

El agua es el principal e imprescindible componente del cuerpo humano. El ser humano no puede estar sin beberla más de cinco o seis días sin poner en peligro su vida. Hoy en día el mundo se enfrenta a graves y complejos problemas relacionados con el agua, la cual debe ser salvaguardada ya que ninguna de las necesidades humanas básicas del género humano, como la alimentación, salud, higiene, trabajo, y vivienda pueden ser satisfechas sin tomar en cuenta el papel desempeñado por el agua¹⁹.

2.4.5 Usos del agua

Los usos del agua admiten, fundamentalmente, dos clasificaciones: los usos consuntivos son los que extraen el recurso de su ubicación natural, lo utilizan para sus fines (industriales, agrícolas o domésticos) y luego los vierten en un distinto lugar y con una calidad distinta. Por el contrario, los usos no consuntivos no

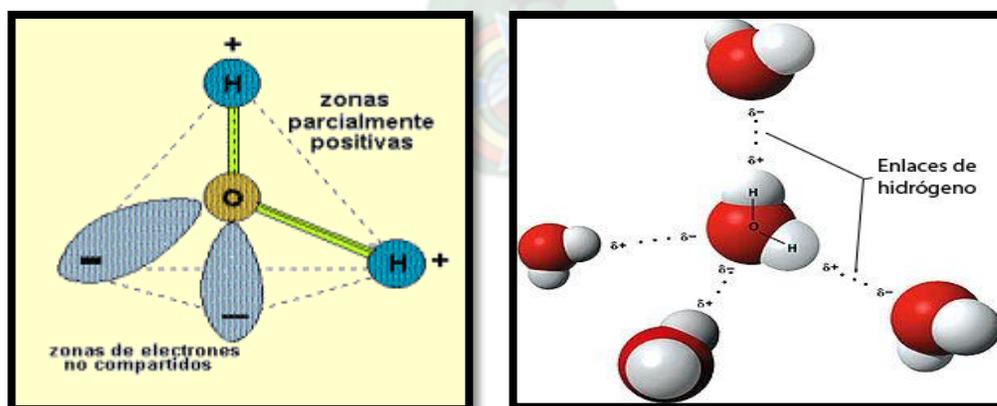
¹⁹ Gestión de recursos hídricos - Luis Balairón Pérez

requieren sacar el agua de su lugar ni modifican la calidad del recurso. Diariamente utilizamos grandes cantidades de agua, para propósitos diferentes: Para beber, cocinar, lavar platos, higiene y muchos otros propósitos. Pero el agua se utiliza no solamente para los propósitos domésticos, los seres humanos también utilizan el agua por ejemplo, en la industria, agricultura y en muchas otras actividades, esto hace que se tenga un especial interés en el control de calidad de las aguas que consumimos los humanos.

2.4.6 Estructura atómica

Fue Henry Cavendish quien descubrió en 1781 que el agua es una sustancia compuesta y no un elemento, como se pensaba desde la antigüedad. Los resultados de dicho descubrimiento fueron desarrollados por Antoine Laurent de Lavoisier dando a conocer que el agua estaba formada por oxígeno e hidrógeno. En 1804, el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac y el naturalista y geógrafo alemán Alexander von Humboldt demostraron que el agua estaba formada por dos átomos de hidrógeno por cada átomo de oxígeno (H_2O). Esta molécula está unida por medio de dos enlaces covalentes. El ángulo entre los enlaces H-O-H es de $104'5''$. El oxígeno es más electronegativo que el hidrógeno y atrae con más fuerza a los electrones de cada enlace²⁰.

Figura N° 2: Estructura atómica del agua



Fuente: El agua - Carlos Jaime Prieto Bolívar

²⁰ Estructura atómica y enlace químico - Jaime Casabó Gisbert

2.4.7 El agua en la Tierra

El término agua generalmente se refiere a la sustancia en su estado líquido, aunque la misma puede hallarse en su forma sólida llamada hielo, y en su forma gaseosa denominada vapor.²¹

El total del agua presente en el planeta cubre 3/4 partes (71 %) de la superficie de la Tierra. El 97% es agua salada, la cual se encuentra principalmente en los océanos y mares; sólo el 3 %de su volumen es dulce. De esta última, un 1 por ciento está en estado líquido. El 2% restante se encuentra en estado sólido en capas, campos y plataformas de hielo en las latitudes próximas a los polos. Fuera de las regiones polares el agua dulce se encuentra principalmente en humedales y, subterráneamente, en acuíferos.

2.4.8 Aguas naturales

Las aguas naturales son aquellas cuyas propiedades originales no han sido modificadas por la actividad humana²²; y se clasifican en:

- Superficiales, como aguas de lagos, lagunas, pantanos, arroyos con aguas permanentes y/o intermitentes, ríos y sus afluentes, nevados y glaciares;
- Subterráneas, en estado líquido o gaseoso que afloran de forma natural o por efecto de métodos artificiales.
- Meteóricas o atmosféricas, que provienen de lluvias de precipitación natural o artificial.

✓ Aguas superficiales

Son aguas que se encuentran en la superficie de la Tierra. Pueden ser corrientes que se mueven en una misma dirección y circulan continuamente, como los ríos y arroyos; o bien estancadas como los lagos, lagunas, charcas y pantanos.

Las aguas que discurren en la superficie de la tierra son muy importantes para los seres vivos, a pesar de que suponen una ínfima parte del total del agua que hay

²¹ El agua. Sus formas, efectos, abastecimientos y usos - Carlos Jaime Prieto Bolívar

²² Reglamento en materia de contaminación hídrica

en el planeta. Su importancia reside en la proporción de sales que llevan disueltas, que es muy pequeña en comparación con las aguas marinas. Por eso decimos que se trata de agua dulce. En general proceden directamente de las precipitaciones que caen desde las nubes²³.

✓ **Vertientes**

Etimológicamente la palabra vertiente proviene del término latino *verter*. Una vertiente es un declive o lugar por donde corre el agua. Suele tratarse de una superficie topográfica inclinada, que se encuentra entre puntos altos (como cimas). Por su ubicación geográfica entre montañas, los valles suelen contar con vertientes. Es habitual que ríos y arroyos fluyan por las vertientes y permitan que las poblaciones de la zona aprovechen el agua.

2.5. CALIDAD DEL AGUA

El término calidad del agua es relativo y sólo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso.

Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria. Para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar.²⁴ La calidad de las aguas puede verse afectada por varios factores, llegándose a contaminar.

La contaminación del agua se define como la alteración de las propiedades físico-químicas y/o biológicas del agua por sustancias ajenas, por encima o debajo de los límites máximos o mínimos permisibles, según corresponda, de modo que produzcan daños a la salud del hombre deteriorando su bienestar o su medio ambiente²⁵.

²³ La contaminación de las aguas superficiales – José E. Muñoz

²⁴ Aspectos Físicoquímicos de la Calidad Del Agua - *Ada Barrenechea Martel*

²⁵ Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica - Ley del Medio Ambiente 1333

2.5.1 Importancia del control de calidad de aguas

Es de primordial interés controlar la calidad del agua, ya que es posible que ligeras variaciones en el contenido de alguna de las sustancias presentes puede variar sensiblemente su calidad y hasta la puede convertir en inservible y a veces hasta peligrosa para la salud. De esto se deduce la gran importancia que tiene el estudio analítico detallado de diferentes parámetros del agua del consumo humano.

Es importante anotar que la evaluación de la calidad del agua se realiza usando técnicas analíticas adecuadas para cada caso. Para que los resultados de estas determinaciones sean representativos, es necesario dar mucha importancia a los procesos de muestreo y a las unidades y terminología empleadas.

2.5.2 Parámetros de control de calidad del agua

El agua para consumo humano debe ser sometida, reglamentariamente, a un control de calidad anterior a su distribución y posterior utilización. El objetivo de controlar la calidad del agua es la eliminación o reducción de los constituyentes del agua que sean perjudiciales para la salud humana y el bienestar de la comunidad. De esta forma se asegura que los consumidores del agua obtengan un recurso en condiciones de ser utilizado.

Para establecer en qué estado se encuentra el agua se deben evaluar una serie de parámetros que son los que siguen a continuación:

2.6.2.1 Parámetros organolépticos

- Color

Originalmente el agua no tiene color, pero puede estar levemente coloreada debido a la presencia de materiales pigmentados tales como ácidos húmicos, turba, plancton, y de ciertos metales como hierro, manganeso, cobre y cromo, disueltos o en suspensión. Este color causado por la materia en suspensión es llamado "color aparente". A pesar de estar íntimamente ligado a la turbiedad, el color puede presentarse como una característica independiente. El color incide

sobre el aspecto estético del agua, quitándole transparencia²⁶ y se expresa en unidades de color [UCV]. Aunque no existe ninguna correlación entre el color y la contaminación, el usuario asocia su presencia con ella.

- **Olor**

En su estado puro, el agua no produce sensaciones olfativas. Muchas veces el olor del agua depende del tipo de actividad para la cual se ha usado o incluso el tipo de actividad que se desarrolle en zonas cercanas. El olor del agua puede tener su origen en contaminantes químicos naturales, orgánicos e inorgánicos, y fuentes o procesos biológicos (por ejemplo, microorganismos acuáticos), o en la contaminación debida a sustancias químicas sintéticas, o pueden ser resultado de la corrosión o del tratamiento del agua (por ejemplo, la cloración). La presencia de olores extraños o muy intensos debe ser tomada como indicador de que esa agua puede no ser apta para el consumo.

- **Sabor**

El agua pura es, en realidad, insípida. Sin embargo, hay aguas que provienen de determinadas fuentes que tienen sabores característicos.

Es el caso del agua de deshielo y el agua mineral, de cuyo sabor son responsables los minerales disueltos en ella, que a su vez provienen del suelo. La detección de mucho sabor a cloro en el agua o incluso de otro tipo de sabores podría ser un indicador de que se trata de agua de mala calidad.

Tabla N°6: Parámetros organolépticos de calidad de aguas

Parámetro	Valor máximo aceptable	Método de análisis Referencial
Color	15UCV	Espectrofotométrico
Olor	Ninguno	Número umbral
Sabor	Aceptable	Organoléptico

Fuente: Elaboración propia²⁷

²⁶ NB 495 Agua Potable - Definiciones y Terminología

2.6.2.2 Parámetros fisicoquímicos

- Temperatura

El factor temperatura es importante porque actúa como elemento que retarda o acelera la actividad biológica, absorción de oxígeno y dióxido de carbono de la atmósfera por el agua, e influye en la proliferación de algas y en la precipitación de compuestos.

Además afecta los procesos de tratamiento como la desinfección por cloro, y por tener influencia sobre la viscosidad del agua incide también indirectamente en los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. Se dice que a bajas temperaturas retarda la formación de los flóculos.

- pH

Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección. Por lo general, las aguas naturales (no contaminadas) presentan un pH en el rango de 5 a 9.²⁸ Existe un determinado intervalo de pH, el cual favorece la labor del coagulante. Por lo general actúan mejor en medios alcalinos.

- Turbiedad

Es la propiedad óptica de una muestra de agua para disipar y absorber la luz en vez de transmitirla en línea recta.²⁹ Se entiende por turbiedad a la falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión.

Cuanto más sólidos en suspensión haya en el líquido, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez y cuanto más turbia el agua, menor es su calidad.

Las principales causas de la presencia de turbiedad en el agua son: la erosión causada por las corrientes, el crecimiento de microorganismos y los desechos domésticos e industriales.

²⁷ NB 512 Agua Potable - Requisitos

²⁸ NB 495 Agua Potable - Definiciones y Terminología

²⁹ NB 495 Agua Potable - Definiciones y Terminología

La turbiedad es importante considerarla en aguas de abastecimiento público por las siguientes razones:

- ✓ **Estética.-** La turbiedad en sí puede considerarse que no tiene efectos sobre la salud, pero afecta la calidad estética del agua y puede ocasionar rechazo por parte del consumidor.
- ✓ **Filtrabilidad.-** El grado de turbiedad determina el sistema de tratamiento más adecuado.
- ✓ **Desinfección.-** Se ha demostrado que en el proceso de eliminación de los microorganismos patógenos por agentes químicos como el cloro, las partículas causantes de turbiedad reducen la eficiencia del proceso, protegiendo físicamente a los microorganismos de que tengan un contacto directo con el desinfectante, lo cual incide en los costos.

Tabla N°7: Parámetros físico-químicos de calidad de aguas

Parámetro	Valor máximo aceptable	Método de análisis Referencial
Temperatura	Aceptable	Termometría
pH	6.5 - 9.0	Electrométrico
Turbiedad	5 UNT	Nefelométrico

Fuente: *Elaboración propia*³⁰

2.6.2.3 Parámetros químicos

- Alcalinidad

La alcalinidad del agua es la medida de su capacidad para neutralizar ácidos. La alcalinidad de las aguas naturales se debe primariamente a las sales de ácidos débiles.

Los bicarbonatos son los compuestos que más contribuyen a la alcalinidad, puesto que se forman en cantidades considerables por la acción del dióxido de carbono sobre materia básica del suelo.

³⁰ NB 512 Agua Potable - Requisitos

La alcalinidad está influenciada por el pH, la composición general del agua, la temperatura y la fuerza iónica.

Es un factor esencial en los procesos de clarificación de aguas pues está directamente relacionado con el pH. Si bien un valor de alcalinidad muy elevado no tiene consecuencias en la salud, al presentarse en una cantidad muy elevada en aguas estas presentan un sabor desagradable y tienden a ser rechazadas por el consumidor.

- **Dureza**

La dureza es la característica del agua que representa la concentración de iones de calcio, magnesio y otros metales, expresado bajo la forma de carbonato de calcio, en miligramos por litro (mg/l). La dureza está relacionada con el pH y la alcalinidad; depende de ambos.

Aún no se ha definido si la dureza tiene efectos adversos sobre la salud. Pero se la asocia con el consumo de más jabón y detergente durante el lavado. Un agua muy dura puede formar depósitos en las tuberías y hasta obstruirlas completamente³¹.

- **Calcio y magnesio**

Algunos estudios han señalado el posible efecto protector de la dureza del agua (el calcio y magnesio son los minerales responsables de ella) frente a varias patologías como el cáncer o las enfermedades cardiovasculares¹⁻².

Existe una evidencia sustancial, de que el consumo de agua con altos niveles de calcio, podrían producir el riesgo de desarrollo y aparición de piedras en la orina producidas por el oxalato cálcico.³²

³¹ Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua - Quím. Ada Barrenechea Martel

³² Magnesium and calcium content in waters- JODRAL A, NAVARRO M*, LOPEZ H, LOPEZ MC

- **Cloruros**

Las aguas superficiales normalmente no contienen cloruros en concentraciones tan altas como para afectar el sabor, excepto en aquellas fuentes provenientes de terrenos salinos o de acuíferos con influencia de corrientes marinas. Cantidades de cloro elevadas pueden incidir en el sabor.

- **Sulfatos**

Los sulfatos son un componente natural de las aguas superficiales pueden provenir de la oxidación de los sulfuros existentes en el agua y, en función del contenido de calcio, podrían impartir un carácter ácido.

Los sulfatos de calcio y magnesio contribuyen a la dureza del agua y constituyen la dureza permanente. Un alto contenido de sulfatos puede proporcionar sabor al agua y podría tener un efecto laxante, sobre todo cuando se encuentra presente el magnesio.

- **Nitratos**

El nitrógeno es un nutriente importante para el desarrollo de los animales y las plantas acuáticas. Por lo general, en el agua se encuentra formando amoníaco, nitratos y nitritos.

En general, los nitratos (sales del ácido nítrico, HNO_3) son muy solubles en agua debido a la polaridad del ion. En los sistemas acuáticos y terrestres, los materiales nitrogenados tienden a transformarse en nitratos.

Una de las consecuencias principales de los nitratos en aguas de consumo, afecta a los niños que consumen estas aguas.

Existe una enfermedad llamada metahemoglobinemia infantil, en la cual los niños con esta enfermedad presentan una excesiva conversión de hemoglobina a metahemoglobina, y por esto presentan incapacidad de transportar oxígeno al cerebro.³³

³³ Estándares europeos para el agua potable, segunda edición, publicada por la OMS después de la convención de Génova en 1970

- **Sodio**

La relación del sodio con el resto de cationes es muy importante para la agricultura y patología humana. El suelo puede ser afectado por la cantidad elevada de sodio y además existen personas que no pueden beber agua con alta cantidad de sodio pues padecen ciertas enfermedades como la hipertensión arterial, que a largo plazo puede generar problemas cardiacos.

- **Hierro**

El hierro en aguas naturales puede estar en estado ferroso, esto se puede dar por el desprendimiento de herrumbre proveniente de algún metal desechado en el agua, lo cual da un color amarillento al agua.

En cuanto a la salud el hierro en elevadas cantidades no se muestra como un peligroso componente. Por esto se clasifica como un contaminante secundario (o de estética) ya que afecta el sabor y la apariencia de una manera negativa. Grandes cantidades de hierro en el agua potable pueden darle un sabor metálico muy desagradable a las comidas y bebidas.

- **Manganeso**

Aunque raramente el manganeso sobrepasa 1mg/l, el manganeso en exceso produce cambios notables en el sabor y manchas tenaces en la ropa lavada y en accesorios de instalaciones sanitarias.

Aunque el manganeso está presente en nuestra dieta diaria, el consumir excesivas cantidades a largo plazo puede causar problemas relacionados con el tracto respiratorio y el cerebro.

El Manganeso puede causar la enfermedad de Parkinson, embolia de los pulmones y bronquitis.

El comportamiento del Mn es similar al del Fe, pues se trata de dos metales que frecuentemente se hallan asociados.

Es por esto que el hierro, junto con el manganeso, puede originar problemas en las tuberías de agua debido a que se podrían desarrollar microorganismos.

Tabla N°8: Parámetros químicos de calidad de aguas

Parámetro	Valor máximo aceptable	Método de análisis Referencial
Alcalinidad	370,0 mg/l CaCO ₃	Volumétrico
Dureza	500,0 mg/l CaCO ₃	Volumétrico EDTA
Calcio	200.0 mg/l	Volumétrico EDTA
Magnesio	150.0 mg/l	Espectrometría de AA
Cloruros	250,0 mg/l	Volumétrico
Sulfatos	400,0 mg/l	Espectrometría de AA
Nitratos	45,0 mg/l	Espectrometría de AA
Sodio	200,0 mg/l	Espectrometría de AA
Hierro	0.3 mg/l	Espectrometría de AA
Manganeso	0.1 mg/l	Espectrometría de AA

2.6.2.4 Parámetros microbiológicos

- Coliformes totales

La denominación genérica Coliformes Totales designa a un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua.

Los coliformes totales nos ayudan a determinar si el agua que se consume es apta para el consumo humano.

La presencia de coliformes en el agua también contribuye al crecimiento de algas y malezas acuáticas, lo que puede disminuir seriamente los niveles de oxígeno y causar la muerte de peces y otros ejemplares de la vida silvestre que dependen del oxígeno.

Tabla N°9: Parámetros químicos de calidad de aguas

Parámetro	Valor máximo aceptable	Método de análisis Referencial
Coliformes Totales	0 UFC/100ml < 2 NMP/100 ml	Filtración de membrana Por número más probable(NMP)

Fuente: Elaboración propia³⁴

2.7 CONTAMINACION DEL AGUA

Se entiende por contaminación del agua a la alteración de las propiedades físico-químicas y/o biológicas del agua por sustancias ajenas, por encima o debajo de los límites máximos o mínimos permisibles, según corresponda, de modo que produzcan daños a la salud del hombre deteriorando su bienestar o su medio ambiente³⁵.

La mayoría de las personas piensa que la contaminación es un problema generado únicamente por los seres humanos, pero la naturaleza también desempeña un papel importante. El agua incorpora minerales y otros componentes naturales de su entorno y, para bien o para mal, éstos se vuelven parte del agua que consumen las personas.

Los contaminantes presentes en aguas naturales disminuyen la calidad de las aguas, generando rechazo de los consumidores, es por tal causa que las aguas que presentan alteración en sus propiedades, deben ser tratadas debidamente antes de ser distribuidas para el consumo.

2.7.1 Tratamiento de aguas

Las aguas naturales contaminadas por diferentes aspectos, requieren de un tratamiento para obtener aguas adecuadas para el consumo. El tratamiento de

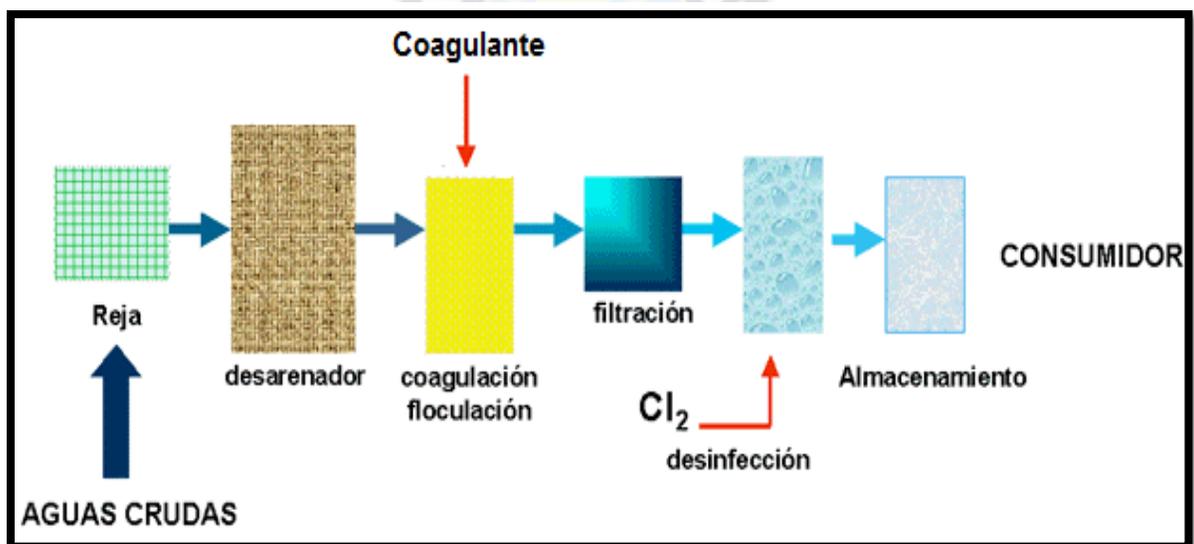
³⁴ NB 512 Agua Potable - Requisitos

³⁵ Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica - Ley del Medio Ambiente 1333

aguas es aquel que comprende una serie de procesos cuya finalidad es transformar la materia prima inicial (agua contaminada), en producto final (agua apta para consumo). La finalidad de estas operaciones es obtener agua con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final.

Ya que se piensa que la turbiedad y el color son sinónimo de contaminación, la clarificación de aguas es uno de los tratamientos esenciales en aguas naturales.

Figura N°3: Proceso de clarificación del agua



Fuente: Elaboración propia

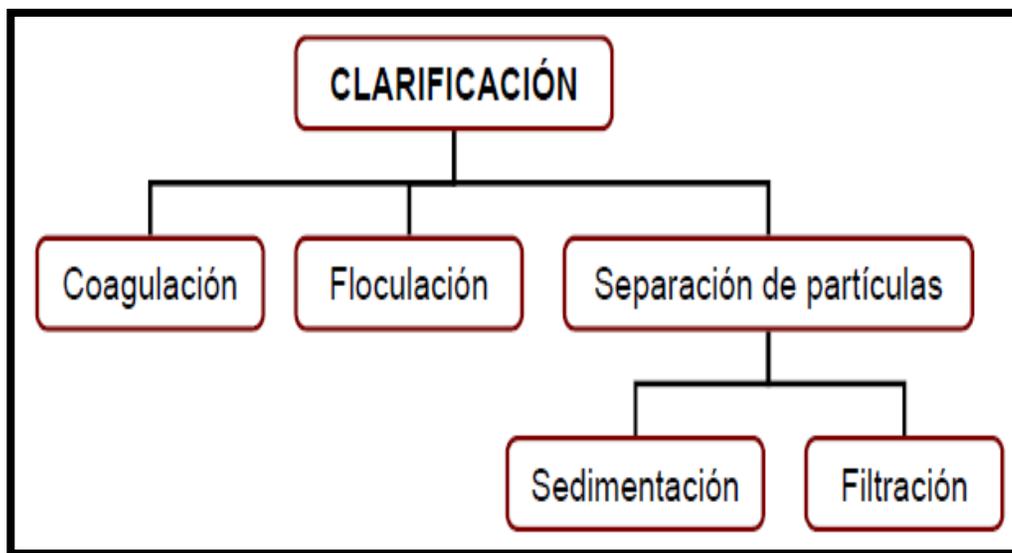
2.7.2 Clarificación del agua

El proceso de clarificación de aguas es una técnica que tiene como objetivo la eliminación de sustancias en suspensión, sustancias disueltas y la supresión de la flora microbiana, además de la posible corrección de algunas características fisicoquímicas.

Esta técnica es ampliamente difundida en la remoción de turbiedad y color del agua e implica la utilización de coagulantes. Estos provocan que las finas

partículas que determinan la turbiedad se agrupan, formando flocúlos cuya precipitación y remoción son mucho más simples. El proceso de clarificación incluye las siguientes etapas: coagulación, floculación, decantación y filtración.³⁶

Figura N°4: Proceso de clarificación del agua



Fuente: Elaboración propia

2.8 COAGULACION – FLOCULACION

La turbiedad y el color del agua son principalmente causados por partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. Por otro lado aunque su concentración es muy estable, no presentan la tendencia de aproximarse unas a otras. Para eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación.

La coagulación - floculación es el método más importante en el proceso de potabilización³⁷. Este proceso se usa para:

³⁶ Abastecimiento de aguas – Francisco Javier Pérez de la Cruz

³⁷ Metcalf, 1979

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

2.8.1 Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión de una fuente de agua superficial provienen de la erosión de suelos, de la disolución de sustancias minerales y de la descomposición de sustancias orgánicas.

A este aporte natural se debe adicionar las descargas de desagües domésticos, industriales y agrícolas. En general la turbiedad del agua es causada por las partículas de materias inorgánicas (arcillas), en tanto que el color está formado por las partículas de materias orgánicas e hidróxidos de metal (hierro por ejemplo).

2.8.2 Suspensiones coloidales

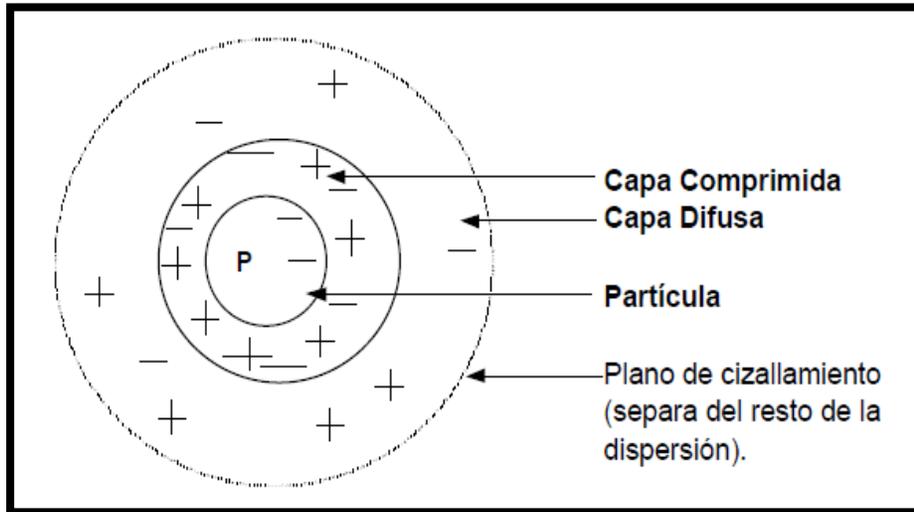
Se denominan suspensiones coloidales (o coloides) a los sistemas físico-químicos estables formados por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa (en menor proporción) en forma de partículas, por lo general sólidas.

2.8.3 Teoría de la estabilidad de los coloides

Los coloides son suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural, es por esto que son las causantes de la turbiedad y del color del agua.

Y es por esto que el tratamiento de clarificación de aguas está orientado a la remoción de estas partículas.

Figura N° 5: Teoría de estabilidad de coloides



Fuente: Elaboración propia

La teoría de la estabilidad de los coloides se conoce como la teoría de la doble capa eléctrica e indica que las partículas coloidales poseen normalmente una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos. Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta. La existencia del potencial Zeta y esta doble capa es lo que impide la aproximación de las partículas a una distancia suficiente como para que las fuerzas atractivas de Van der Waals entren en acción y agrupen los coloides. El conseguir la formación de agregados de partículas o flóculos dependerá de la capacidad de ruptura de la estabilidad de los coloides. Las partículas coloidales están en constante movimiento y se producen colisiones de las que se desprende energía. Cuantas más colisiones se produzcan, mayor será

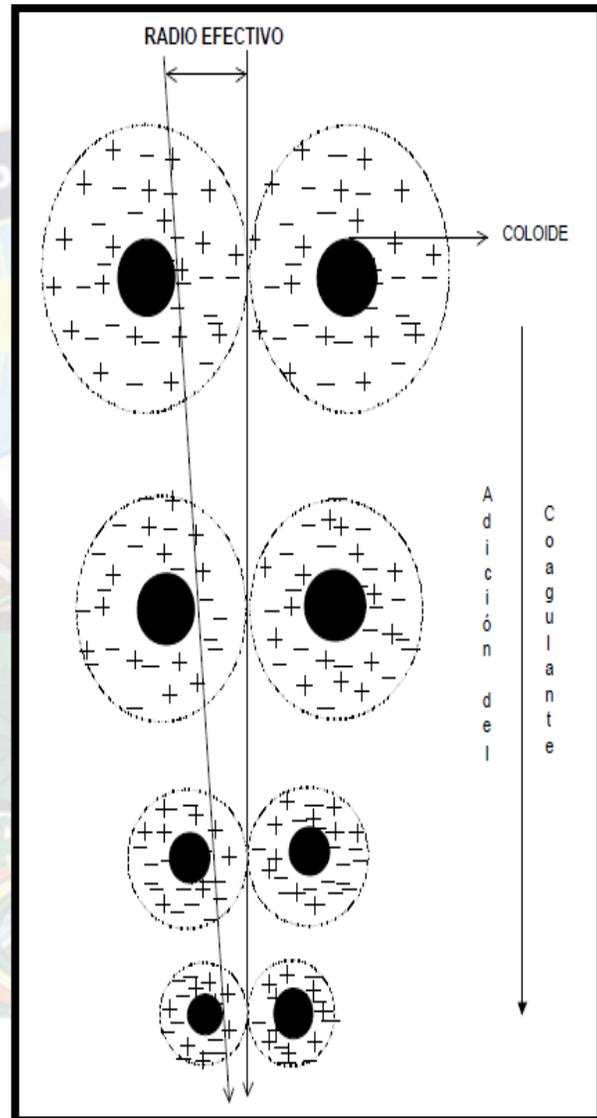
la posibilidad de agregación; a pesar de ello, no se generará un número suficiente de uniones fruto de la colisión, si no existe una previa desestabilización del equilibrio coloidal.

2.9 COAGULACION

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

En la figura se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos.

En la coagulación, se agrega al agua una sustancia denominada coagulante para cambiar el comportamiento de las partículas en suspensión. Esta hace que las partículas, que anteriormente tendían a repelerse unas de otras, sean atraídas las unas a las otras o hacia el material agregado.



2.9.1 Factores que influyen en la coagulación

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación.

- **Influencia del pH**

El pH es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza.

- **Influencia de las Sales Disueltas**

Las sales contenidas dentro del agua ejercen las influencias siguientes sobre la coagulación y floculación:

- ✓ Modificación del rango de pH óptimo.
- ✓ Modificación del tiempo requerido para la floculación.
- ✓ Modificación de la cantidad de coagulante requerido.

- **Influencia de la Temperatura del Agua**

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua), esto afecta a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación.

Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un flóc.

- **Influencia de la Dosis del Coagulante**

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así:

- ✓ Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflóculos es muy escasa, por lo tanto la turbiedad residual es elevada.
- ✓ Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada.

La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de prueba de jarra que se describe más adelante.

- **Influencia de Mezcla o Agitación**

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecha y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar, y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los microflóculos.

- **Influencia del período transcurrido entre la toma de muestras y el ensayo**

Puesto que, tanto la actividad biológica desarrollada en el agua, como otras reacciones físico-químicas, podrían afectar la coagulación-floculación y

posterior sedimentación del agua, así como la oxidación de las sustancias presentes en ella³⁸, es conveniente realizar lo más antes posible el tratamiento.

2.9.2 Coagulantes para el tratamiento de aguas

La coagulación se produce añadiendo a la dispersión iones de signo contrario al del coloide (coagulantes). A continuación se presenta una clasificación de los coagulantes³⁹:

- **Coagulantes Inorgánicos.-** Son compuestos hechos a base de sales de hierro y aluminio. Los más ampliamente usados son el Sulfato de aluminio, Cloruro de hierro (II) y Sulfato de hierro (II).
- **Coagulantes Artificiales.-** Estos consisten en macromoléculas de cadenas largas obtenidas de la asociación de monómeros sintéticos. Los floculantes se clasifican en aniónicos, neutros y catiónicos.
- **Coagulantes Naturales.-** Entre los coagulantes naturales están los de origen orgánico que se encuentran en ciertas plantas. Por lo general presentan una mínima o nula toxicidad, en muchos casos son productos alimenticios, con alto contenido de carbohidratos y proteínas. Son de diversos tipos, incluyen semillas en polvo, el polvo de pepas de durazno, las habas, penca de tuna y una de las más antiguas es la fariña obtenida de la planta conocida como mandioca o yuca. Tienen alta efectividad para aguas con una baja turbidez, también presentan buena eficiencia en aguas industriales.

³⁸ Marín Galvín R. “Jar Test” en el tratamiento de aguas: Una valiosa herramienta. Tecnología del Agua,

³⁹ <http://www.monografias.com/trabajos85/coagulantes-naturales-origen-vegetal/>

2.9.2.1 Coagulantes Inorgánicos

- Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio es un coagulante inorgánico que se emplea en procesos de clarificación de aguas, ya sea en procesos de potabilización como de depuración de aguas residuales, tanto de naturaleza urbana como de carácter industrial.

Fotografía N°7: Sulfato de aluminio



Fuente: Silicatos y Derivados S. A. de C. V. (SIDESA)

La aplicación del producto es inmediata, empleándose mediante equipos dosificadores desde los tanques de almacenamiento, entrando en contacto el producto con el agua a tratar, donde mediante procesos de mezcla y reacciones consiguen precipitar el hidróxido metálico, después de sendos procesos de desestabilización coloidal y de neutralización de cargas eléctricas.

Funciona mejor en un intervalo de pH entre 6 y 8. Produce flóculos pequeños de fácil remoción. No es muy efectivo para aguas con alta carga contaminante, es el más utilizado para el tratamiento de agua potable, además no necesita aditivos.

Se consigue con todo ello eliminar el color, la turbidez, las bacterias, los virus y microorganismos en general. Los flóculos producidos se eliminan en los sucesivos procesos de decantación y filtración, resultando un agua clarificada

- **Adición de coagulantes**

Los coagulantes metálicos siempre deben agregarse en solución verdadera. Al aplicarlos en suspensión o peor en polvo, sin que las partículas hayan tenido tiempo de disolverse disminuye notablemente la efectividad del proceso.

La solución de coagulantes puede prepararse de dos formas⁴⁰:

- ✓ Dosificando en polvo en forma continua en un tanque de hidratación, desde donde la solución se lleva al punto de aplicación, lo que impropiamente se llama dosificación en seco.
- ✓ Preparando la solución previamente y dosificándola por gravedad o por bombeo en el punto de aplicación, denominándose dosificación en húmedo.

2.9.2.2 Coagulantes naturales

La coagulación es el proceso más importante en el tratamiento convencional del agua. Su aplicación incluye la remoción de especies en suspensión, mediante la adición de coagulantes químicos, cuyo uso trae desventajas asociadas a altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo y el hecho de que afectan el pH del agua tratada. Por lo expuesto anteriormente, se hace necesaria la búsqueda de alternativas que incluyan la utilización de coagulantes naturales de origen vegetal, entre otras.

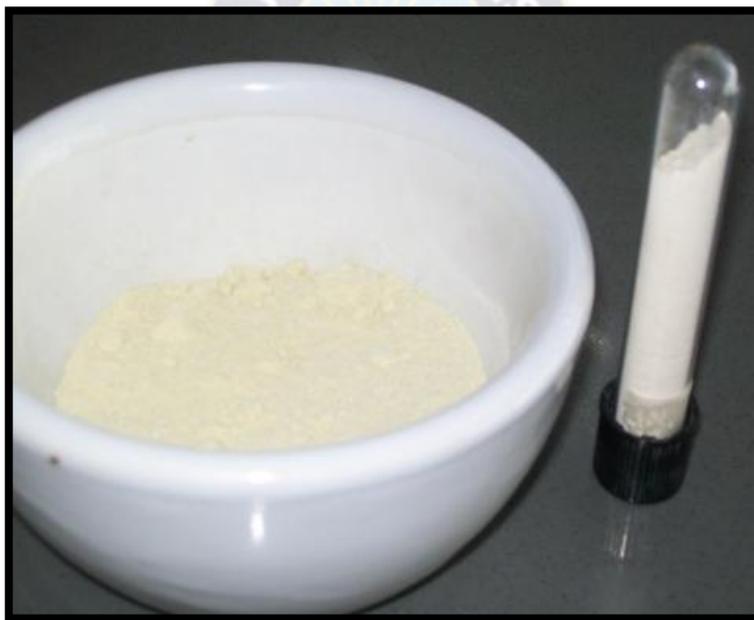
Se conocen estudios realizados en Cuba y México que demuestran la factibilidad de la Moringa Oleífera como coagulante, se demostró que el tratamiento realizado resulto exitoso y muy económico.

- **Coagulante de penca de tuna**

⁴⁰Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua - CEPIS

El coagulante de origen orgánico puede ser usado como sustituyente del sulfato de aluminio en el proceso de clarificación del agua. Ya se ha desarrollado un estudio en Universidad de Zulia donde se realizó un estudio para evaluar la eficiencia del coagulante natural. Los ensayos se realizaron a escala de laboratorio, preparando aguas turbias sintéticas con valores de turbidez iniciales de 20 a 150 UNT. Los estudios realizados demuestran que la planta remueve la turbidez entre un 80 y 90 %.

Fotografía N°8: Coagulante de penca de tuna (Opuntia Ficus Indica)



Fuente: Evaluación del poder coagulante de tuna (opuntia ficus indica)

2.10 FLOCULACION

El proceso de floculación que sigue a la coagulación, consiste en una agitación suave y lenta, con el objetivo de aglomerar las partículas desestabilizadas en microflóculos en flóculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes construidos para este fin, denominados decantadores.

En el proceso de floculación es importante conseguir la formación del flóculo de mayor peso y cohesión posible, ya que estas características facilitan su eliminación.

En general, algunos de los siguientes medios favorecen el engrosamiento y, consecuentemente, la sedimentabilidad del flóculo:

- ✓ Una coagulación previa tan perfecta como sea posible
- ✓ Una agitación lenta y homogénea del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con un flóculo.

2.10.1 Importancia del proceso de floculación

Es muy importante el procedimiento de floculación, ya que la producción de un flóc muy pequeño o muy ligero produce una decantación insuficiente; mientras que el agua que llega a los filtros contienen una gran cantidad de partículas de flóc que rápidamente ensucian los filtros y necesitan lavados frecuentes. Por otro lado cuando el flóc es frágil, este se rompe en pequeñas partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la calidad del agua producida.

2.11 PRUEBA DE JARRAS

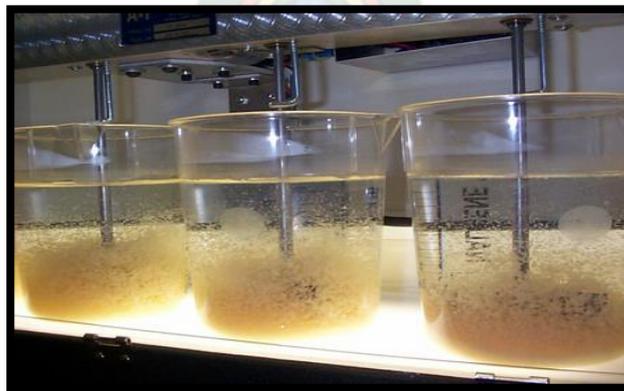
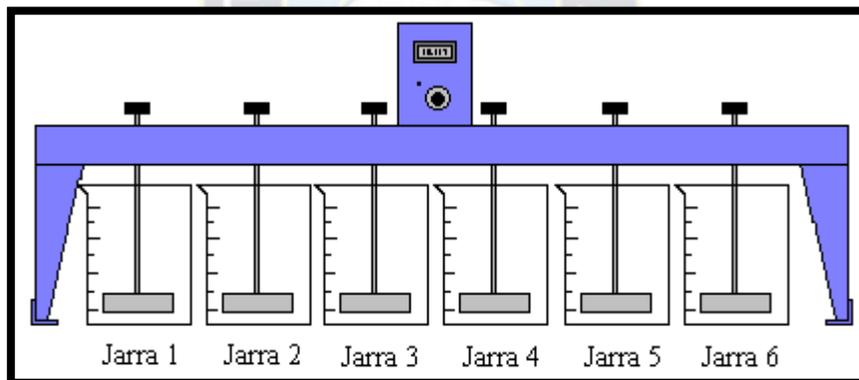
2.11.1 Definición

La prueba de jarras es la principal prueba de laboratorio para la determinación de la dosis apropiada de un coagulante que se debe suministrar al agua a tratar para optimizar el proceso de clarificación. Este análisis básicamente es la simulación de los procesos de coagulación, floculación a nivel de laboratorio y sedimentación con diferentes dosis de coagulante; la determinación para saber cuál es la dosis óptima se hace por comparación visual y se escoge la muestra en la cual se puedan ver los flócs de mayor tamaño.

Existe en el mercado una gran variedad de equipos para pruebas de jarras, pero en toda su versatilidad debe radicar en utilizar una serie de jarras al mismo tiempo y la posibilidad de variación de la velocidad de agitación (rpm) En este proceso influyen factores químicos e hidráulicos. Entre éstos tenemos:

- pH
- Temperatura
- Concentración de coagulante
- Tiempo de sedimentación
- Secuencia de aplicación de las sustancias químicas
- Grado de agitación

Fotografía N°9: Prueba de jarras



Fuente: La Prueba de Jarras en una Planta de Tratamiento de Agua Potable

2.11.2 Recomendaciones para llevar a cabo una prueba de jarras

- Las soluciones químicas de coagulantes deben ser recién preparadas. Mientras algunas soluciones químicas se benefician con el tiempo, la mayoría se deterioran. Los resultados obtenidos con muestras añejas no son representativos, por lo que no se recomienda correr pruebas de jarras con más de dos horas de captadas las muestras.
- Las muestras para las pruebas deben ser lo más representativa del sistema y en cantidad suficiente para una serie de pruebas completas, es por esto que mínimamente se deben tomar 15 litros de cada punto de muestreo.
- La adición de químicos debe realizarse en el mismo orden en que son añadidos en planta o en el caso de la clarificación a nivel domiciliario. A las jarras se añaden normalmente coagulantes, floculantes y/o ajustadores de pH.
- Se debe tener cuidado de no demorar la adición de los químicos si se necesita una adición simultánea de los mismos, ya que se estarían alternando las condiciones de la prueba.

2.11.3 Criterios para la evaluación final en la prueba de jarras

Para evaluar los resultados de una prueba de jarras no se siguen criterios convencionales o patrones universales y casi se trata de un criterio particular del analista, fabricante del equipo, operario de la planta de acuerdo a su larga experiencia, pero bajo la convicción que da la certeza de trabajar en las mismas condiciones experimentales y bajo los mismos criterios analíticos.

No obstante, en la práctica se observan ciertos lineamientos a seguir para evaluar una prueba de jarra, como son:

- Características de los flóculos

Tamaño, uniformidad, velocidad de aparición, si son voluminosos, de poco peso, si son densos, livianos y difusos, apenas puntos o microflóculos.

- **Calidad del sobrenadante**

La claridad o transparencia, es el criterio más importante en la evaluación de una prueba de jarras, ya que es lo que se persigue en la clarificación del agua. Para ello se mide la turbiedad final del agua. Además se debe observar si el sobrenadante es totalmente transparente, semiturbio, turbio, con apreciable cantidad de material suspendido (TSS), decantado, semidecantado, entre otros.

- **Método de Willcomb**

Este método sirve de herramienta para evaluar la calidad de la coagulación – floculación. En la siguiente tabla se presentan valores numéricos para calificar la calidad de la remoción, los valores estipulados por Willcomb se ven en la siguiente tabla:

Tabla N° 10: Valores del índice de Willcomb

Características	Valor asignado	Calidad
Flóc coloidal, ningún tipo de aglutinamiento	0	Muy mala
Flóc visible, muy pequeño casi imperceptible	2	Mala
Flóc disperso, bien formado pero no sedimenta	4	Regular
Flóc claro, tamaño relativamente grande, sedimenta muy lento	6	Aceptable
Flóc bueno, sedimenta fácil pero no completamente	8	Buena
Flóc excelente, se deposita todo dejando el agua clara	10	Óptima

Fuente: Análisis Bibliográfico⁴¹

Mientras más alto sea el valor del índice de Willcomb, más alta será la calidad de remoción de turbiedad y color.

⁴¹ Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades
Ing. Lidia de Vargas

4. MARCO EXPERIMENTAL

3.10 LOCALIZACION Y RECOLECCION DE LA MATERIA PRIMA

Las **pencas de tuna** (*Opuntia Ficus Indica*) se recolectaron de la Localidad de Achocalla en el mes de mayo, debido a que en esta época ya se había realizado la cosecha de las tunas. Se recolectaron las pencas situadas en la base de las plantas, ya que estas son las más propensas a sufrir daños por el peso de las pencas superiores, además las pencas base son generalmente las más antiguas, por lo tanto son las que escasamente producen frutos.

Para tal cometido, la manera adecuada de realizar el cortado es insertando un cuchillo sierra en el punto de unión de la penca con la planta, se trató de que la herida sea del menor tamaño posible con el fin de disminuir el riesgo de enfermedad y facilitar la cicatrización de la planta.

Fotografía N° 10: Recolección de materia prima



Fuente: Elaboración propia

3.11 CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE LA MATERIA PRIMA

La caracterización de las materia prima se realizó en el Laboratorio de la carrera de Química Industrial. Los parámetros analizados, son aquellos que luego de una

revisión bibliográfica, se consideraron útiles para constatar que la planta utilizada en el proyecto posee características propias de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*).

3.11.1 Determinación de la humedad inicial de la penca de tuna

Para la determinación de humedad se utilizó el método gravimétrico, para el cual se utilizaron cajas petri, las cuales se secaron adecuadamente y se procedieron a enfriar en un desecador. Se pesaron 4 muestras de aproximadamente 5 g de **penca de tuna** cada una, la muestra se secó a 90 °C por espacio de 4 horas.

Fotografía N° 11: Determinación de la humedad



Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la humedad se realizó mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100\%$$

Donde

m_1 = Masa inicial de la muestra [g]

m_2 = Masa final de la muestra [g]

$$\% Humedad_A = \frac{4.7474 - 0.3425}{4.7474} * 100\% = 92.78\%$$

$$\% Humedad_B = \frac{4.8703 - 0.3901}{4.8703} * 100\% = 91.99\%$$

$$\% Humedad_C = \frac{4.9495 - 0.4008}{4.9495} * 100\% = 91.90\%$$

$$\% Humedad_D = \frac{4.8696 - 0.3618}{4.8696} * 100\% = 92.57\%$$

Con datos obtenidos se determinó que la humedad promedio de la penca de tuna recolectada es igual a **92 %**:

$$\overline{\% Humedad} = \frac{H_A + H_B + H_C + H_D}{4}$$

$$\overline{\% H} = \frac{92.78 + 91.99 + 91.90 + 92.57}{4} = 92.31\% \cong 92\%$$

3.11.2 Determinación de cenizas

Para la determinación de cenizas se utilizó el método físico gravimétrico, por ignición hasta cenizas blancas, para el cual se utilizaron crisoles de porcelana. Se procedió a calcinar tres muestras de **penca de tuna** de aproximadamente 7 g cada una, estas se calcinaron en la mufla a 550 °C hasta que se evidenciaron las cenizas blancas. El tiempo de ignición fue de 2 horas y media.

El cálculo de la cantidad de cenizas se realizó mediante la aplicación de la siguiente formula:

$$\% Cenizas = \frac{m_2}{m_1} * 100\%$$

Donde

m_1 = Masa inicial de la muestra [g]

m_2 = Masa final de la muestra [g]

$$\% \text{Cenizas}_A = \frac{0.0535}{6.1655} * 100\% = 0.8677\%$$

$$\% \text{Cenizas}_B = \frac{0.0564}{6.6706} * 100\% = 0.8455\%$$

$$\% \text{Cenizas}_C = \frac{0.0584}{6.6154} * 100\% = 0.794\%$$

Con datos obtenidos se puede evidenciar que el porcentaje de cenizas promedio de la penca de tuna recolectada es del **0.83 %**:

$$\overline{\% \text{Cenizas}} = \frac{C_A + C_B + C_C}{3}$$

$$\overline{\% C} = \frac{0.8677 + 0.8455 + 0.794}{3} = 0.83\%$$

3.11.3 pH

Para la determinación del pH se empleó el método potenciométrico, previamente se prepararon las muestras de la siguiente manera:

Primeramente se limpió y peló las **penca de tuna**, seguidamente se trozó y se llevó a licuar por 10 minutos a alta velocidad, una vez obtenido, se filtró el mucilago en tela de saquillo y se midió el pH de la manera convencional.

Para la determinación del pH se realizó un promedio de nuestras mediciones obtenidas:

Tabla N° 11: Datos para la determinación del pH

Muestra	A	B	C	D	E
pH	4.25	4.45	4.38	4.67	4.15

Fuente: Datos experimentales

$$\overline{pH} = \frac{pH_A + pH_B + pH_C + pH_D + pH_E}{5}$$

$$\overline{pH} = \frac{4.25 + 4.45 + 4.38 + 4.67 + 4.15}{5} = 4.38$$

3.11.4 Coeficiente de difusividad de la humedad a través del sólido

3.11.4.1 Velocidad de secado

Se obtuvieron los siguientes datos:

T = 90°C

Intervalo de secado m₁ = 15 min

Intervalo de secado m₂ = 4 h

m₁ (inicial) = 4.7310 g

m₁ (final) = 0.2634 g

m₂ (inicial) = 4.7474 g

m₂ (final) = 0.2821 g

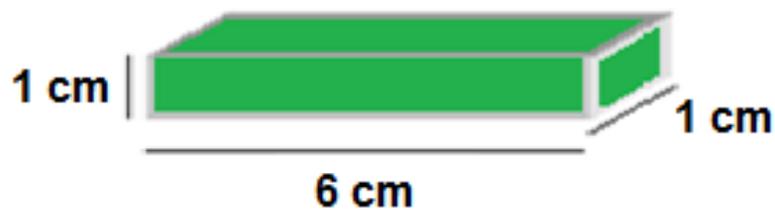
a = 1.0 cm = 0.01 m

b = 6.0 cm = 0.06 m

c = 1.0 cm = 0.01 m

A = 2(ab+ac+cb) = 2.6×10⁻³ m²

Figura N° 6: Tamaño de cortado de pencas



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 12: Datos para la determinación de la velocidad de secado

Tiempo (min)	Tiempo (h)	m ₁ (g)	m ₁ (Kg)
0	0	4.7310	0.0047
15	0.25	3.7241	0.0037
30	0.5	3.0647	0.0031
45	0.75	2.5345	0.0025
60	1.0	2.0087	0.0020
75	1.25	1.6558	0.0016
90	1.5	1.2948	0.0013
105	1.75	0.9797	0.00098
120	2.0	0.6740	0.00067
135	2.25	0.5283	0.00053
150	2.5	0.4104	0.00041
165	2.75	0.3349	0.00033
180	3.0	0.2932	0.00029
195	3.25	0.2821	0.00028

Fuente: Datos experimentales

Para realizar los cálculos se usaron las siguientes ecuaciones:

$$W = \frac{S}{A} * \left(-\frac{dx}{dt}\right) \dots \langle 1 \rangle$$

$$X = \frac{\text{Peso}(\text{inicial}) - \text{Peso}(\text{final})}{\text{Peso}(\text{final})} \dots \langle 2 \rangle$$

Dónde:

W = Velocidad de secado

A = Área expuesta del sólido [m²]

S = Sólido seco [g. o Kg.]

dx = Variación de humedad

dt = Variación de tiempo

Entonces con $\langle 2 \rangle$:

$$X_1 = \frac{0.0047 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 15.66$$

$$X_2 = \frac{0.0037 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 12.11$$

$$X_3 = \frac{0.0031 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 9.99$$

$$X_4 = \frac{0.0025 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 7.86$$

$$X_5 = \frac{0.0020 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 6.09$$

$$X_6 = \frac{0.0016 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 4.67$$

$$X_7 = \frac{0.0013 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 3.61$$

$$X_8 = \frac{0.00098 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 2.47$$

$$X_9 = \frac{0.00067 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 1.37$$

$$X_{10} = \frac{0.00053 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 0.88$$

$$X_{11} = \frac{0.00041 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 0.45$$

$$X_{12} = \frac{0.00033 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 0.17$$

$$X_{13} = \frac{0.00029 - 0.2821 * 10^{-3}}{0.2821 * 10^{-3}} = 0.028$$

Para el valor medio:

$$\overline{X}_1 = \frac{15.66 + 12.11}{2} = 13.88$$

$$\overline{X}_2 = \frac{12.11 + 9.99}{2} = 11.05$$

$$\overline{X}_3 = \frac{9.99 + 7.86}{2} = 8.925$$

$$\overline{X}_4 = \frac{7.86 + 6.09}{2} = 6.975$$

$$\overline{X}_5 = \frac{6.09 + 4.67}{2} = 5.38$$

$$\overline{X}_6 = \frac{4.67 + 3.61}{2} = 4.14$$

$$\overline{X}_7 = \frac{3.61 + 2.47}{2} = 3.04$$

$$\overline{X}_8 = \frac{2.47 + 1.37}{2} = 1.92$$

$$\overline{X}_9 = \frac{1.37 + 0.88}{2} = 1.125$$

$$\overline{X}_{10} = \frac{0.88 + 0.45}{2} = 0.665$$

$$\overline{X}_{11} = \frac{0.45 + 0.17}{2} = 0.31$$

$$\overline{X}_{12} = \frac{0.17 + 0.099}{2} = 0.099$$

Finalmente cálculo de W con ⟨1⟩:

$$W = \frac{S}{A} * \left(-\frac{dx}{dt}\right)$$

$$W_1 = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{15.66 - 12.11}{0.25 - 0}\right) = 1.54$$

$$W_2 = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{12.11 - 9.99}{0.5 - 0.25}\right) = 0.920$$

$$W_3 = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{9.99 - 7.86}{0.75 - 0.5}\right) = 0.924$$

$$W_4 = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{7.86 - 6.09}{1.0 - 0.75}\right) = 0.77$$

$$W_5 = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{6.09 - 4.67}{1.25 - 1.0}\right) = 0.62$$

$$W_6 = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{4.67 - 3.61}{1.5 - 1.25}\right) = 0.46 \quad W_7 = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{3.61 - 2.47}{1.75 - 1.5}\right) = 0.49$$

$$W_8 = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{2.47 - 1.37}{2.0 - 1.75}\right) = 0.48$$

$$W_9 = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{1.37 - 0.88}{2.25 - 2.0}\right) = 0.21$$

$$W_{10} = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{0.88 - 0.45}{2.5 - 2.25}\right) = 0.19$$

$$W_{11} = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{0.45 - 0.17}{2.75 - 2.5}\right) = 0.12$$

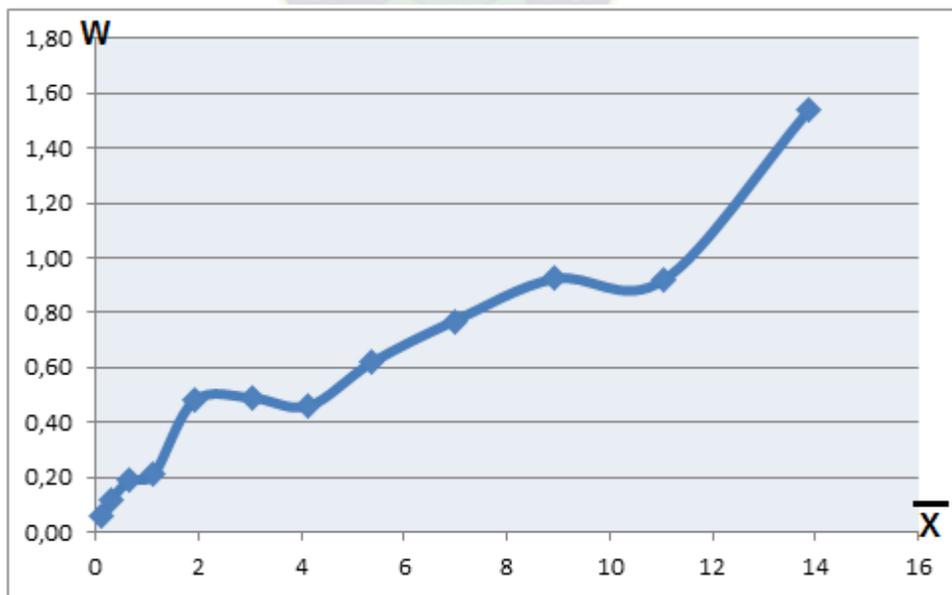
$$W_{12} = \frac{0.2821 * 10^{-3}}{2.6 * 10^{-3}} * \left(\frac{0.17 - 0.028}{3 - 2.75}\right) = 0.06$$

Tabla N° 13: Datos para la determinación de la curva de secado

\bar{X}	W [Kg/m ² h]
13.88	1.54
11.05	0.92
8.925	0.924
6.975	0.77
5.38	0.62
4.14	0.46
3.04	0.49
1.92	0.48
1.125	0.21
0.665	0.19
0.31	0.12
0.099	0.06

Fuente: Datos experimentales

Gráfico N° 1: Variación de la humedad Vs. Velocidad de secado



Para realizar los cálculos del Coeficiente de difusividad de la humedad a través del sólido se usó la siguiente ecuación:

$$t = \frac{4S^2}{\pi^2 * D_r} * \ln\left(\frac{8 * X_i}{\pi^2 * X}\right) \quad \langle 1 \rangle$$

Dónde:

t = tiempo de secado [h]

S=Espesor de la lámina [m.]

X_i= Humedad inicial

D_r = Coeficiente de difusividad de la humedad a través del sólido [m²/h]

Desarrollando la ecuación $\langle 1 \rangle$:

$$t = \frac{4S^2}{\pi^2 * D_r} * (\ln 8 + \ln X_i - \ln \pi^2 - \ln X)$$

$$\left(\frac{\pi^2 * D_r}{4S^2}\right) * t = \ln \frac{8}{\pi^2} + \ln \frac{X_i}{X}$$

$$e^{\left(\frac{\pi^2 * D_r}{4S^2}\right) * t} = e^{\ln \frac{8}{\pi^2}} + e^{\ln \frac{X_i}{X}} \dots \dots \dots e^{\ln a} = a$$

$$e^{\left(\frac{\pi^2 * D_r}{4S^2}\right) * t} = \frac{8}{\pi^2} + \frac{X_i}{X}$$

Finalmente:

$$e^{\left(\frac{\pi^2 * D_r}{4S^2}\right) * t} = \frac{8}{\pi^2} + \frac{X_i}{X}$$

$$\frac{X_i}{X} = \frac{8}{\pi^2} * e^{\left(\frac{\pi^2 * D_r}{4S^2}\right) * t}$$

Aplicando \ln :

$$\ln \frac{X_i}{X} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \left(\frac{\pi^2 * D_r}{4S^2} \right) * t$$

De esta ecuación cuya pendiente es $m = -\left(\frac{\pi^2 * D_r}{4S^2} \right) * t$ se halla la Difusividad.

Sabemos que:

$$X = \frac{\text{Peso(inicial)} - \text{Peso(final)}}{\text{Peso(inicial)}}$$

$$X_1 = \frac{4.7310 - 0.2821}{4.7310} * 100\% = 94.04$$

$$X_2 = \frac{3.7241 - 0.2821}{3.7241} * 100\% = 92.42$$

$$X_3 = \frac{3.0647 - 0.2821}{3.0647} * 100\% = 90.8$$

$$X_4 = \frac{2.5345 - 0.2821}{2.5345} * 100\% = 88.87$$

$$X_5 = \frac{2.0087 - 0.2821}{2.0087} * 100\% = 85.96$$

$$X_6 = \frac{1.6558 - 0.2821}{1.6558} * 100\% = 82.96$$

$$X_7 = \frac{1.2948 - 0.2821}{1.2948} * 100\% = 78.21$$

$$X_8 = \frac{0.9797 - 0.2821}{0.9797} * 100\% = 71.20$$

$$X_9 = \frac{0.6740 - 0.2821}{0.6740} * 100\% = 58.14$$

$$X_{10} = \frac{0.5283 - 0.2821}{0.5283} * 100\% = 46.60$$

$$X_{11} = \frac{0.4104 - 0.2821}{0.4104} * 100\% = 31.26$$

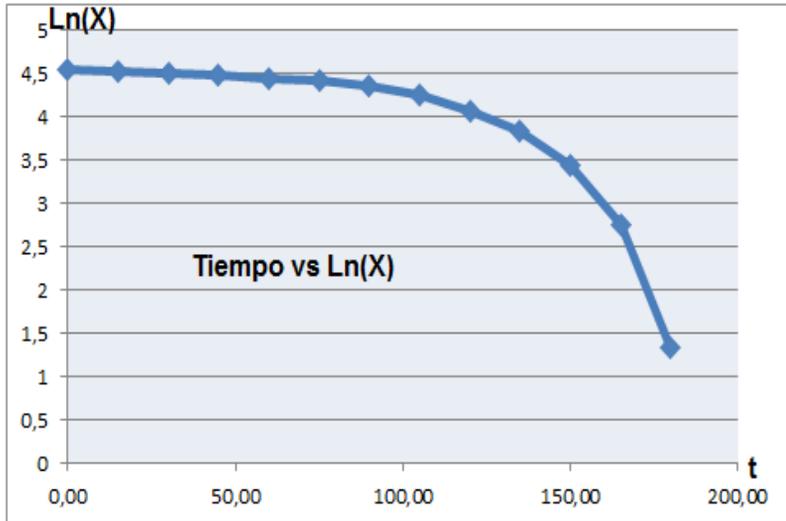
$$X_{12} = \frac{0.3349 - 0.2821}{0.3349} * 100\% = 15.76$$

$$X_{13} = \frac{0.2932 - 0.2821}{0.2932} * 100\% = 3.78$$

Ahora sacando logaritmos de X tendremos la siguiente tabla y gráfico:

t	Ln (X)
0	4,54
15	4.53
30	4.51
45	4.48
60	4.45
75	4.42
90	4.36
105	4.26
120	4.06
135	3.84
150	3.44
165	2.75
180	1.33

Gráfico N° 2: t vs Ln (X)



Fuente: Elaboración propia

Sabemos que la pendiente de esta curva es: $m = -0.0129$

$$m = -0.0129 = -\left(\frac{\pi^2 * D_r}{4S^2}\right)$$

Despejando D_r :

$$D_r = \frac{0.0129 * 4 * (0.01)^2}{\pi^2} = 5.24 * 10^{-7} \left[\frac{m^2}{hr} \right]$$

Por lo tanto nuestro coeficiente de difusión a través del sólido es de

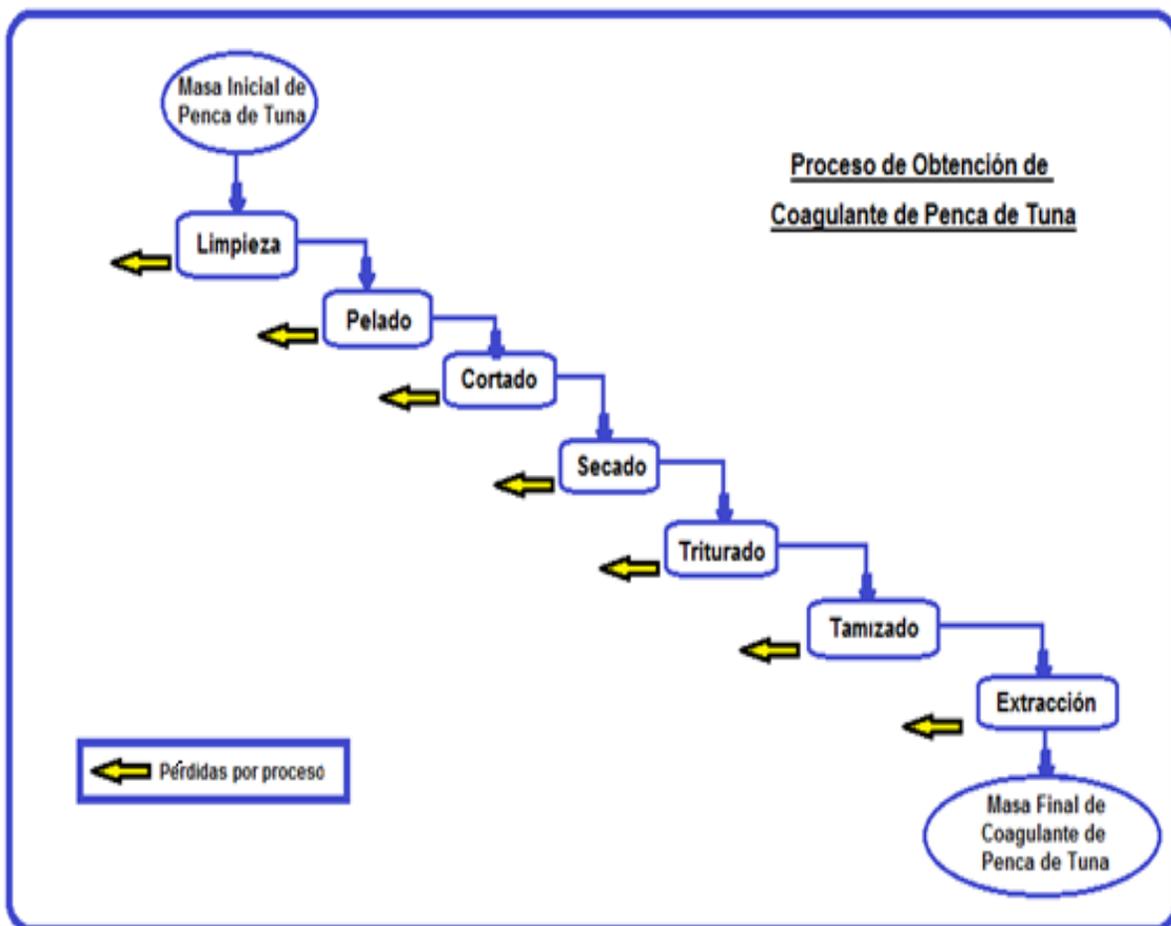
$$5.24 * 10^{-7} \left[\frac{m^2}{hr} \right].$$

3.12 OBTENCION DE COAGULANTE

3.12.1 Proceso de obtención

Ya habiéndose evidenciado mediante los análisis previos de pH, cenizas y humedad que la especie recolectada en cuestión es la adecuada para la obtención del coagulante, se procedió a dicha obtención mediante diversas operaciones físicas y químicas, detalladas a continuación en orden de ejecución. En cuanto al diagrama del proceso de obtención, se ha sintetizado en un diagrama de flujo el proceso de obtención del coagulante de penca de tuna (*Opuntia Ficus indica*) en polvo, y listo para su uso en tratamiento de aguas.

Figura N°7: Procedimiento de Obtención de Coagulante de Penca de Tuna



Fuente: Elaboración propia

- **Selección de pencas aptas**

Una vez transportada la materia prima al laboratorio se seleccionaron las **pencas de tuna** aptas para la obtención de coagulante, estas fueron aquellas pencas que no mostraron señales de enfermedad u hongos, ya que las pencas en mal estado podrían afectar la inocuidad de nuestro coagulante.

Fotografía N° 12: Pencas aptas libres de enfermedades



Fuente: Elaboración propia

Se recolectaron 10 pencas, de las cuales se desecharon 2 debido a la presencia de enfermedades, quedándonos así ocho pencas aptas para ser procesadas.

Fotografía N° 13: Pencas dañadas con hongos



Fuente: Elaboración propia

- **Limpieza de materia prima**

Las pencas aptas se limpiaron con la ayuda de la parte áspera de una esponja de cocina, esto para eliminar las espinas. Luego se procedió a lavar las **pencas de tuna** para eliminar la tierra y los residuos de espinas restantes de la superficie.

- **Pelado**

Se evidenció la presencia de una cutícula gruesa y cerosa que cubre la superficie de las **pencas de tuna**, ya que esta cutícula es insoluble y muy dura podría afectar considerablemente en proceso de secado, por esto se procedió a pelar las pencas de tuna.

Fotografía N° 14: Pelado de pencas



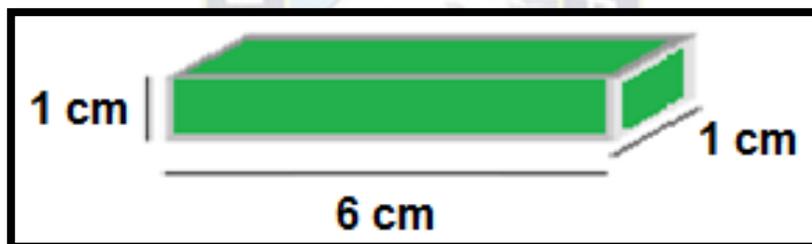
Fuente: Elaboración propia

- Cortado

Con la finalidad de ampliar la superficie de contacto para un secado óptimo se procedió a realizar el cortado de las **penca de tuna**. Para determinar la superficie adecuada de secado se realizaron pruebas con diferentes tamaños de cortes, y se procedió a secar los diferentes trozos por el mismo tiempo.

Finalmente se eligió realizar cortes rectangulares de 1 cm de ancho por 6 cm de largo y 1 cm de espesor, ya que con este corte se pudo obtener el valor más cercano de pérdida de humedad con referencia a los resultados obtenidos en la prueba de la determinación de humedad.

Figura N° 8: Tamaño de cortado de las penca de tuna



Fuente: Elaboración propia

- Secado

La pulpa de **penca de tuna** libre de cáscara y cortada en tiras de inmediato fue sometida a un proceso de secado durante 48 horas continuas a una temperatura de 60 ± 1 °C.

A consecuencia de la deshidratación, las tiras sufrieron una disminución considerable en tamaño, tornándose frágiles y quebradizas.

Fotografía N° 13: Secado de Tiras de Penca de tuna



Fuente: Elaboración propia

- **Molienda**

Para la operación de molienda se utilizó un mortero de porcelana. Se trituraron las tiras secas de **penca de tuna** con el objetivo de reducir el tamaño de partícula del material; como producto se obtuvo un polvo de color amarillo – verdoso.

Fotografía N° 16: Molido de pencas secas



Fuente: Elaboración propia

- **Tamizado**

Para uniformizar el diámetro de las partículas, se tamizó el polvo obtenido en un tamiz de 0.6 mm de diámetro. Esto con la finalidad de favorecer la extracción de pigmentos.

Fotografía N° 17: Tamizado



Fuente: Elaboración propia

- **Extracción**

Se realizó una extracción sólido - líquido con la finalidad de eliminar los pigmentos del coagulante. El polvo fino obtenido fue sometido a un proceso de extracción

solido – líquido, mediante extracción Soxhlet durante 4 horas, se empleó etanol al 96 % como solvente.

Fotografía N° 18: Extracción de pigmentos con etanol



Fuente: Elaboración propia

Durante este procedimiento se observó que el solvente al entrar en contacto con el material cambió de incoloro a amarillo, y al final de la operación, se obtuvo una solución verde oscura que contenía el etanol y los pigmentos retirados de la penca de tuna.

- **Secado y pulverizado**

Una vez que se evidenció que la extracción había llegado a su culminación, se retiró el cartucho y se llevó a la estufa a 60 °C por dos horas, para eliminar el excedente de solvente acumulado en el cartucho. Finalmente se realizó una molienda final en un mortero de porcelana para uniformizar las partículas.

Fotografía N° 19: Coagulante final libre de pigmentos



Fuente: Elaboración propia

Como resultado se obtuvo un polvo fino de 0.6 mm de diámetro, que presentaba un color marfil - blanquecino.

3.13 RENDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE COAGULANTE DE PENCA DE TUNA

3.13.1 Recolección y selección de pencas aptas

Se midieron y pesaron cada una de las pencas recogidas. El detalle de se presenta en la tabla a continuación:

Tabla N° 14: Medidas y pesos de pencas recolectadas

N°	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Masa (g)
1	29.5	16.0	1.0	580.0
2	32.7	15.5	1.1	480.5
3	32.8	17.5	1.3	440.5
4	31.0	17.0	0.9	500.0
5	30.0	19.0	1.0	446.7
6	32.0	17.8	0.9	580.5
7	30.5	18.8	1.2	560.2
8	32.6	16.7	0.9	460.5
9	29.8	19.1	1.5	534.2
10	30.0	16.5	1.5	445.9
Promedio	31.09 cm	17.39 cm	1.13 cm	502.9 g
Masa Total				5029.0 g

Fuente: Elaboración propia

Se recogieron 10 pencas con un peso total de 5029.0 g, de las cuales fueron desechadas la pencas N° 1 y 7, debido al mal estado que presentaban, por tanto quedan 3888.8 g de materia prima.

3.13.2 Balance de materia para el proceso de obtención del coagulante

Para la obtención del coagulante y para la determinación del rendimiento de obtención se dividió la materia prima en tres lotes, el lote N° 1 de 1196.27 g y el lote N° 2 de 1296.45 g y el lote N° 3 de 1396.08 g. Los datos del proceso de obtención por lotes se detallan a continuación:

- Lote N° 1

El primer lote que se procesó tuvo un peso inicial de 1196.27 g, después del lavado y quitado de las espinas quedaron 1159.90 g, en el siguiente paso se quitó la cascara o cutícula, quedando 955.76 g de penca antes del periodo de cortado.

Se cortaron las pencas en tiras rectangulares de 1 cm de ancho por 6 cm de largo y 1 cm de espesor, quedando 931.87 g que se llevaron a secar.

Se secaron las tiras por 48 horas a 60° C, tras el secado quedaron 65.23 g.

Las tiras secas se trituraron y luego de este procedimiento quedaron 64.35 g, prosiguiendo con el tamizado quedaron 58.89 g, estos fueron sometidos a extracción con alcohol etílico al 96% para eliminar los pigmentos verdosos.

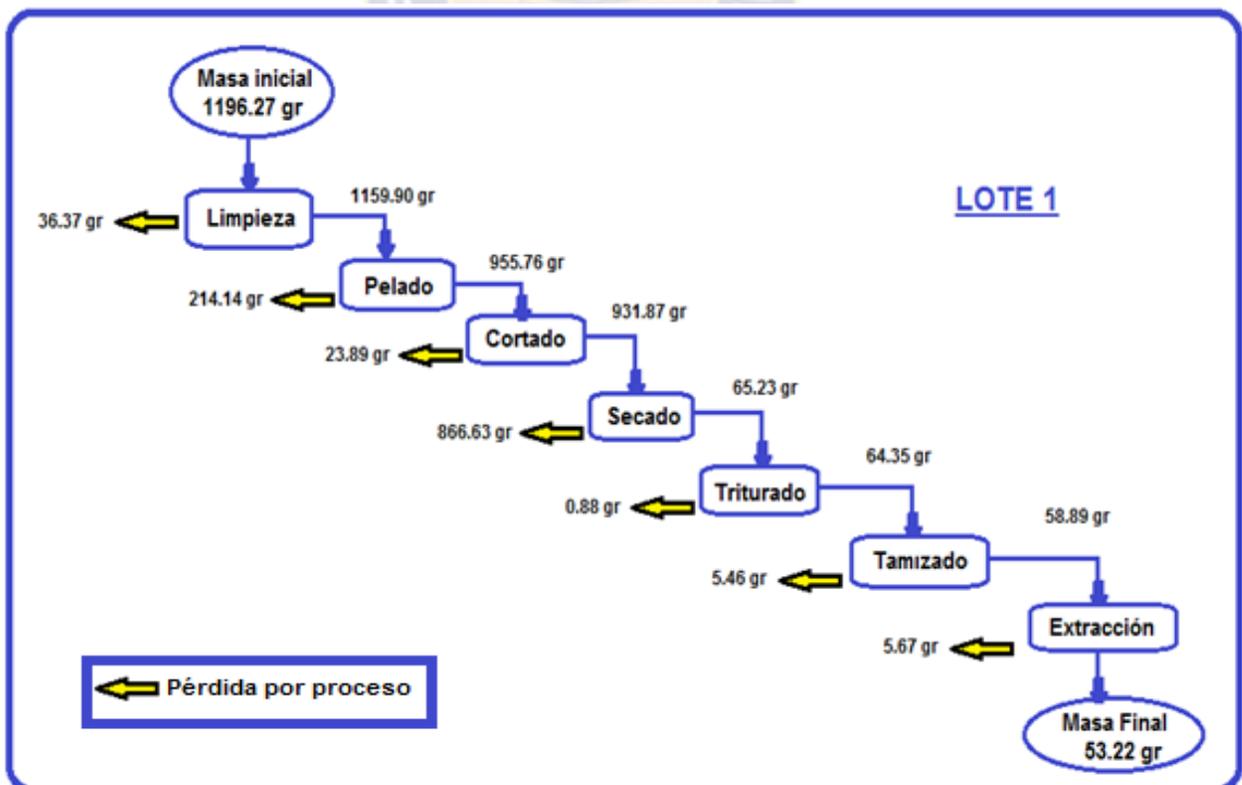
Luego de seis extracciones Soxhlet continuas por un tiempo aproximado de 4 horas, se secó en la estufa por 2 horas para la eliminación del alcohol. Finalmente se obtuvieron 53.22 g de coagulante de penca de tuna puro.

El detalle del proceso se presenta en la siguiente tabla:

Tabla N° 15: Balance de masa por operación en el Lote N° 1

Operación	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida (g)	Pérdida por operación (%)	Pérdida total (%)
Limpieza	1196.27	1159.90	36.37	3.04	3.04
Pelado	1159.90	955.76	204.14	17.6	17.06
Cortado	955.76	931.87	23.89	2.5	2.00
Secado	931.87	65.23	866.63	93	72.45
Triturado	65.23	64.35	0.88	1.35	0.07
Tamizado	64.35	58.89	5.46	8.49	0.46
Extracción	58.89	53.22	5.67	9.63	0.47
Total			1143.04gr		95.55 %

Figura N° 9: Balance de masa del lote N° 1



Fuente: Elaboración propia

- **Lote N° 2**

El segundo lote procesado tuvo un peso inicial de 1296.45 g, después del lavado y el quitado de las espinas quedaron 1222.16 g, en el siguiente paso se quitó la cascara o cutícula, quedando 1013.26 g de penca antes del periodo de cortado.

Se cortaron las pencas en tiras rectangulares de 1 cm de ancho por 6 cm de largo y 1 cm de espesor, quedando así 981.85 g que se llevaron a secar.

Se secaron las tiras por 48 horas y 60° C, tras el secado quedaron 73.64 g. Las tiras secas se trituraron y luego de este procedimiento quedaron 72.53 g, procediendo al tamizado quedaron 67.08 g que fueron sometidos a extracción para eliminación de pigmentos.

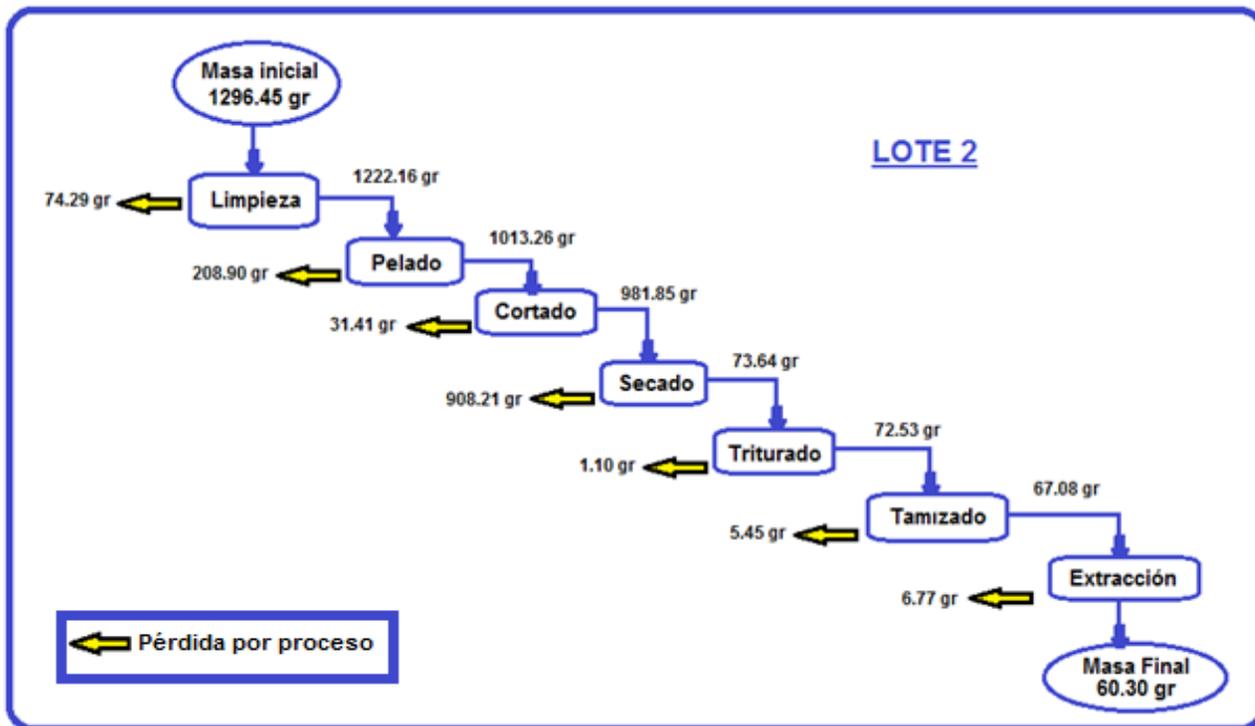
Como resultado del proceso quedaron 60.30 g de coagulante de penca de tuna.

Tabla N° 16: Balances de masa por operación en el lote N° 2

Operación	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida (g)	Pérdida operación (%)	Pérdida total (%)
Limpieza	1296.45	1222.16	74.29	5.73	5.73
Pelado	1222.16	1013.26	208.90	17.1	16.11
Cortado	1013.26	981.85	31.41	3.1	2.43
Secado	981.85	73.64	908.21	92.5	70.05
Triturado	73.64	72.53	1.10	1.5	0.08
Tamizado	72.53	67.08	5,45	7.5	0.42
Extracción	67.08	60.30	6.77	10.1	0.53
Total			1236.13gr		95.35 %

Fuente: Datos experimentales

Figura N° 10: Balance de masa del lote N° 2



Fuente: Elaboración propia

- Lote N° 3

El tercer lote tuvo un peso inicial de 1396.08 g, después del lavado y el quitado de las espinas quedaron 1331.08 g, en el siguiente paso se quitó la cáscara o cutícula, quedando 1094.81 g de penca antes del periodo de cortado.

Se cortaron las pencas en tiras rectangulares de 1 cm de ancho por 6 cm de largo y 1 cm de espesor, quedando así 1071.02 g que se llevaron a secar. Se secaron las tiras por 48 horas y 60° C, tras el secado quedaron 69.62 g.

Las tiras secas se trituraron y luego de este procedimiento quedaron 68.88 g, procediendo al tamizado quedaron 64.82 g que fueron sometidos a extracción. Finalmente se obtuvieron 58.46 g de coagulante de penca de tuna, que ya pueden ser utilizados para el tratamiento de aguas.

Figura N° 11: Balance de masa del lote N° 2

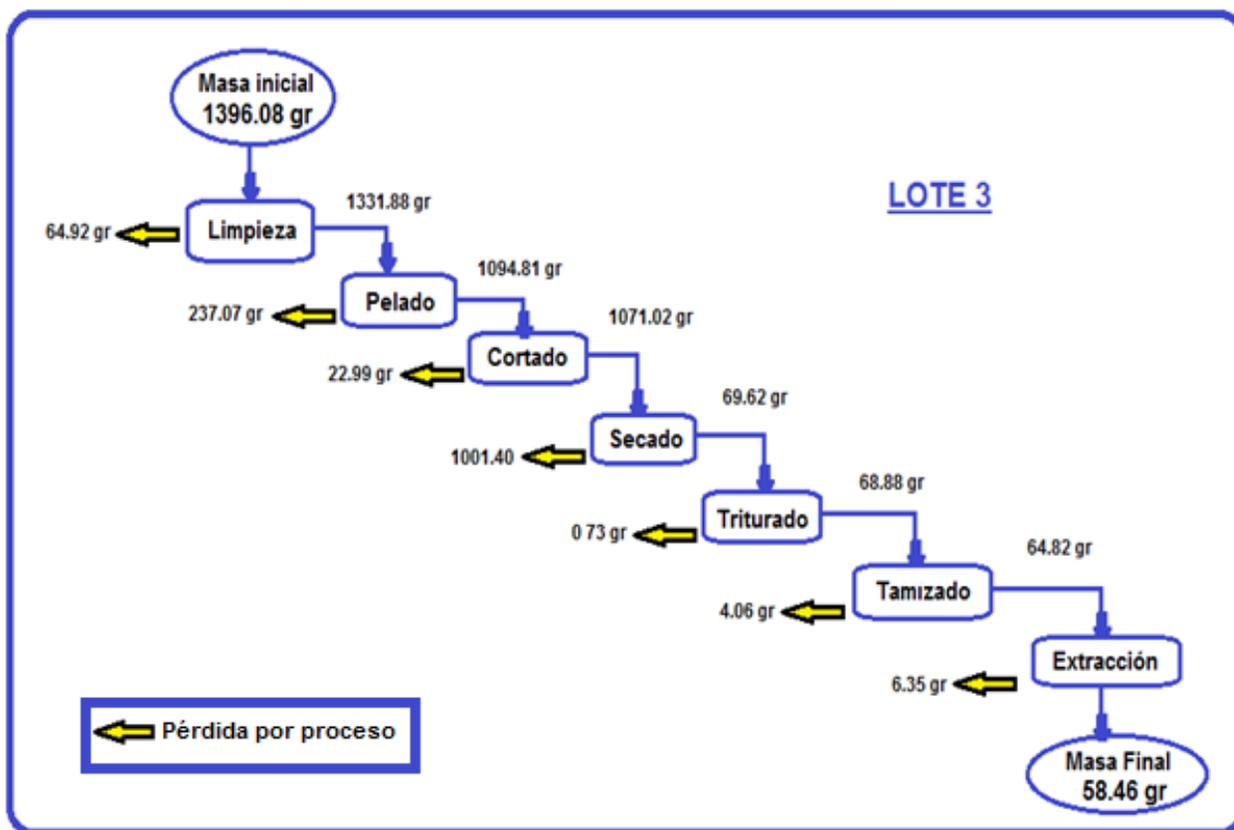


Tabla N° 17: Balances de masa por operación en el lote N° 3

Operación	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida (g)	Pérdida operación (%)	Pérdida total (%)
Limpieza	1396.08	1331.88	64.92	4.65	4.65
Pelado	1331.88	1094.81	237.07	17.8	16.93
Cortado	1094.81	1071.02	22.99	2.1	1.70
Secado	1071.02	69.62	1001.40	93.5	71.73
Triturado	69.62	68.88	0.73	1.05	0.06
Tamizado	68.88	64.82	4.06	5.9	0.29
Extracción	64.82	58.46	6.35	9.8	0.45
Total			1337.52gr		95.81 %

Fuente: Elaboración propia

3.13.3 Cálculo de rendimiento para el proceso de obtención del coagulante

Una vez que se realizaron los balances de los tres lotes se calculó el rendimiento de obtención de coagulante de penca de tuna. Este se calculará de la siguiente manera:

$$R = \frac{\text{masa obtenida coagulante}}{\text{masa inicial penca}} * 100\%$$

Tabla N° 18: Datos por lote

N° Lote	Masa inicial penca (g)	Masa coagulante (g)
1	1196.27	53.22
2	1296.45	60.30
3	1396.08	58.46

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto:

$$R_{LOTE\ 1} = \frac{53.22}{1196.27} * 100\% = 4.45\%$$

$$R_{LOTE\ 2} = \frac{60.30}{1296.45} * 100\% = 4.65\%$$

$$R_{LOTE\ 3} = \frac{58.46}{1396.08} * 100\% = 4.2\%$$

$$\bar{R} = \frac{R_{LOTE\ 1} + R_{LOTE\ 2} + R_{LOTE\ 3}}{3} = \frac{4.45\% + 4.65\% + 4.2\%}{3}$$

$$\bar{R} = 4.43\%$$

3.14 CARACTERIZACIÓN DEL COAGULANTE OBTENIDO

La caracterización del coagulante se llevó a cabo en el laboratorio de la carrera de Química Industrial. Estas pruebas se realizaron utilizando coagulante en polvo libre de pigmentos. Para realizar la caracterización de nuestro coagulante se realizaron pruebas físico-químicas con el fin de determinar las propiedades del material que tienen relación directa con su capacidad para remover turbidez del agua, dentro de éstas se evaluaron el color, olor, estado físico, pH. También se realizaron pruebas de solubilidad en tres solventes característicos; alcohol etílico, agua y acetato de etilo.

3.14.1 Pruebas Físicas

Se evaluaron las siguientes pruebas:

Tabla N° 19: Pruebas físicas

Parámetro	Valor	Método
pH	6.19	Potenciométrico
Estado físico	Sólido	Visual
Color	Blanco – marfil	Visual
Olor	Característico	Simple inspección

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de determinar el grado de acidez del coagulante (pH), se preparó una solución al 1% en peso, con agua destilada, y se halló el pH de la solución utilizando un pH metro digital. El resultado presentó que el pH de nuestro coagulante es de 6.19, esto muestra que es débilmente ácido. Se pudo evidenciar a simple vista el estado físico y el color del coagulante, así mismo el polvo obtenido presenta un olor característico no tóxico.

3.14.2 Pruebas de solubilidad

Se utilizaron para esta prueba tres solventes característicos:

Tabla N° 20: Pruebas de solubilidad

Disolvente	Solubilidad
Agua	Soluble
Etanol	Poco soluble
Agua y etanol	Poco soluble
Acetato de etilo	Insoluble

Fuente: Elaboración propia

3.15 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA

La toma de muestras se realizó siguiendo las sugerencias de la Norma Boliviana (NB 496), que presenta IBNORCA. Se realizó la toma de muestra en la localidad de Achocalla en dos puntos específicos:

- ✓ Vertiente ubicada en la avenida principal, cerca de la gasolinera (P-1).
- ✓ Acequia que pasa por la puerta de viviendas y escuela, ubicada a una cuadra de la plaza principal de Achocalla. (P-2)

Fotografía N° 20: Lugares de toma de muestra de agua (Punto 1)



Fuente: Elaboración propia

El punto (P-1) fue elegido debido a la notable turbidez del agua y al caudal de agua aceptable en este punto.

El punto (P-2) fue elegido debido a que se presentaba una notable turbidez del agua y a que esta acequia pasaba por las viviendas y la escuela, se pudo evidenciar que esta agua era utilizada para consumo domiciliario y para riego de cultivos.

Fotografía N° 21: Lugares de toma de muestra de agua (Punto 2)



Fuente: Elaboración propia

Se tomaron muestras de 20 litros de cada punto de muestreo, en bidones de plástico previamente debidamente higienizados, se empleó una jarra para ayudar a la recolección de muestras.

Los envases de las muestras se etiquetaron adecuadamente, detallándose la fecha de muestreo, lugar, condiciones del punto de muestreo. Inmediatamente las muestras se llevaron al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria para preservar estas en condiciones adecuadas y proseguir con las pruebas posteriores.

3.16 APLICACIÓN DE COAGULANTE

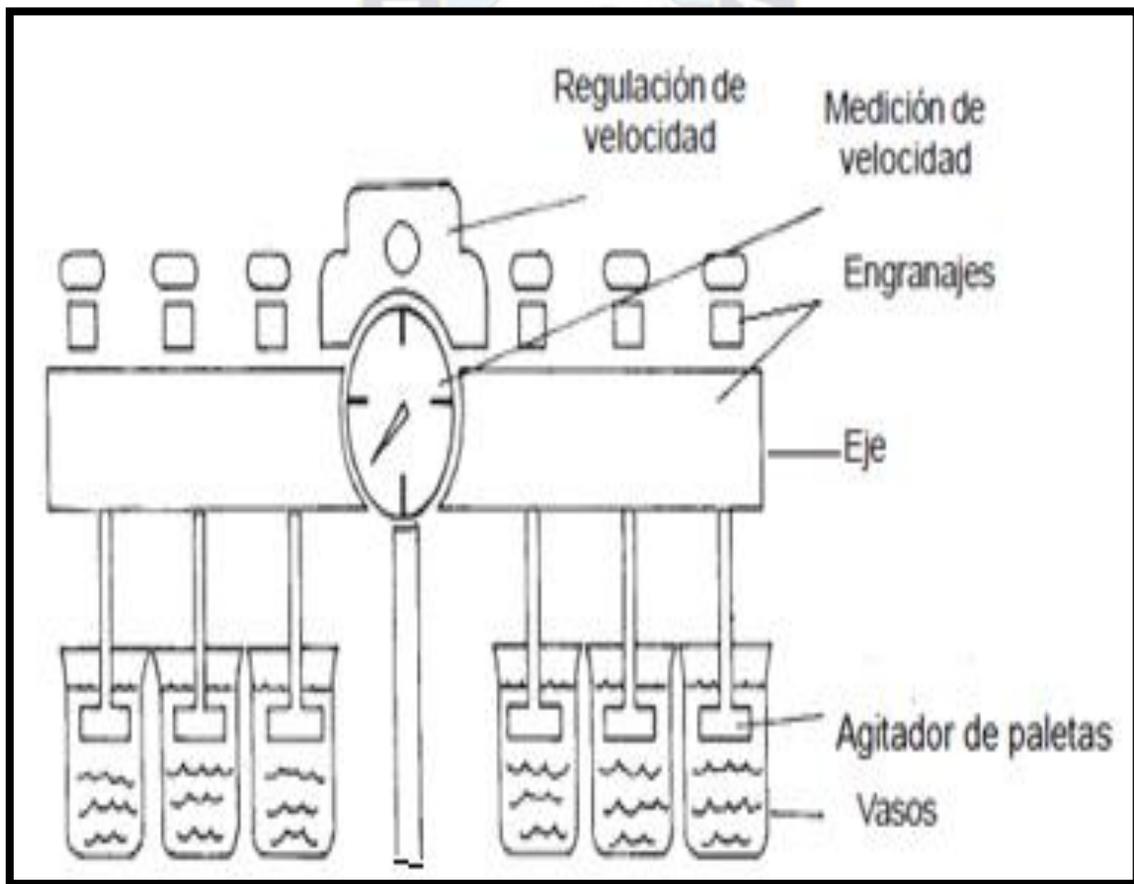
Con el objetivo de conocer las condiciones óptimas de tratamiento necesarias para las muestras de agua tomadas, se realizó la conocida prueba de jarras.

Estas pruebas se realizaron en los laboratorios del Instituto de Ingeniería Sanitaria de la UMSA, debido a que este laboratorio cuenta con el equipo necesario para realizar la mencionada prueba.

3.16.1 Descripción del equipo de prueba de jarras

El equipo de prueba de jarras del laboratorio no difiere mucho de los aparatos citados en la bibliografía, este equipo corresponde al modelo Phipps & Bird, que es uno de los equipos comúnmente utilizados.

Figura N° 12: Gráfico del equipo de prueba de jarras



Fotografía N°20: Equipo de prueba de jarras usado



Fuente: *Elaboración propia*

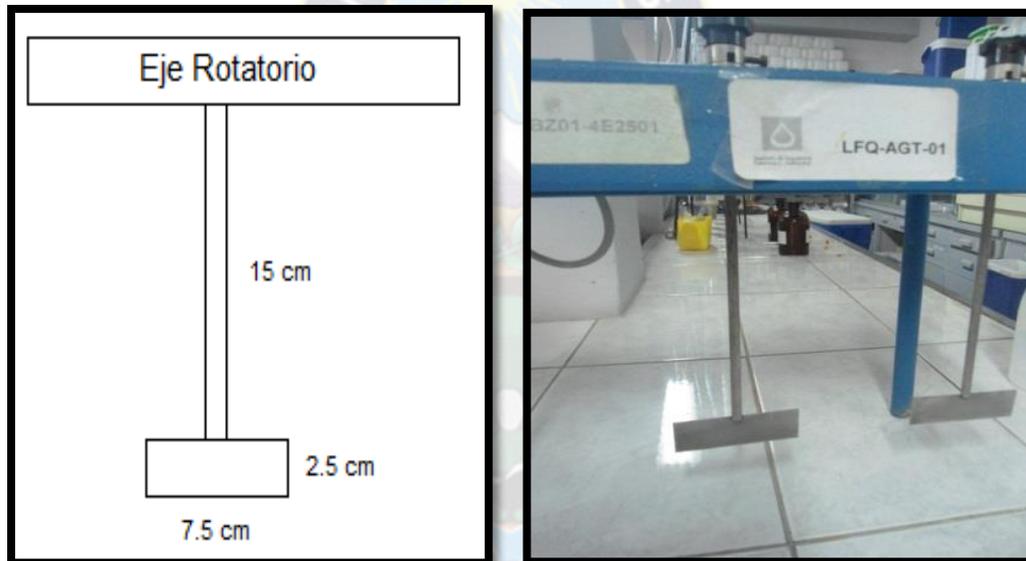
- **Descripción de las partes del equipo**

El equipo consta de las partes descritas a continuación:

- ✓ Un agitador mecánico provisto de seis paletas, capaz de operar a velocidades variables de 0 a 100 revoluciones por minuto.

- ✓ Un medidor de velocidad de marca Steward Warner N° 820620, con medición en revoluciones por minuto.
- ✓ Seis paletas planas montadas en un eje rotatorio accionado por un motor. La dimensión de las paletas es de 2.5 cm de ancho y 7.5 cm de largo, y la distancia que separa cada paleta del eje rotatorio es de 15 cm. Se encontraban separadas de la base o piso por 4 cm y estaban separadas a 3.5 cm de las paredes de los vasos de precipitación o jarras a cada lado de la paleta. Están hechas de acero inoxidable.

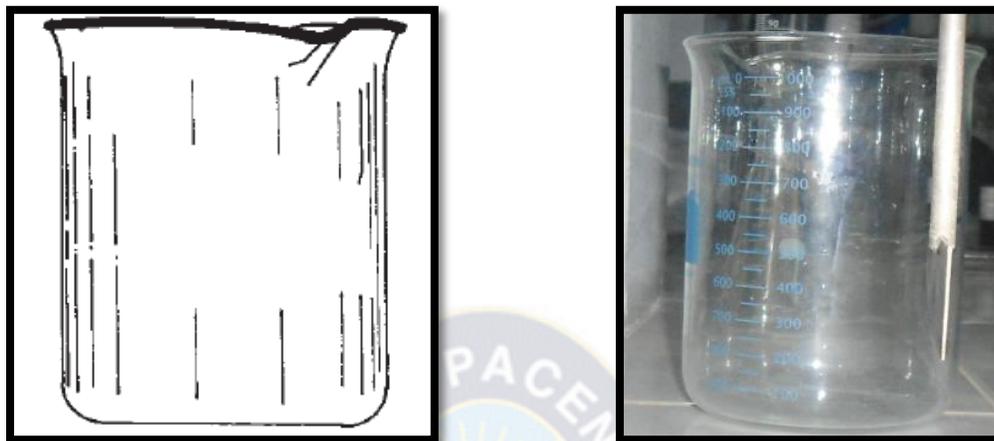
Figura N° 13: Paletas de acero inoxidable



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Las jarras utilizadas son vasos de precipitación anticorrosivos, de vidrio pyrex con forma cilíndrica y fondo plano, con una capacidad de 1 litro. Estos fueron lavados evitándose el uso de detergentes debido a que estos pueden contener compuestos aniónicos que son fuertemente absorbidos por las paredes de las jarras de vidrio y estos podrían afectar los resultados de las pruebas en forma significativa.

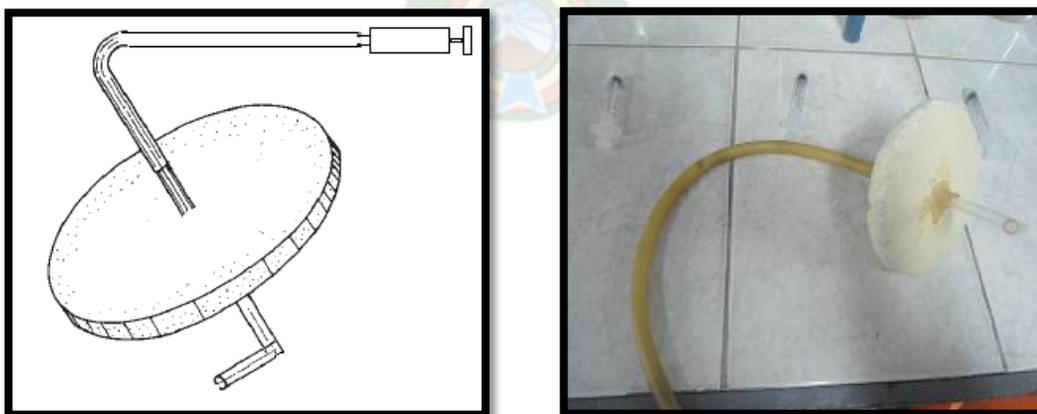
Figura N° 14: Jarras de 1 litro



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Se cuenta también con un sistema de toma de muestras para después de la etapa de sedimentación, esta consta de un sifón de 3 mm de tubo de vidrio. Este sifón debe ser torcido en dirección horizontal en el punto de muestreo para que sea representativo de una profundidad determinada de 5 cm. El sifón está conectado a una manguerilla de goma de 18 cm, en la punta se utilizó una jeringa con el objetivo de regular la velocidad de flujo y evitar el arrastre de sedimentos. El sifón esta sostenido por un flotador de plastofomo de 1.5 cm de espesor.

Figura N° 15: Sifón para tomar muestras



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Finalmente como equipo auxiliar externo se tiene un cronómetro para registrar el tiempo exacto.

3.16.2 Determinación de las condiciones óptimas de tratamiento

Para la determinación de las condiciones óptimas de tratamiento se deben realizar varias pruebas de jarras.

Entre los parámetros a evaluarse en estas pruebas el más importante es la concentración de coagulante que depende de la naturaleza de las muestras tomadas, es por eso que primeramente se halló este parámetro. Como parámetros secundarios se tiene la velocidad óptima de floculación y el tiempo de sedimentación óptimo.

- **Determinación de la cantidad óptima de coagulante**

Para determinar la cantidad óptima de coagulante fue necesario realizar varias pruebas de jarra, variando la cantidad de coagulante hasta encontrar el punto exacto.

Se realizaron pruebas en las dos muestras recolectadas, siendo identificadas de la siguiente manera:

Tabla N° 21: Codificación de muestras

Punto de muestreo	Código
Vertiente ubicada en la avenida principal, cerca de la gasolinera	A
Acequia que pasa por la puerta de viviendas y escuela, ubicada a dos cuadras de la plaza principal de Achocalla	B

Para la determinación de la cantidad óptima de coagulante se debieron seguir los siguientes pasos, basados en la sugerencia bibliográfica de procedimientos del CEPIS que estipula los siguientes pasos:

- ✓ **Preparación de solución de coagulante.-** Se preparó un solución del coagulante al 1%, para esto se disolvió 1 g de coagulante de penca de tuna en

100 ml de agua desionizada, se realizó la disolución del coagulante mediante una agitación de 10 minutos, a una temperatura de 35°C como está recomendado en la bibliografía, finalmente se filtró la solución en un colador común de cocina, la solución se almacenó en un frasco de vidrio, en un refrigerador a una temperatura de 4 °C. La solución obtenida se muestra como un líquido levemente mucilaginoso.

- ✓ **Preparación de las jarras.-** Se vaciaron las muestras en recipientes de plástico de 30 litros de capacidad y se agitaron estas con ayuda de un palo de madera, con el fin de uniformizar las partículas suspendidas. Se midió exactamente 1 litro de agua de las muestras con una probeta graduada y se llevaron los vasos de vidrio. Una vez listas, se acomodaron estas en el equipo, procurando que las paletas se encuentren al medio de cada jarra. Cuando estas estuvieron bien acomodadas, se inició la agitación para mantener las partículas uniformes mientras se preparaban las dosis de coagulante.

Fotografía N° 23: Preparación de muestras de agua



Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Preparación de dosis de coagulante.-** Para dosificar los coagulantes, se emplearon jeringas graduadas de plástico. Se midieron dosis crecientes de

solución de coagulante, posteriormente se colocaron estas delante de cada jarra.

Fotografía N° 24: Preparación de dosis de coagulante



Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la dosificación se realizaron los cálculos de la siguiente manera:

Concentración Solución al 1%

$$C_1 = 1\% \Rightarrow \frac{1gr}{100ml} \times \frac{1000mg}{1gr} \times \frac{1000ml}{1lt} = 10000 \text{ mg/lt}$$

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

$$V_1 = \frac{C_2 * V_2}{C_1}$$

Por ejemplo:

Si queremos dosificar 20 mg/lt tendremos:

$$V_1 = \frac{20 \text{ mg/lt} * 1lt}{10000 \text{ mg/lt}} = 0.002lt \times \frac{1000ml}{1lt} = 2ml$$

✓ **Adición de coagulante de penca de tuna y etapa de coagulación**

Previamente al adicionamiento de las soluciones de coagulante en cada jarra se graduó la velocidad de agitación a 100 rpm.

Una vez uniforme la velocidad se realizó la adición del coagulante a las jarras, teniendo en cuenta que se debe adicionar el coagulante simultáneamente a todas las jarras y procurando que la solución caiga en la parte central de las jarras. Se cronometró 1 minuto a partir de la adición de los coagulantes conservándose la velocidad a 100 rpm.

Fotografía N° 25: Adición de coagulante y etapa de coagulación



Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Etapa de floculación.-** Una vez transcurrido el tiempo de 1 minuto, se disminuyó la velocidad de agitación a 30 rpm según lo recomendado por el CEPIS. Se cronometraron 20 minutos, durante este tiempo se observó la formación de flóculos y las características de estos.
- ✓ **Etapa de sedimentación.-** Una vez transcurridos los 20 minutos se apagó el equipo y se sacaron las jarras, para proceder a la sedimentación por un tiempo de 10 minutos.
- ✓ **Toma de muestras.-** La toma de muestras se realizó mediante el empleo de un sifón de vidrio. Para esto se realizó la succión del agua con la ayuda de una jeringa conectada a la manguerilla, como medida de prevención se desecharon los primeros 10 ml que salieron del sifón. Se tomaron las muestras de agua de cada jarra en vasos de precipitado de 100 ml.
- ✓ **Análisis de muestras.-** Inmediatamente tomadas las muestras, se analizaron los parámetros principales para el control de calidad de métodos de coagulación – floculación, entre estos se valoraron la turbiedad, color y el pH de cada muestra.
- ✓ **Elección de cantidad óptima.-** La elección de la cantidad óptima se determinó mediante la elección de la jarra que presentó mayor porcentaje de remoción de turbiedad, calculado con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Rem}_{Turb} = \frac{\text{Turbiedad}_{\text{Inicial}} - \text{Turbiedad}_{\text{Final}}}{\text{Turbiedad}_{\text{Inicial}}} * 100\%$$

Así mismo se evaluó los resultados de cada jarra observando la calidad visible del flóculo obtenido por el método de Willcomb.

Tabla N° 22: Valores del índice de Willcomb

Características	Valor asignado	Calidad
Flóc coloidal, ningún tipo de aglutinamiento	0	Muy mala
Flóc visible, muy pequeño casi imperceptible	2	Mala
Flóc disperso, bien formado pero no sedimenta	4	Regular
Flóc claro, tamaño relativamente grande, sedimenta muy lento	6	Aceptable
Flóc bueno, sedimenta fácil pero no completamente	8	Buena
Flóc excelente, se deposita todo dejando el agua clara	10	Óptima

Fuente: Análisis Bibliográfico⁴²

Se realizaron varias pruebas de jarra para encontrar los parámetros óptimos de tratamiento que serán detalladas a continuación:

3.17 ENSAYOS DE PRUEBAS DE JARRAS

3.17.1 Ensayos de jarras para la determinación de la dosis óptima de coagulante de penca de tuna

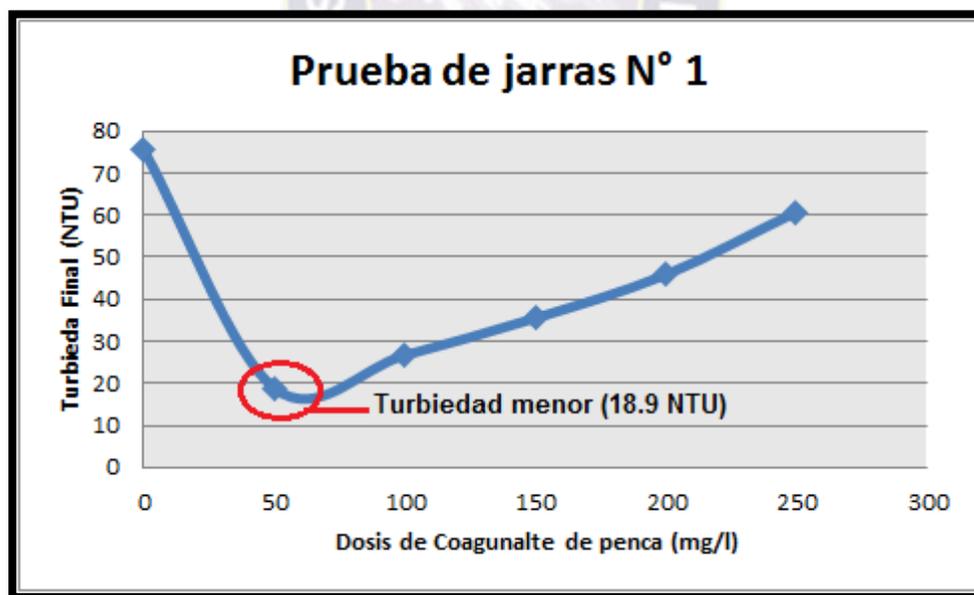
Para esta prueba se trabajó entre varios rangos de dosificación de coagulante de **penca de tuna**. En cuanto a la velocidad de agitación rápida se respetó para todas las pruebas la sugerencia bibliográfica de 100 rpm durante 1 minuto, posteriormente para la agitación lenta o floculación se empleó la velocidad de 30 rpm durante 20 minutos, finalmente se dejó sedimentar por 10 minutos.

⁴² Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades
Ing. Lidia de Vargas

✓ **Muestra A:**

Tabla N° 23: Prueba de jarra N° 1

Prueba de jarras N° 1									
Código de Muestra: A						Rango: 0 – 250 mg/l			
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Turb _o (NTU)	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Color _o	Color _F	pH _o	pH _F	Índice de Willcomb
1	0	75.5	75.5	0	15	15	7.11	7.11	0
2	50	75.5	18.9	74.97	15	15	7.11	7.58	2
3	100	75.5	26.7	64.52	15	15	7.11	7.88	0
4	150	75.5	35.5	52.98	15	15	7.11	8.01	0
5	200	75.5	45.8	39.33	15	17	7.11	8.51	0
6	250	75.5	60.7	19.60	15	20	7.11	8.65	0

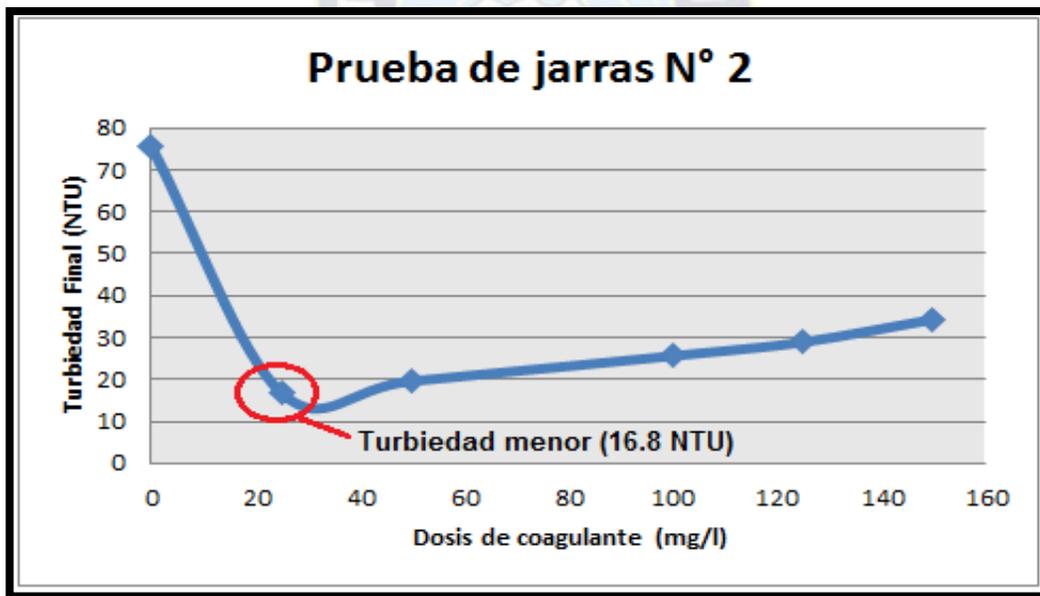


Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 23 y la gráfica, el porcentaje de remoción es mínimo y va disminuyendo proporcionalmente al aumento de la cantidad de coagulante, por lo que se vio por conveniente rebajar las dosis.

Tabla N° 24: Prueba de jarra N° 2

Prueba de jarras N° 2									
Código de Muestra: A					Rango: 0 – 150 mg/l				
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Turb _o (NTU)	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Color _o	Color _F	pH _o	pH _F	Índice de Willcomb
1	0	75.5	75.5	0	15	15	7.11	7.11	0
2	25	75.5	16.8	77.75	15	13	7.11	7.21	4
3	50	75.5	19.6	74.04	15	15	7.11	7.35	2
4	100	75.5	25.6	66.09	15	15	7.11	7.88	2
5	125	75.5	28.9	61.72	15	20	7.11	7.91	0
6	150	75.5	34.3	54.57	15	20	7.11	8.00	0

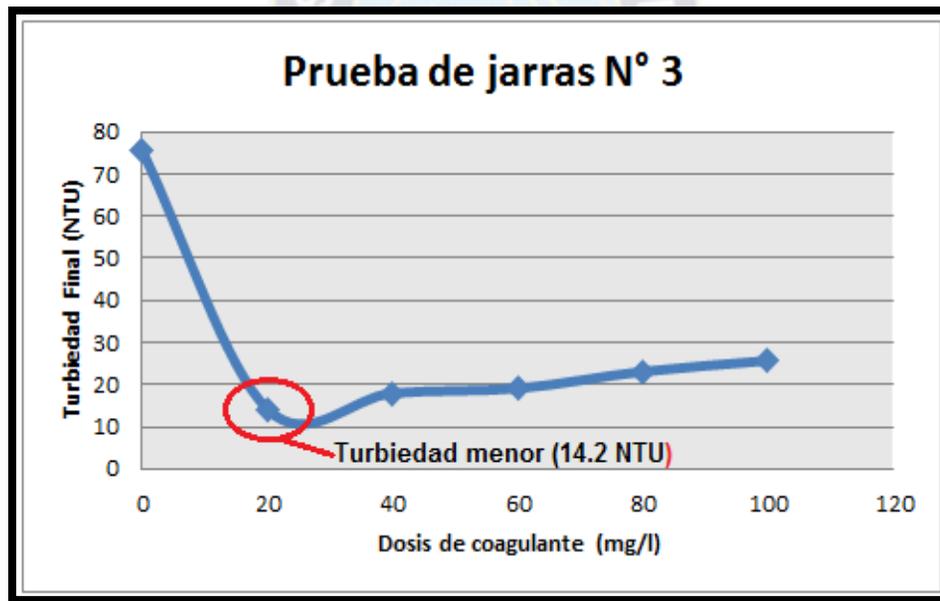


Fuente: Elaboración propia

En esta prueba, al disminuir la dosis de coagulante se comprobó que a menor cantidad, mayor porcentaje de remoción de la turbiedad. Motivo por el cual se siguió bajando la dosis.

Tabla N° 25: Prueba de jarra N° 3

Prueba de jarras N° 3									
Código de Muestra: A					Rango: 0 – 100 mg/l				
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Turb _o (NTU)	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Color _o	Color _F	pH _o	pH _F	Índice de Willcomb
1	0	75.5	75.5	0	15	15	7.11	7.11	0
2	20	75.5	14.2	81.19	15	11	7.11	7.20	6
3	40	75.5	18.0	76.16	15	11.5	7.11	7.33	4
4	60	75.5	19.1	74.70	15	11.5	7.11	7.65	2
5	80	75.5	23.1	69.40	15	12	7.11	7.83	2
6	100	75.5	25.7	65.96	15	12	7.11	7.90	0

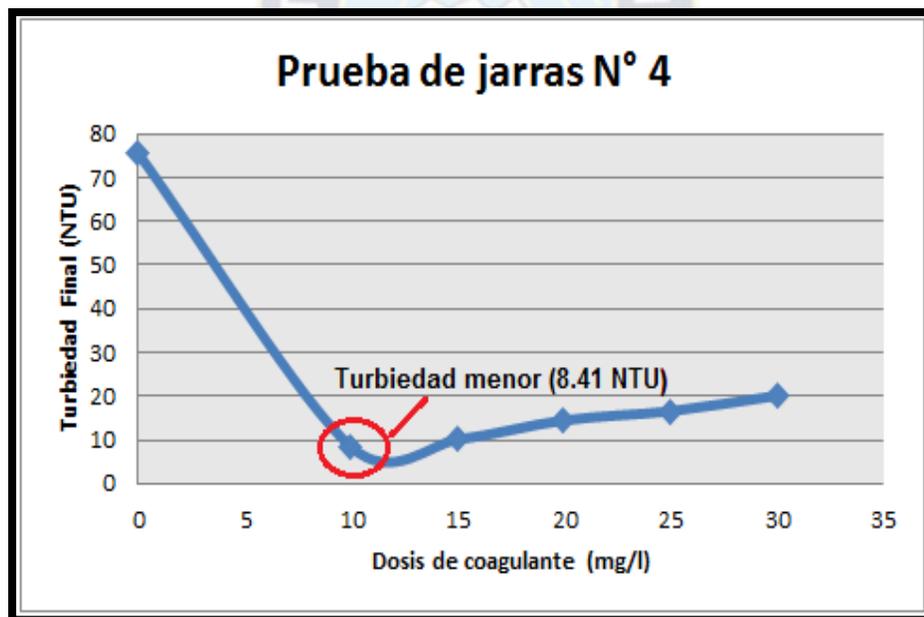


Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en esta tabla, la dosis óptima de coagulante que se eligió es de 20 mg/l, debido a que en esta jarra se presenta el índice de Willcomb igual a 6 más alto y a simple vista es la jarra en la que se evidencia la mejor formación del flóc. Por lo tanto se realizaron más pruebas para encontrar el punto exacto.

Tabla N° 26: Prueba de jarra N° 4

Prueba de jarras N° 4									
Código de Muestra: A					Rango: 0 – 30 mg/l				
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Turb _o (NTU)	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Color _o	Color _F	pH _o	pH _F	Índice de Willcomb
1	0	75.5	75.5	0	15	15	7.11	7.11	0
2	10	75.5	8.41	88.86	15	11	7.11	6.93	8
3	15	75.5	10.1	86.62	15	11	7.11	6.69	6
4	20	75.5	14.5	80.79	15	11	7.11	6.58	6
5	25	75.5	16.6	78.01	15	11.5	7.11	7.17	4
6	30	75.5	20.1	73.37	15	11.5	7.11	7.20	4

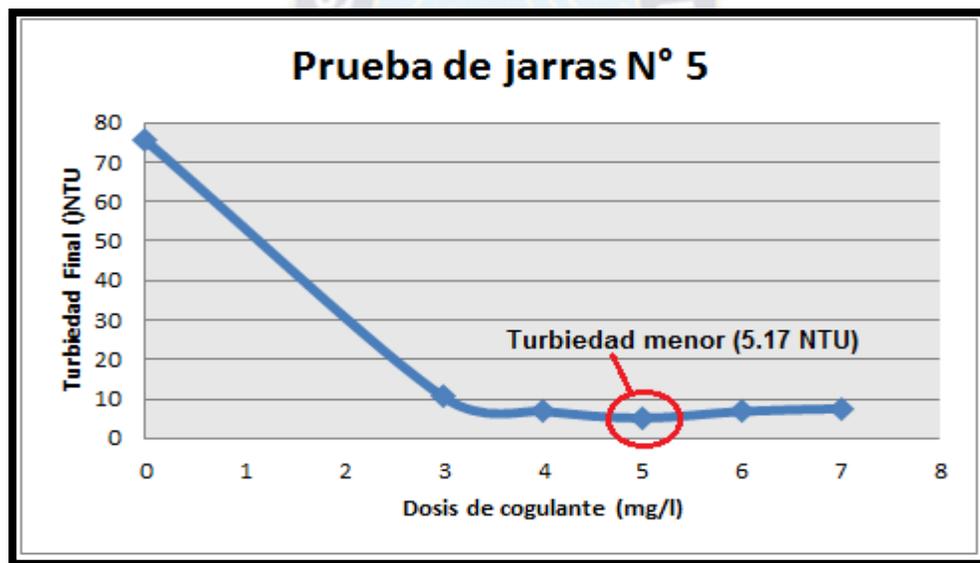


Fuente: Elaboración propia

Como se puede evidenciar el porcentaje de remoción sigue aumentando a medida en que la dosis baja, por tanto se hizo dosificaciones más bajas hasta llegar a la dosis óptima.

Tabla N° 27: Prueba de jarra N° 5

Prueba de jarras N° 5									
Código de Muestra: A					Rango: 0 – 7 mg/l				
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Turb _o (NTU)	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Color _o	Color _F	pH _o	pH _F	Índice de Willcomb
1	0	75.5	75.5	0	15	15	7.11	7.11	0
2	3	75.5	10.51	86.08	15	13	7.11	7.11	4
3	4	75.5	6.89	90.87	15	11	7.11	7.12	4
4	5	75.5	5.17	93.15	15	10	7.11	7.16	10
5	6	75.5	6.87	90.90	15	11.5	7.11	7.18	8
6	7	75.5	7.54	90.01	15	12	7.11	7.19	8



Fuente: Elaboración propia

En la prueba de jarras N° 5 se vio que la dosis de 5 mg/l de coagulante de **penca de tuna** obtuvo el mayor porcentaje de remoción de turbiedad con un 93.15%. También se llegó al máximo valor apreciable del índice de Willcomb igual a 10, lo cual muestra que el flóc es de calidad óptima, debido a que se forma notablemente y se deposita al fondo de la jarra dejando el agua casi transparente,

con muy bajo nivel de turbiedad. Es por esto que para la muestra A tomada de la vertiente de la avenida principal se llegó a concluir que la cantidad de coagulante de **penca de tuna** óptima es de **5 mg /L** de agua a tratar.

Fotografía N° 26: Prueba de jarras N° 5



Fuente: Elaboración propia

También se debe citar que el pH varía muy poco con esta dosis; en un rango de 7.11 a 7.16. Además cabe destacar que este parámetro se encuentra en el rango aceptable según la NB 512, es por esto que no se realizó pruebas para el ajuste del pH. Sin embargo, en los resultados se puede evidenciar que el pH varia de forma directamente proporcional a la cantidad de coagulante es decir que a mayor cantidad de coagulante mayor pH.

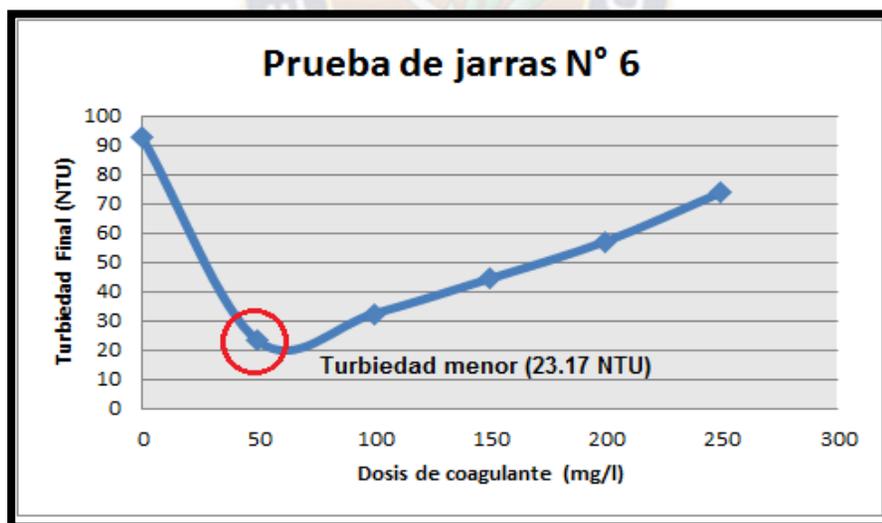
En cuanto al color se pudo evidenciar una breve remoción que no muestra gran significancia en los resultados; de **15 a 10 UCV**.

✓ **Muestra B:**

Se realizará el mismo procedimiento para la **muestra B**

Tabla N° 28: Prueba de jarra N° 6

Prueba de jarras N° 6									
Código de Muestra: B					Rango: 0 – 250 mg/l				
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Turb _o (NTU)	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Color _o	Color _F	pH _o	pH _F	Índice de Willcomb
1	0	92.5	92.5	0	20	20	7.16	7.16	0
2	50	92.5	23.17	74.95	20	20	7.16	7.36	2
3	100	92.5	32.49	64.87	20	20	7.16	7.54	0
4	150	92.5	44.43	51.96	20	21	7.16	7.86	0
5	200	92.5	57.13	38.23	20	22	7.16	7.99	0
6	250	92.5	73.90	20.10	20	25	7.16	8.19	0

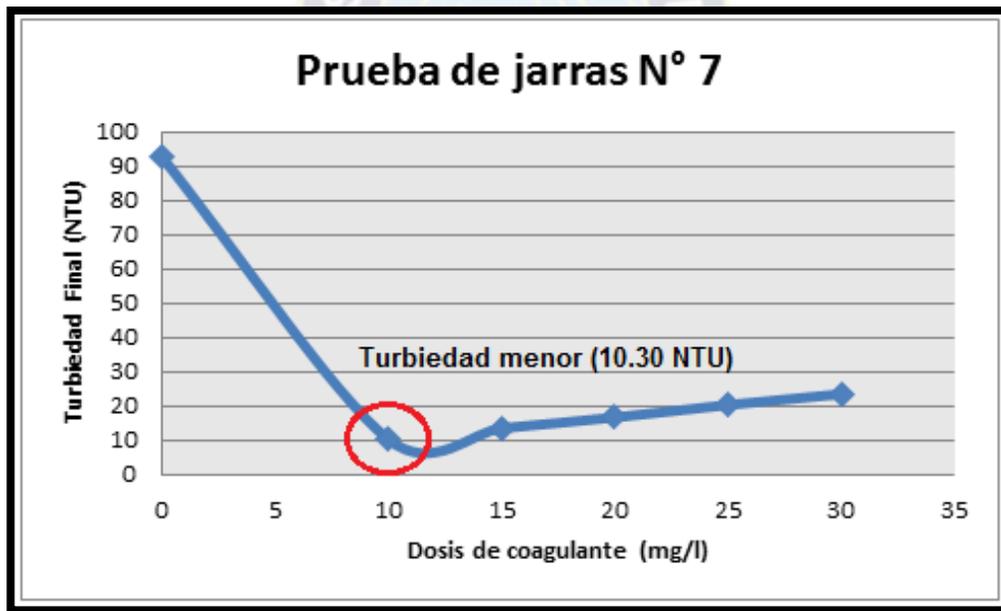


Fuente: Elaboración propia

En esta prueba de jarras se pudo evidenciar nuevamente que a menor dosis mejor coagulación, por esto se pasó directamente a dosificar con cantidades entre 0 a 30 mg/l.

Tabla N° 29: Prueba de jarra N° 7

Prueba de jarras N° 7									
Código de Muestra: B					Rango: 0 – 30 mg/l				
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Turb _o (NTU)	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Color _o	Color _F	pH _o	pH _F	Índice de Willcomb
1	0	92.5	92.5	0	20	20	7.16	7.16	0
2	10	92.5	10.30	88.86	20	15	7.16	7.22	8
3	15	92.5	13.56	85.34	20	15.5	7.16	7.22	6
4	20	92.5	16.74	81.90	20	18	7.16	7.25	6
5	25	92.5	20.37	77.98	20	18	7.16	7.28	4
6	30	92.5	23.53	74.56	20	20	7.16	7.30	4

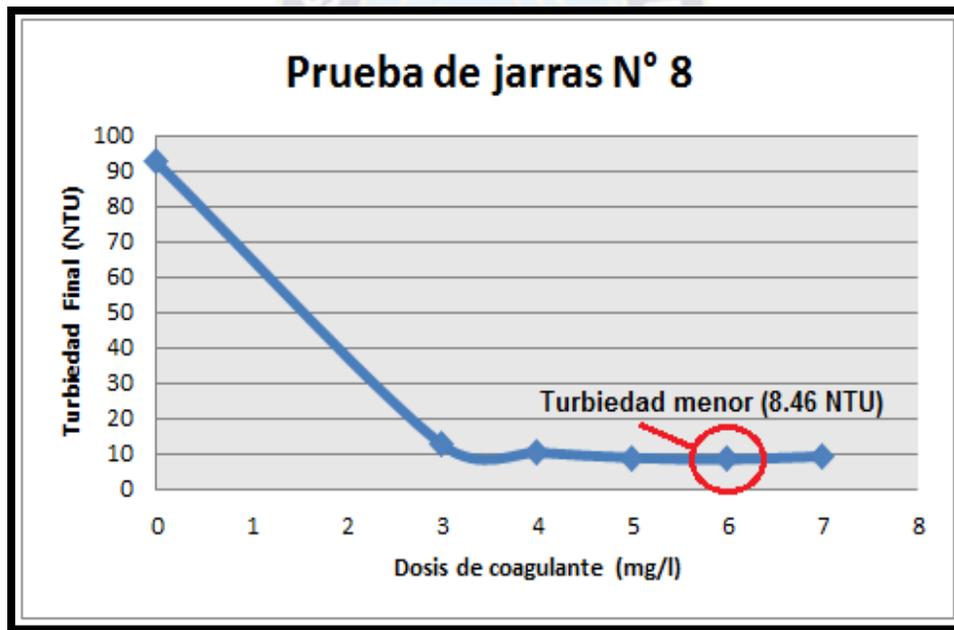


Fuente: Elaboración propia

En esta prueba de jarras N° 7 se comprobó la teoría de que a menor cantidad de coagulante, mayor porcentaje de remoción de turbiedad, como ocurrió en la jarra N° 2, en la cual se consiguió llegar al mayor índice de Willcomb igual a 8. En la siguiente prueba se disminuyó la dosis para encontrar el punto más exacto.

Tabla N° 30: Prueba de jarra N° 8

Prueba de jarras N° 8									
Código de Muestra: A					Rango: 0 – 7 mg/l				
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Turb _o (NTU)	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Color _o	Color _F	pH _o	pH _F	Índice de Willcomb
1	0	92.5	92.5	0	20	15	7.16	7.16	0
2	3	92.5	12.69	86.28	20	13	7.16	7.14	4
3	4	92.5	10.44	88.71	20	11	7.16	7.16	4
4	5	92.5	8.95	90.32	20	10	7.16	7.15	6
5	6	92.5	8.46	90.85	20	11.5	7.16	7.18	10
6	7	92.5	9.34	89.90	20	12	7.16	7.20	8

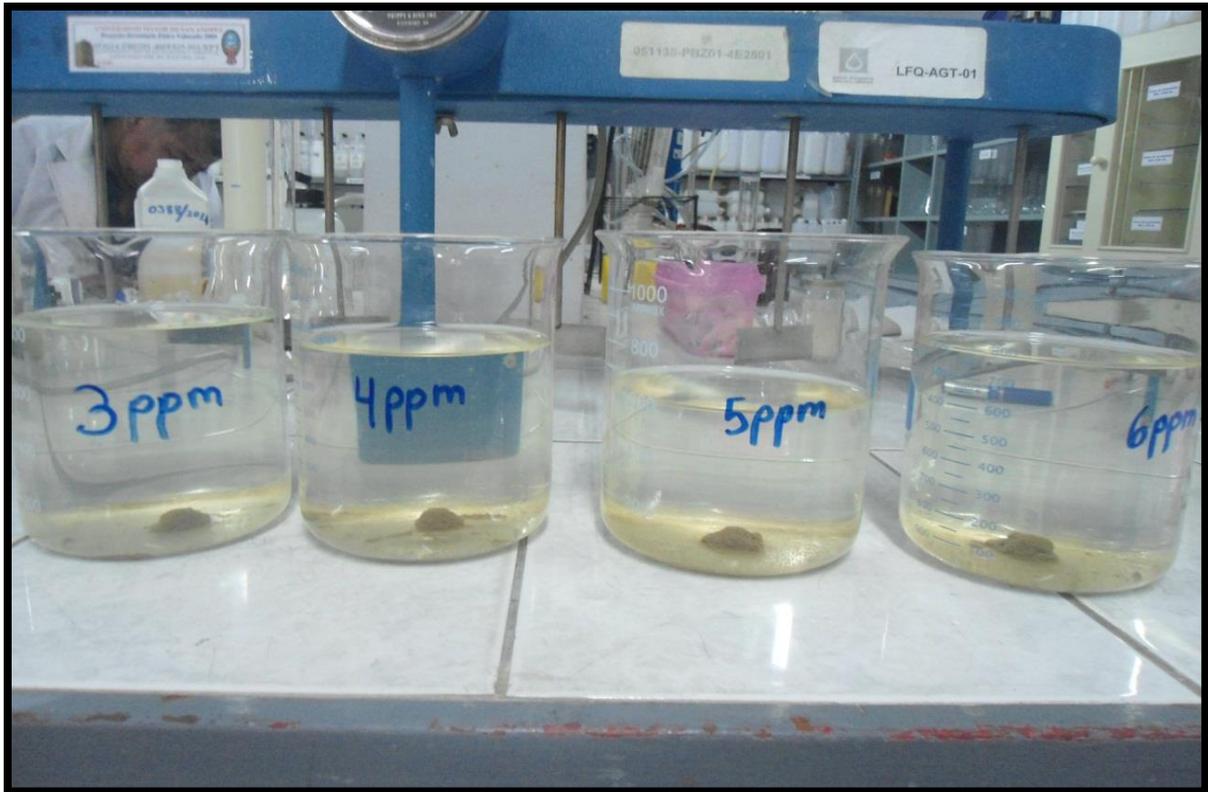


Fuente: Elaboración propia

En la prueba de jarras N° 8 se pudo evidenciar que la dosis óptima de coagulante para la muestra con turbiedad inicial de 92.5 NTU, se presentó en la jarra N° 5 con una dosis de **6 mg/L** de coagulante de penca de tuna. En este punto se obtuvo el mayor porcentaje de remoción de turbiedad con un **90.85 %**, quedando una

turbiedad final de **8.46 NTU**. Analizando el índice de Willcomb que esta vez recae en **10**, se evidenció que el flóc formado se precipita al fondo de la jarra dejando el agua clara.

Fotografía N° 27: Prueba de jarras N° 8



Fuente: Elaboración propia

De igual manera que en la muestra A se concluye que si bien el pH y el color varían, la variación no es tan significativa.

3.17.2 Determinación de la velocidad óptima de agitación lenta o periodo de floculación

Una vez que se determinó la cantidad óptima de coagulante necesario para cada muestra de agua, se procedió a realizar la corrección de la velocidad de agitación.

Mediante bibliografía y como sugerencia del CEPIS, la velocidad de agitación rápida o coagulación es de 100 rpm invariablemente, ya que si se disminuye esta velocidad, se disminuye también la dispersión del coagulante en el agua, lo cual hace que el proceso disminuya la calidad de clarificación.

Lo que sí se puede variar es la velocidad en la etapa de floculación, que está comprendida entre **20 a 40 rpm**.

Como el equipo utilizado tiene un sistema de engranajes, no es posible variar las velocidades en una misma corrida o prueba, es por tal motivo que se realizaron pruebas manteniendo la dosis óptima constante pero variando las velocidades de mezcla lenta o floculación.

✓ **Ensayos de jarras para la determinación de la velocidad óptima de agitación lenta o periodo de floculación**

La determinación de la velocidad óptima de agitación lenta se realizó por medio de pruebas de jarras en las que se fue variando la velocidad de agitación lenta. Esta velocidad se fue variando en un intervalo: de **20 a 40 rpm**.

Sabiendo que la velocidad de floculación tiene mucho que ver con la formación de flócs, se escogió como velocidad óptima aquella que presentaba la formación de flócs más consistentes.

En las siguientes pruebas solamente se midieron las turbiedades inicial y final, no así el pH ni el color, ya que se comprobó que estas no varían significativamente.

Tabla N° 31: Prueba de jarra N° 9 a 20 rpm

Prueba de jarras N° 9						
Código de Muestra: A						
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Velocidad de agitación (rpm)	Turb_o (NTU)	Turb_F (NTU)	% Rem Turb	Índice de Willcomb
1	5	20	75.5	6.18	91.81	8
2	5	20	75.5	6.54	91.33	8
3	5	20	75.5	6.42	91.49	8
Código de Muestra: B						
4	6	20	92.5	9.18	90.07	8
5	6	20	92.5	9.35	89.91	8
6	6	20	92.5	9.23	90.02	8

Fuente: Elaboración propia

En esta prueba se notó que a la velocidad de 20 rpm y con la dosis óptima de 5 mg/l el porcentaje de remoción de la turbiedad bajó considerablemente, además en la escala de Willcomb igual a **8**, el valor perceptible de la calidad del flóculo formado también bajó un nivel. En las jarras se pudo apreciar que el agua se mostraba un poco más turbia.

Seguidamente se muestran los datos de la muestra tratada con una velocidad de **40 rpm**.

Tabla N° 32: Prueba de jarra N° 10 a 40 rpm

Prueba de jarras N° 10						
Código de Muestra: A						
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Velocidad de agitación (rpm)	Turb_o (NTU)	Turb_F (NTU)	% Rem Turb	Índice de Willcomb
1	5	40	75.5	8.64	88.56	6
2	5	40	75.5	8.78	88.37	6
3	5	40	75.5	8.84	88.29	6
Código de Muestra: B						
4	6	40	92.5	10.54	88.60	6
5	6	40	92.5	11.30	87.78	6
6	6	40	92.5	10.47	88.68	6

En esta prueba, se vio que el porcentaje de remoción varió mucho más con respecto a la anterior prueba de 20 rpm, así mismo el índice de Willcomb bajo un punto más, es decir igual a **6**.

Por lo tanto se trabajará en la siguiente prueba con la velocidad de 30 rpm, para comprobar que esta es la velocidad adecuada de agitación lenta.

Tabla N° 33: Prueba de jarras N° 11 a 30 rpm

Prueba de jarras N° 11						
Código de Muestra: A						
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Velocidad de agitación (rpm)	Turb_o (NTU)	Turb_F (NTU)	% Rem Turb	Índice de Willcomb
1	5	30	75.5	5.78	92.34	10
2	5	30	75.5	5.63	92.54	10
3	5	30	75.5	5.89	92.19	8
Código de Muestra: B						
4	6	30	92.5	8.54	90.76	8
5	6	30	92.5	8.32	91.00	10
6	6	30	92.5	8.59	90.71	8

Fuente: Elaboración propia

En la prueba de jarras N° 11 se pudo comprobar que la velocidad óptima de agitación lenta en la etapa de floculación es de 30 rpm, ya que con esta velocidad el porcentaje de remoción es el más elevado, llegando a un porcentaje promedio de remoción del 92.36% para la muestra A y un porcentaje promedio del 90.82% para la muestra B.

Esto debido a que los flócs no se rompen como con la velocidad de 40 rpm y se forman más rápido que con la velocidad de 20 rpm.

3.17.3 Determinación del tiempo de sedimentación

El tiempo de sedimentación también es considerado como factor variable, es por esto que se realizaron variaciones de tiempo de sedimentación entre 5 a 30 minutos. Para esta prueba no se necesitó realizar muchas corridas ya que este parámetro no dependía del equipo. Se necesitó el empleo de un cronómetro para determinar el tiempo exacto de espera.

✓ Ensayos de prueba de jarras para la determinación del tiempo de sedimentación óptimo

Para ambas pruebas se mantuvo la dosis óptima de coagulante y la velocidad de agitación lenta de 30 rpm.

Tabla N° 34: Prueba de jarra N° 12

Prueba de jarras N° 12							
Código de Muestra: A							
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Velocidad (rpm)	Tiempo de Sed.(min)	Turb_o (NTU)	Turb_f (NTU)	% Rem Turb	Índice de Willcomb
1	5	30	5	75.5	9.38	87.58	0
2	5	30	10	75.5	5.82	92.29	10
3	5	30	15	75.5	5.17	93.15	10
4	5	30	20	75.5	6.10	91.92	8
5	5	30	25	75.5	5.18	93.12	8
6	5	30	30	75.5	5.32	92.95	8

Fuente: Elaboración propia

En esta prueba se determinó que el mejor porcentaje de remoción de turbiedad se presentó en la jarra N° 3 con un **93.15%**, en la que aplicamos un tiempo de sedimentación de 15 minutos y una velocidad de **30 rpm**, y un índice de Willcomb igual a **10**.

Tabla N° 35: Prueba de jarra N° 13

Prueba de jarras N° 13							
Código de Muestra: B							
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Velocidad (rpm)	Tiempo de Sed.(min)	Turb_o (NTU)	Turb_F (NTU)	% Rem Turb	Índice de Willcomb
1	6	30	5	92.5	9.53	89.69	4
2	6	30	10	92.5	8.50	90.81	8
3	6	30	15	92.5	8.53	90.78	10
4	6	30	20	92.5	8.49	90.82	10
5	6	30	25	92.5	8.51	90.80	10
6	6	30	30	92.5	8.53	90.78	8

Fuente: Elaboración propia

En esta prueba se determinó que el mejor porcentaje de remoción de la turbiedad se presentó en la jarra N° 4 con un **90.82%**, en la que aplicamos un tiempo de sedimentación de **20 minutos** y una velocidad de **30 rpm**. Dándonos finalmente un Índice de Willcomb de **10**.

- **Parámetros óptimos finales de tratamiento**

Una vez concluida la evaluación de las tres variables más importantes, cantidad de coagulante necesario, velocidad de agitación lenta o floculación y tiempo de sedimentación, se puede establecer un proceso óptimo de tratamiento para la naturaleza de las dos muestras de agua, los datos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla N° 36: Cuadro de resumen de parámetros finales óptimos

Parámetros finales óptimos para el tratamiento					
Turb_o (NTU)	Dosis	Velocidad de agitación (rpm)	Tiempo de Sedimentación (min)	Turb_f (NTU)	% Rem Turb
Código de Muestra: A					
75.5	5 mg/l	30 rpm	15 min	5.17	93.15
Código de Muestra: B					
92.5	6 mg/l	30 rpm	20 min	8.49	90.82

Fuente: Elaboración propia

- **Comparación entre el coagulante de penca de tuna y el Sulfato de Aluminio**

Ya habiéndose determinado los parámetros de operación óptimos para cada muestra de agua y como se planteó en los objetivos, se realizó una comparación de resultados entre el coagulante de penca de tuna y el Sulfato de aluminio, con el objetivo de comparar la efectividad de ambos coagulantes para las muestras. Se prepararon las muestras de la misma manera que para las anteriores pruebas y se emplearon las mismas condiciones, los resultados se resumen en las tablas 37 y 38 para ambas muestras de agua:

Tabla N° 37: Prueba de jarras N° 14 (Sulfato vs Coagulante de Tuna)

Prueba de jarras N° 14						
Código de Muestra: A						
Coagulante: Penca de Tuna						
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Velocidad de agitación (rpm)	Turb_o (NTU)	Turb_F (NTU)	% Rem Turb	Índice de Willcomb
1	5	30	75.5	5.87	92.22	8
2	5	30	75.5	5.53	92.67	10
3	5	30	75.5	5.85	92.25	8
Coagulante: Sulfato de Aluminio						
4	5	30	75.5	2.44	96.76	10
5	5	30	75.5	2.64	96.50	10
6	5	30	75.5	2.56	96.61	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 38: Prueba de jarras N° 14 (Sulfato vs Coagulante de Tuna)

Prueba de jarras N° 15						
Código de Muestra: B						
Coagulante: Penca de Tuna						
Jarra N°	Dosis (mg/l)	Velocidad de agitación (rpm)	Turb₀ (NTU)	Turb_F (NTU)	% Rem Turb	Índice de Willcomb
1	6	30	92.5	9.67	89.54	8
2	6	30	92.5	9.34	89.90	10
3	6	30	92.5	9.68	89.53	8
Coagulante: Sulfato de Aluminio						
4	6	30	92.5	3.65	96.05	10
5	6	30	92.5	3.44	96.28	10
6	6	30	92.5	3.87	95.82	10

Fuente: Elaboración propia

Se vio en ambas pruebas una gran diferencia en la etapa de floculación, ya que la formación de flócs es más notable para el sulfato de aluminio. Estos precipitan de mejor manera y evidentemente el agua tratada con sulfato de aluminio es más clara. Además existe un mayor porcentaje de remoción de la turbidez. En cuanto al pH se vio una clara disminución, en la muestra A de **7.11 a 6.51** y en la muestra B de **7.16 a 6.29**.

3.18 ANÁLISIS DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA ANTES Y DESPUES DEL TRATAMIENTO

Una vez determinadas todas las variables de estudio importantes, se tendrán las características óptimas de tratamiento de cada muestra. Si bien nuestros aspectos más relevantes a evaluar en las muestras fueron la turbiedad, pH y color, se realizó el análisis organoléptico, fisicoquímico y químico antes y después del tratamiento con el coagulante de **penca de tuna**, evaluando así las muestras con las metodologías siguientes:

- Parámetros organolépticos

Estos parámetros son los que influyen en la aceptabilidad del agua y se detectaron sensorialmente, como ser el aspecto físico y olor de las muestras de agua recolectadas. Para la determinación de color se utilizó un kit de discos Color Model CO-1 0-100, 0-500.

Fotografía N° 28: Colorímetro CO-1 0-100, 0-500



Tabla N° 39: Parámetros organolépticos

Parámetro	Muestra	Antes	Posterior
Aspecto físico	A	Turbio	transparente
	B	Turbio	transparente
Olor	A	Ninguno	Ninguno
	B	Ninguno	Ninguno
Color	A	15	10
	B	20	11.5

- **Parámetros fisicoquímicos**

Entre estos aspectos se analizaron:

- ✓ **La temperatura.-** Se midió la temperatura con un termómetro digital, una vez que las muestras llegaron al laboratorio.
- ✓ **pH.-** Para la medición del pH, se utilizó el método potenciométrico, para esto se empleó un pHmetro digital de laboratorio de marca MP 225.

Fotografía N° 29: pHmetro utilizado



- ✓ **Turbiedad.-** Para la medición de la turbiedad se empleó el método nefelométrico. Este método está basado en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas con la luz dispersada por una suspensión estándar de referencia bajo las mismas condiciones. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz dispersada, mayor será la turbidez. Se utilizó un turbidímetro digital de mesa modelo 2100an con un rango de medición de 0 a 1000 NTU.

Fotografía N° 30: Turbidímetro digital utilizado



Tabla N° 40: Parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Muestra	Antes	Posterior
Temperatura	A	14.3	14.4
	B	14.5	14.6
pH	A	7.11	7.16
	B	7.16	7.18
Turbiedad	A	75.5	5.17
	B	92.5	8.49

- **Parámetros químicos**

Entre los parámetros químicos que se analizó tenemos los siguientes:

- ✓ **Alcalinidad.-** Para la determinación de este parámetro se empleó el método volumétrico, por la titulación con H_2SO_4 , previamente estandarizado con Na_2CO_3 . Como se conoce las muestras tienen un pH casi neutro (alrededor de 7), solo se realizó la segunda etapa de titulación, con el indicador verde de bromocresol, hasta el viraje de color de azul a café pardo.

- ✓ **Acidez.-** Para este parámetro se realizó una titulación volumétrica con NaOH y el indicador fenolftaleína. En el cual se pudo evidenciar que no existe la presencia por CO_2 , pero si existe acidez mineral.

Fotografía N° 29: Análisis Químico Volumétrico



- ✓ **Dureza.-** Para la determinación de la dureza se empleó también el método volumétrico de titulación con EDTA estandarizado con $CaCO_3$. A la muestra se

le debe adicionar 2 ml de buffer amonio/amoniaco, se utilizó el indicador NET, y se tituló hasta viraje de color de rojo vino a azul.

- ✓ **Calcio.-** Para la determinación de calcio en las muestras se realizó también la titulación con EDTA estandarizado, previamente se añadió a las muestras 2 ml de NaOH 1N y se empleó el indicador murexida, observando un viraje de color de rosado a violeta.
- ✓ **Magnesio.-** La determinación de magnesio en nuestras muestras de agua se realizara mediante una operación matemática.
- ✓ **Cloruros.-** La cantidad de cloruros existente en las muestras de agua se determinó por el método argentométrico de Mohr, mediante una titulación de las muestras con una solución de nitrato de plata, utilizando cromato de potasio como indicador, hasta la formación de un precipitado color marrón.
- ✓ **Sulfatos.-** La determinación de sulfatos se realizó por el método espectrofotométrico selectivo, utilizando un espectrofotómetro de UV – visible a una longitud de onda de 420 nm. Previamente se prepararon las soluciones patrón con Na₂SO₄, esto con el fin de crear una curva patrón. La determinación de la concentración de sulfatos se realizó mediante el método de los mínimos cuadrados.
- ✓ **Nitratos.-** Para la determinación de los nitratos se empleó el mismo método que para los sulfatos, con la diferencia de que la longitud de onda para este ion es de 201 nm
- ✓ **Hierro, manganeso, sodio y potasio.-** Se evaluaron estos parámetros por absorción atómica.

Luego de los análisis se detallan los resultados en la siguiente tabla:

Tabla N° 41: Parámetros químicos analizados

Parámetro	Muestra	Antes del tratamiento	Final c/ penca	Final c/ Al ₂ (SO ₄) ₃
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	A	69.6	64.8	62.4
	B	74.4	67.2	57.6
Acidez (mg/l CaCO ₃)	A	13.2	15.4	8.8
	B	11	13.2	8.8
Dureza (mg/l CaCO ₃)	A	130	137.8	101.4
	B	161.2	166.4	137.8
Calcio (mg/l Ca ²⁺)	A	39.52	36.4	30.16
	B	47.84	40.56	37.44
Magnesio (mg/l Mg ²⁺)	A	7.58	13.26	6.31
	B	10.11	15.8	10.74
Cloruros (mg/l Cl ⁻)	A	25	24	26
	B	30.1	28.5	30.5
Sulfatos (mg/l SO ₄ ⁻)	A	24.63	24.11	31.13
	B	28.54	27.8	35.7
Nitratos (mg/l NO ₃ ⁻)	A	208.36	268.59	278.33
	B	210.4	257.34	263.44
Hierro	A	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Manganeso	A	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Sodio	A	20.5	17.5	17
Potasio	A	2.76	3.24	2.93

Fuente: Elaboración propia

Como se pudo evidenciar en los resultados de los análisis previos que la mayoría de los parámetros químicos se encuentran dentro del rango de los límites máximos permisibles que nos presenta la norma boliviana NB 512.

Y es evidente también que realizando una comparación entre el coagulante de penca de tuna y el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio es el más efectivo en la disminución de algunos parámetros químicos como por ejemplo la dureza total.

- **Parámetros microbiológicos**

- ✓ **Coliformes totales.**- Este parámetro se evaluó por el método de filtración a través de membrana M.F., este análisis se realizó en el instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental⁴³.

Tabla N° 42: Parámetros microbiológicos analizados

Parámetro	Muestra	Antes	Posterior
Coliformes totales	A	5.2×10^5	2.1×10^4

⁴³ Ver certificado de verificación en el capítulo de Anexos

4.1 CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE LA MATERIA PRIMA

Habiéndose realizado los análisis respectivos y comparando con los datos bibliográficos tenemos la siguiente tabla:

Tabla N°43: Caracterización de la penca de tuna

Parámetro	Valor analítico	Valor teórico
Humedad	92%	93.57%
Cenizas	0.83%	0.6%
pH	4.38	5
Coefficiente de difusividad a través del sólido	$5.24 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h}$	-

Fuente: Elaboración propia

- Se puede apreciar en la Tabla 4.1, que la muestra presentó un alto contenido de humedad. Se estableció que la muestra perdió el 92% de su peso. Este valor es muy consistente con el valor teórico reportado para la Tuna (*Opuntia ficus-indica*).
- El pH se encuentra aproximadamente acorde al valor del análisis reportado por el Departamento de Bioquímica de la Universidad San Francisco Xavier para la Tuna. Estos resultados nos permiten afirmar que la especie tratada cumple con las propiedades características de Tuna (*Opuntia ficus-indica*).
- Como se puede ver en la tabla 4.1 los parámetros son similares a los teóricos, entonces se pudo afirmar que las muestras de penca tomadas son de la especie *Opuntia Ficus Indica*.

- Se pudo hallar el coeficiente de difusividad a través del sólido de penca de tuna, y ya que no se registran valores bibliográficos de esta especie, no se realizó la comparación.
- En cuanto al tiempo de secado, este es directamente proporcional a la pérdida de humedad de la muestra.

4.2 OBTENCIÓN DE COAGULANTE

- Proceso de obtención

Se determinó un diagrama del proceso de obtención del coagulante en polvo⁴⁴ :

- ✓ Inicialmente en la recolección de **penca de tuna** se pudo evidenciar que se debe tener mucho cuidado en el corte de las pencas, ya que si se deja un corte grande en la planta, esta puede dañarse y empezar a podrirse, afectándose así a la planta entera.
- ✓ En cuanto a la selección de pencas se tuvieron que desechar dos de las diez pencas recolectadas por la evidente presencia de hongos en estas, esto con el fin de evitar la contaminación del coagulante.
También se midió cada penca, obteniéndose un promedio de **31.09 cm de largo, 17.39 cm de ancho y 1.13 cm de espesor**. De la misma manera se pesó cada penca obteniéndose un peso promedio de **502.9 g** por penca.
- ✓ Para la parte de la limpieza y pelado se recomienda el uso de guantes para evitar daños con las espinas en las manos, se utilizó también un cuchillo en punta para facilitar el pelado.

⁴⁴ Figura N° 5: Procedimiento de Obtención de Coagulante de Penca de Tuna – Pág. xx

- ✓ El tamaño de cortado seleccionado fue de:

Tabla N° 44: Tamaño de cortado de pencas para secado

Parámetro	Medida (cm)
Largo	6 cm
Ancho	1 cm
Espesor	1 cm

Fuente: Elaboración propia

- ✓ Este se seleccionó tomando en cuenta que al final del tiempo de secado las tiras con estas dimensiones sufrían una pérdida de humedad de aproximadamente el **93%**, que corresponde aproximadamente al valor hallado en el análisis fisicoquímico de la penca.
- ✓ En cuanto a la etapa de secado se mantuvo la sugerencia bibliográfica del estudio realizado por el CEPIS, en el cual se secaron las tiras por **48 horas** ininterrumpidas a una temperatura constante de **60° C**.
- ✓ La molienda se debe realizar inmediatamente finalizado el proceso de secado, ya que las tiras al encontrarse secas son quebradizas y esto facilita el proceso de molienda. Se pudo ver que la molienda se realizó de manera casi uniforme, no quedando residuos duros, y en el tamizado solamente quedaron residuos de las fibrillas blanquecinas que las pencas tienen en su interior.
- ✓ En cuanto a la extracción se debe tener un especial cuidado en el control de la temperatura, ya que se trabajó con etanol, que es un solvente muy inflamable a altas temperaturas. Se tuvieron que hacer repetidas extracciones ya que es evidente el alto contenido de clorofila y de otros pigmentos verdesos.

- ✓ Finalizada la extracción se secó el cartucho para eliminar el residuo de alcohol, una vez seco se pulverizó fácilmente, obteniéndose el coagulante en polvo libre de pigmentos y con un diámetro de partícula de 0.6 mm; listo para ser usado.
- ✓ Se recomienda almacenar el producto en un recipiente de vidrio herméticamente cerrado.

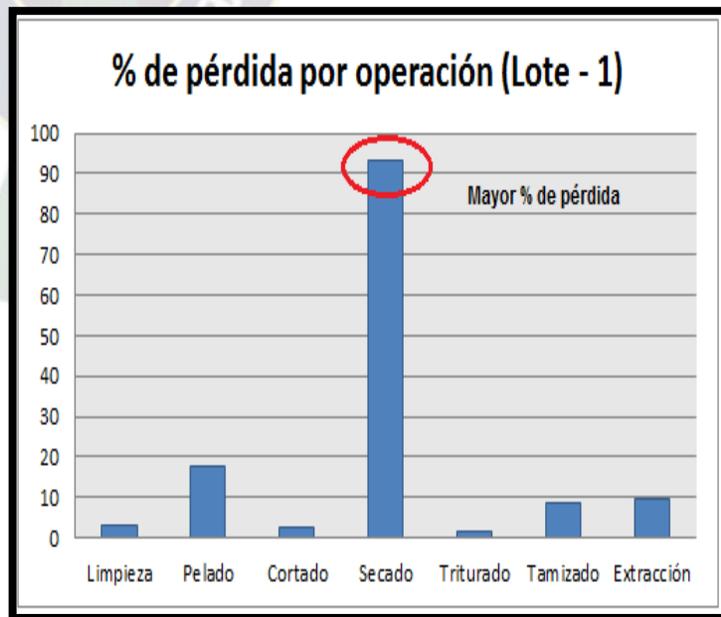
4.3 RENDIMIENTO DE OBTENCION DE COAGULANTE DE PENCA DE TUNA

Una vez realizado el proceso de obtención del coagulante, se efectuó el balance de masa respectivo por lote así tenemos que:

- Lote N° 1

Gráfica N° 3: Porcentaje de pérdida de peso por operación en el Lote -2

Operación	Pérdida por Operación (%)
Limpieza	3.04
Pelado	17.6
Cortado	2.5
Secado	93
Triturado	1.35
Tamizado	8.49
Extracción	9.63

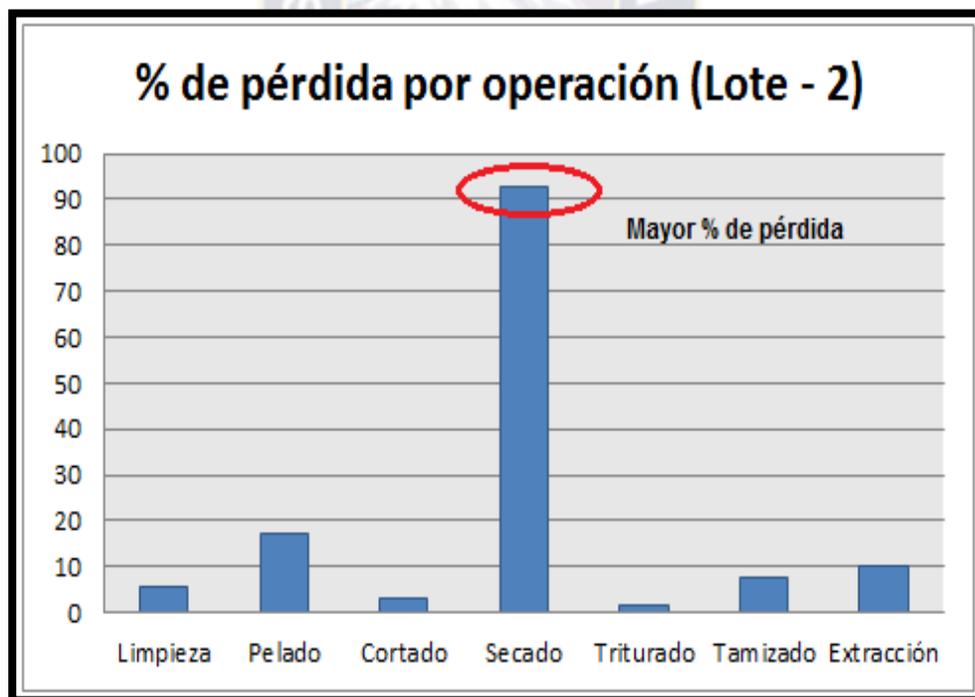


Fuente: Elaboración propia

- Lote N° 2

Gráfica N° 4: Porcentaje de pérdida de peso por operación en el Lote -2

Operación	Pérdida por Operación (%)
Limpieza	5.73
Pelado	17.1
Cortado	3.1
Secado	92.5
Triturado	1.5
Tamizado	7.5
Extracción	10.1



Fuente: Elaboración propia

- Lote N° 3

Gráfica N° 5: Porcentaje de pérdida por operación en el Lote -3

Operación	Pérdida por Operación (%)
Limpieza	4.65
Pelado	17.8
Cortado	2.1
Secado	93.5
Triturado	1.05
Tamizado	5.9
Extracción	9.8



Fuente: Elaboración propia

- Como se puede apreciar en las anteriores gráficas para cada lote, la operación en la que se pierde más porcentaje de masa es la operación de **secado**, ya

que en esta operación se registra una pérdida promedio del 93 %. Esto se debe simplemente a la gran cantidad de humedad que existe en la penca de tuna, siendo así imposible reducir este porcentaje de pérdida.

- Después de realizadas todas las operaciones, se obtuvo una masa total de **171.98 g** de coagulante de penca de tuna. Evaluando el rendimiento de obtención de cada lote se obtuvo un rendimiento promedio del **4.34 %**. Si bien este rendimiento es bajo, cabe destacar que la dosis necesaria de este coagulante natural es muy pequeña, por tanto se pueden tratar grandes cantidades de agua con una mínima cantidad de coagulante.

4.4 CARACTERIZACION DEL COAGULANTE OBTENIDO

4.4.1 Pruebas Físicas

Se evaluaron las pruebas siguientes dando como resultado los valores detallados en la siguiente tabla:

Tabla N° 45: Pruebas físicas

Parámetro	Valor	Método
pH	6.19	Potenciométrico
Estado físico	Sólido	Visual
Color	Blanco – marfil	Visual
Olor	Característico	Simple inspección
Diámetro de partícula	0.6 mm	

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Pruebas de solubilidad

Se utilizaron para esta prueba tres solventes característicos:

Tabla N° 46: Pruebas de solubilidad

Disolvente	Solubilidad
Agua	Soluble
Etanol	Poco soluble
Agua y etanol	Poco soluble
Acetato de etilo	Insoluble

Fuente: Elaboración propia

4.5 RECOLECCION DE MUESTRAS DE AGUA

En la localidad de Achocalla existen varias vertientes localizadas a lo largo de la población, los puntos de muestreo que se tomó para la aplicación de coagulante fueron escogidos debido a que en estas dos vertientes se presentaban visiblemente alta turbiedad y color.

Fotografía N° 30: Residuos del tamizado



Fuente: Elaboración propia

4.6 APLICACION DE COAGULANTE

4.6.1 Recomendaciones generales del proceso

- Una de las recomendaciones más importantes que debe ser tomada en cuenta es que la solución de coagulante de tuna al 1% no debe ser usada por más de 24 horas, ya que se pudo evidenciar que con el pasar del tiempo, la solución de coagulante de penca de tuna va disminuyendo la efectividad de remoción.
- Otra parte muy importante es que la dosis de coagulante debe ser agregada al mismo tiempo a todas las jarras ya que así se tendrá uniformidad en el tiempo de tratamiento.
- El control de los tiempos establecidos es muy importante ya que si excedemos o reducimos el tiempo de tratamiento de alguna de nuestras etapas, los resultados no serán los mismos.

Fotografía N° 31: extracción de agua posterior al tratamiento



Fuente: Elaboración propia

4.6.2 Ensayos de jarras para la determinación de la dosis óptima de coagulante de penca de tuna

Como sabemos se determinó la dosis óptima para la naturaleza de nuestras muestras, realizando variaciones graduadas de dosis de coagulante, hasta encontrar el punto exacto de equilibrio.

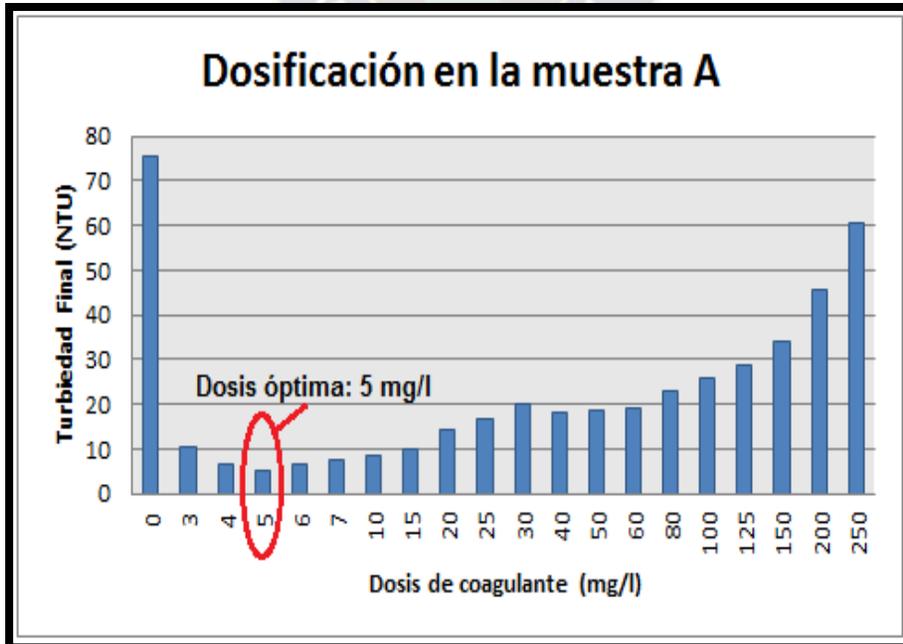
- Comparación general de la dosificación de coagulante de penca de tuna en la muestra A:

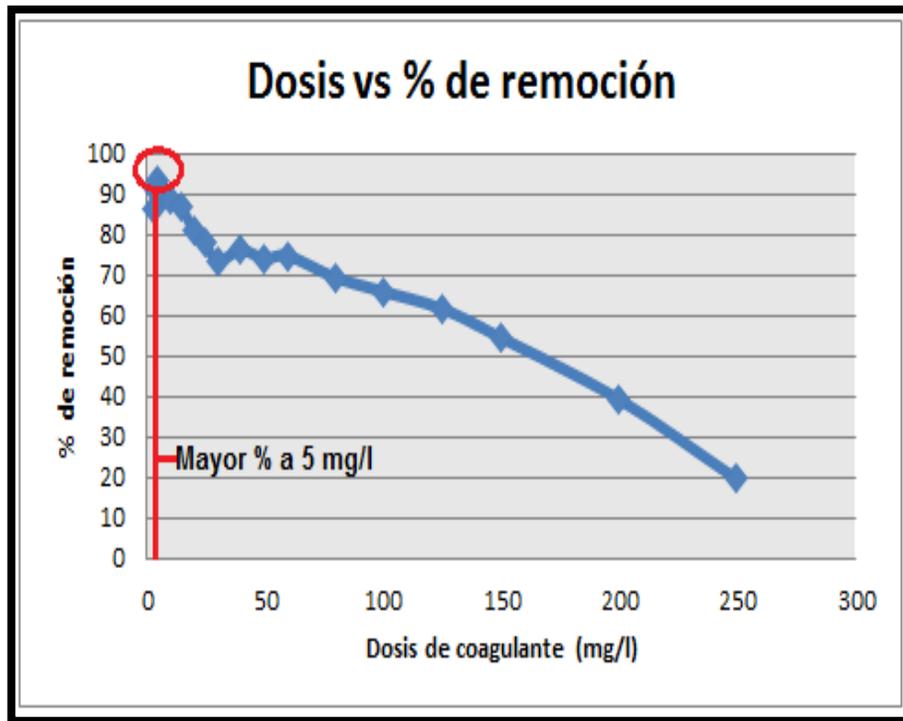
Tabla N° 47: Comparación general de dosificación (Muestra A)

Dosis (mg/l)	Turb _F (NTU)	Dosis (mg/l)	Turb _F (NTU)
0	75,5	7	7,54
3	10,51	10	8,41
4	6,89	15	10,1
5	5,17	20	14,5
6	6,87	25	16,6
Dosis (mg/l)	Turb _F (NTU)	Dosis (mg/l)	Turb _F (NTU)
30	20,1	100	25,7
40	18	125	28,9
50	18,9	150	34,3
60	19,1	200	45,8
80	23,1	250	60,7

Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 6: Dosificación de la muestra A – Dosificación Vs % de remoción





Fuente: Elaboración propia

- Comparación general de la dosificación de coagulante de penca de tuna en la muestra B:

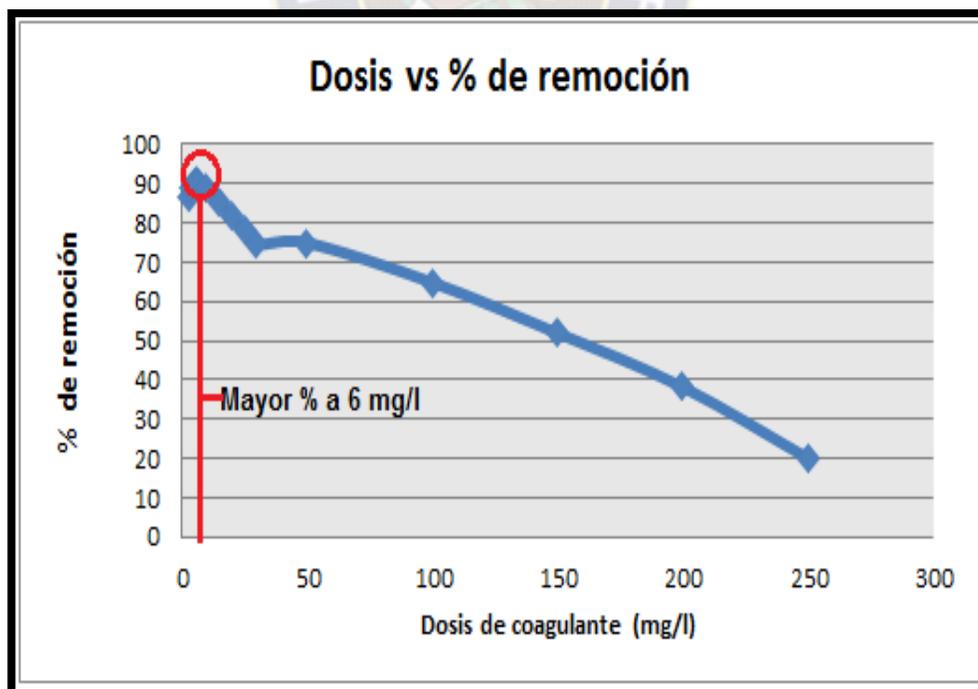
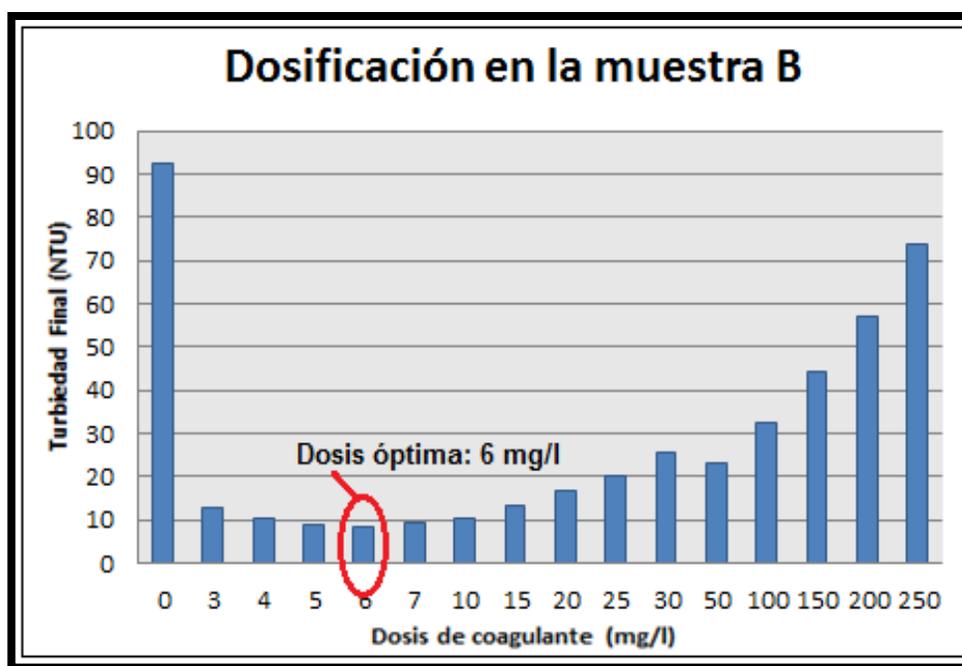
Tabla N° 48: Comparación general de dosificación (Muestra B)

Dosis (mg/l)	Turb _F (NTU)	Dosis (mg/l)	Turb _F (NTU)
0	92,5	6	8,46
3	12,69	7	9,34
4	10,44	10	10,3
5	8,95	15	13,56

Dosis (mg/l)	Turb _F (NTU)	Dosis (mg/l)	Turb _F (NTU)
20	16,74	100	32,49
25	20,37	150	44,43
30	25,53	200	57,13
50	23,17	250	73,9

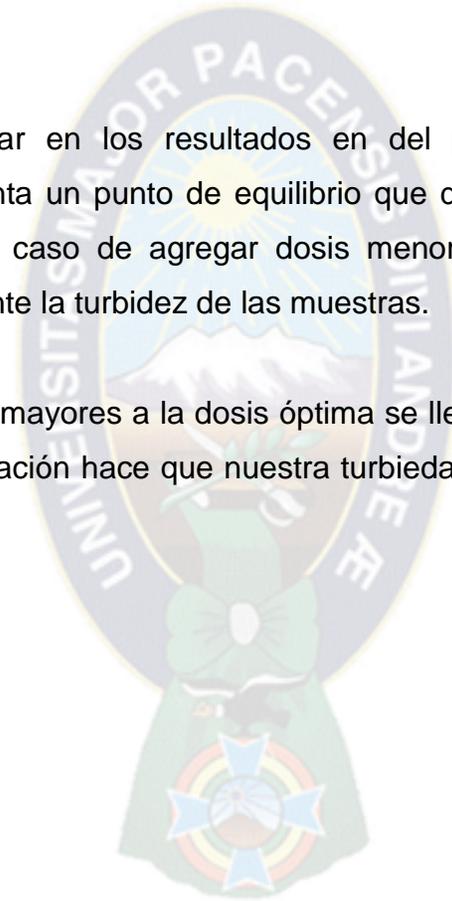
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 7: Dosificación de la muestra B – Dosificación Vs % de remoción



Fuente: Elaboración propia

- Habiéndose concluido con las pruebas se pudo llegar a la dosis óptima de coagulante de penca de tuna para ambas muestras de agua. Evaluando para cada muestra un parámetro muy importante que es la turbiedad final y el porcentaje de remoción de turbiedad.
- Los valores encontrados se caracterizan porque con estas dosis se alcanza el mayor porcentaje de remoción de turbiedad y el número más alto en la escala de Willcomb.
- Como se pudo notar en los resultados en del proceso de coagulación-floculación se presenta un punto de equilibrio que determina la dosis óptima. Viéndose que en el caso de agregar dosis menores a esta no se llega a remover eficientemente la turbidez de las muestras.
- Tratándose de dosis mayores a la dosis óptima se llega a una saturación de la solución y esta saturación hace que nuestra turbiedad se haga notable incluso visiblemente.



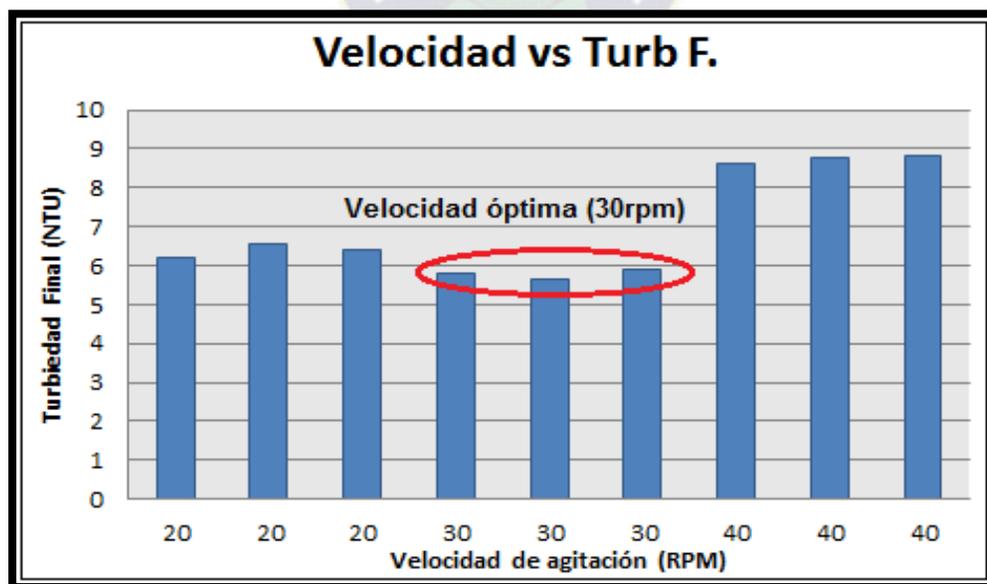
4.6.3 Ensayos de jarras para la determinación de la velocidad óptima de agitación lenta

Una vez determinadas las dosis óptimas se trabajó en la determinación de la variación de velocidad de agitación.

- Código de muestra: A

Gráfica N° 8: Velocidad vs Turbiedad (final) – Muestra A

Vel.(rpm)	Turb _F (NTU)
20	6,18
20	6,54
20	6,42
30	5,78
30	5,63
30	5,89
40	8,64
40	8,78
40	8,84

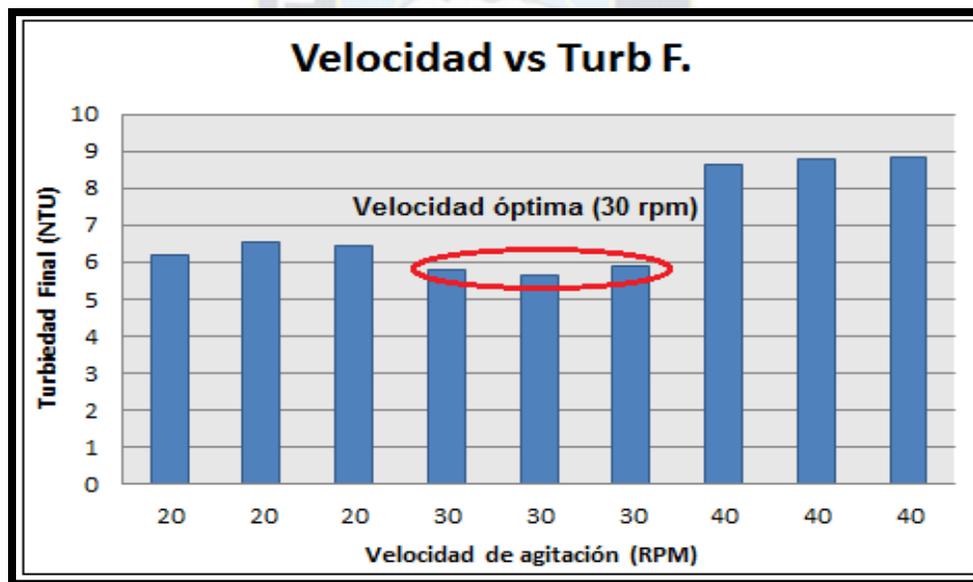


Fuente: Elaboración propia

- Código de muestra: B

Gráfica N° 9: Velocidad vs Turbiedad (final) – Muestra B

Vel.(rpm)	Turb _F (NTU)
20	9,18
20	9,35
20	9,23
30	8,54
30	8,32
30	8,59
40	10,54
40	11,30
40	10,47



Fuente: Elaboración propia

- Como se puede ver en los resultados obtenidos y las gráficas, la velocidad óptima de agitación lenta (etapa de floculación) determinada para ambas muestras fue de 30 rpm. Se eligió esta debido a que evidentemente se presenta una mayor remoción de la turbiedad en las muestras de agua.

- Se vio que cuando se empleó una velocidad de 20 rpm los flócs no lograban unirse, debido a que la velocidad lenta no ayudaba al acercamiento de las partículas flotantes.
- Por otra parte cuando se trabajó con la velocidad de 40 rpm, las partículas evidentemente tenían mayor facilidad de contacto entre si y se formaron los flócs de buen tamaño, pero, a medida que pasó el tiempo estos flócs se fueron rompiendo al ser cortados con la paleta, lo cual generó flócs de menor tamaño y peso que no pudieron sedimentar de manera óptima.
- En conclusión para procesos de coagulación-floculación se debe encontrar una velocidad intermedia que facilite el choque de las partículas, pero teniendo cuidado de no romperlas.

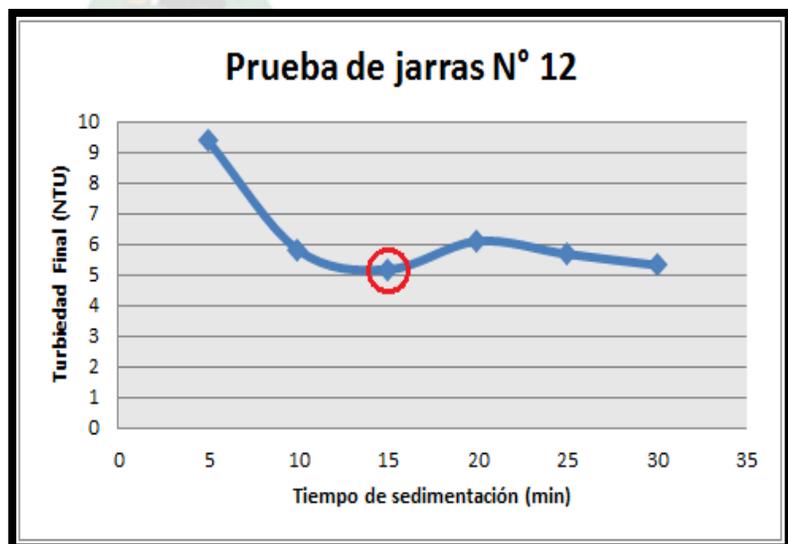
4.6.4 Ensayos de jarras para la determinación del tiempo de sedimentación óptimo

Para esta prueba se variaron los tiempos de sedimentación en cada jarra, en un rango de 5 a 30 minutos, con intervalos de 5 minutos

- **Código de muestra: A**

Gráfica N° 10: Prueba de jarras N° 12

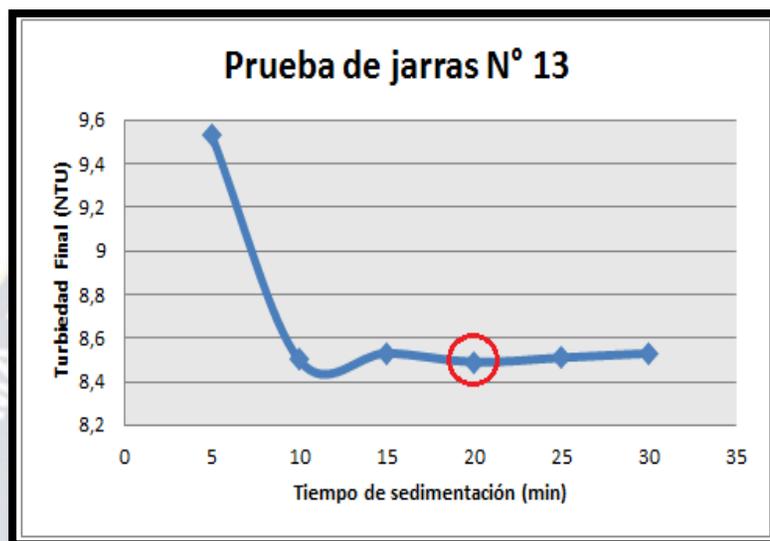
Tiempo sed. (min)	Turb _F (NTU)
5	9,38
10	5,82
15	5,17
20	6,10
25	5,68
30	5,32



- Código de muestra: B

Gráfica N° 11: Prueba de jarras N° 12

Tiempo sed. (min)	Turb _F (NTU)
5	9,53
10	8,50
15	8,53
20	8,49
25	8,54
30	8,56



4.6.5 Parámetros óptimos finales de tratamiento

En la tabla N° 4.6 se presenta el resumen de los parámetros óptimos hallados para la naturaleza de nuestras muestras de agua.

Tabla N° 49: Resumen de parámetros finales óptimos

Parámetros finales óptimos para el tratamiento					
Turb _o (NTU)	Dosis	Velocidad de agitación (rpm)	Tiempo de Sedimentación (min)	Turb _F (NTU)	% Rem Turb
Código de Muestra: A					
75.5	5 mg/l	30 rpm	15 min	5.17	93.15
Código de Muestra: B					
92.5	6 mg/l	30 rpm	20 min	8.49	90.82

Fuente: Elaboración propia

- Los resultados finales nos demuestran que para una muestra de mayor turbiedad inicial se necesita una mayor dosis de coagulante de penca de tuna.
- Así también, el porcentaje de remoción varía entre ambas muestras y se presenta un porcentaje de remoción más bajo para la muestra más turbia.
- La velocidad de agitación para ambas muestras es la misma, 30 rpm.

4.6.6 Comparación de efectividad entre el Coagulante de Penca de Tuna (*Opuntia Ficus Indica*) y el coagulante Sulfato de Aluminio

Una vez hallados los parámetros óptimos de tratamiento para el coagulante de penca de tuna (*Opuntia Ficus Indica*), se realizó el tratamiento de las mismas muestras de agua empleando como coagulante el sulfato de aluminio, esto con el objetivo de realizar una comparación de efectividad entre ambos coagulantes.

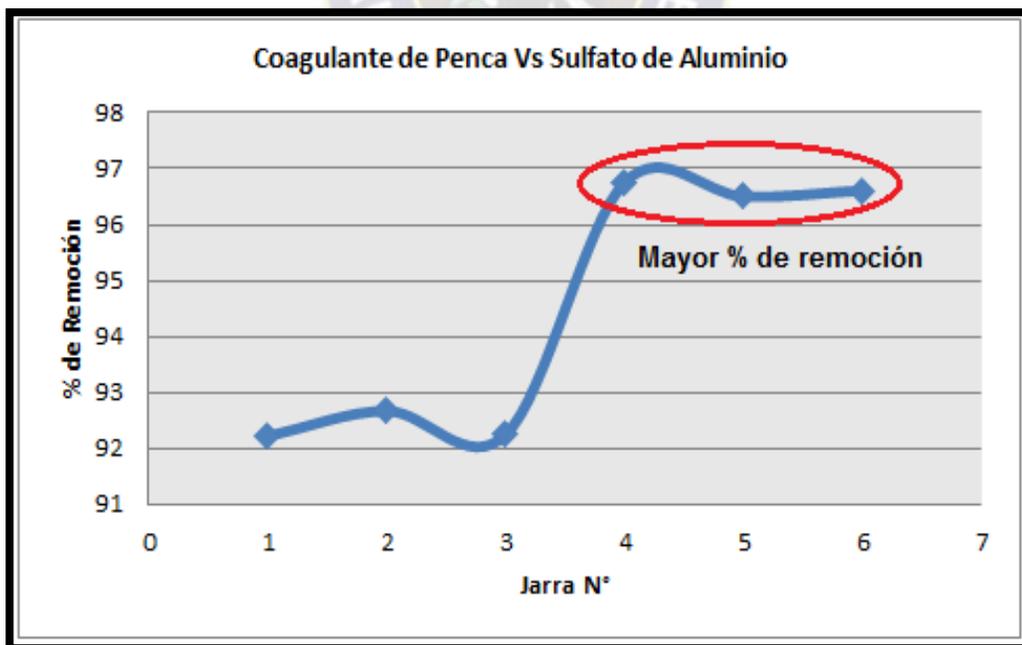
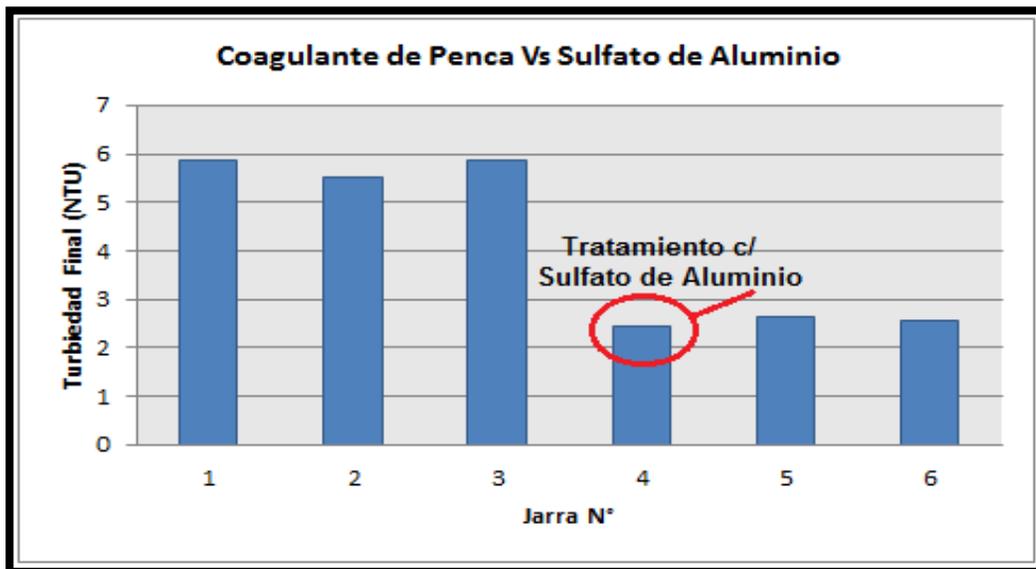
Para esto cabe resaltar que se emplearon los mismos parámetros hallados para el coagulante de penca de tuna.

Código de muestra: A

Tabla N° 50: Penca de tuna Vs Sulfato de Aluminio (Muestra A)

A	Dosis (mg/l)	Vel. / agit. (rpm)	Turb _o (NTU)	pH _o	pH _F	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Índice de Willcomb
Penca de tuna	5	30	75.5	7.11	7,15	5,87	92.22	8
					7,14	5,53	92.67	10
					7,13	5,85	92.25	8
Sulfato de Aluminio	5	30	75.5	7,11	6,35	2,44	96.76	10
					6,27	2,64	96.50	10
					6,31	2,56	96.61	10

Gráfica N°12: Turbiedad (final) obtenida con el Coagulante de Penca de Tuna vs. turbiedad (final) obtenida con el Sulfato de Aluminio – Muestra A



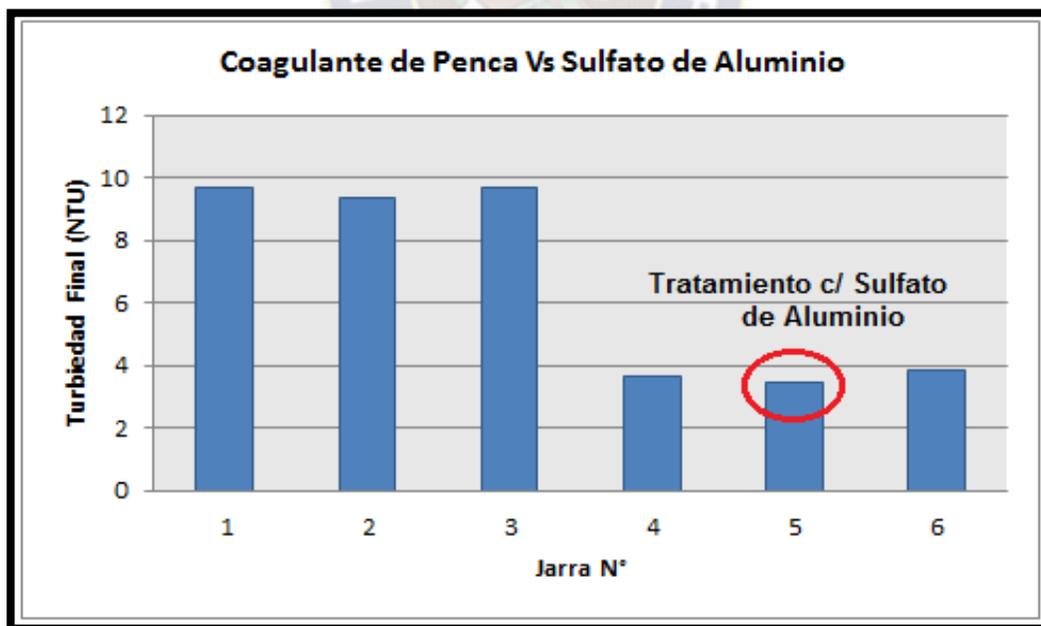
Fuente: Elaboración propia

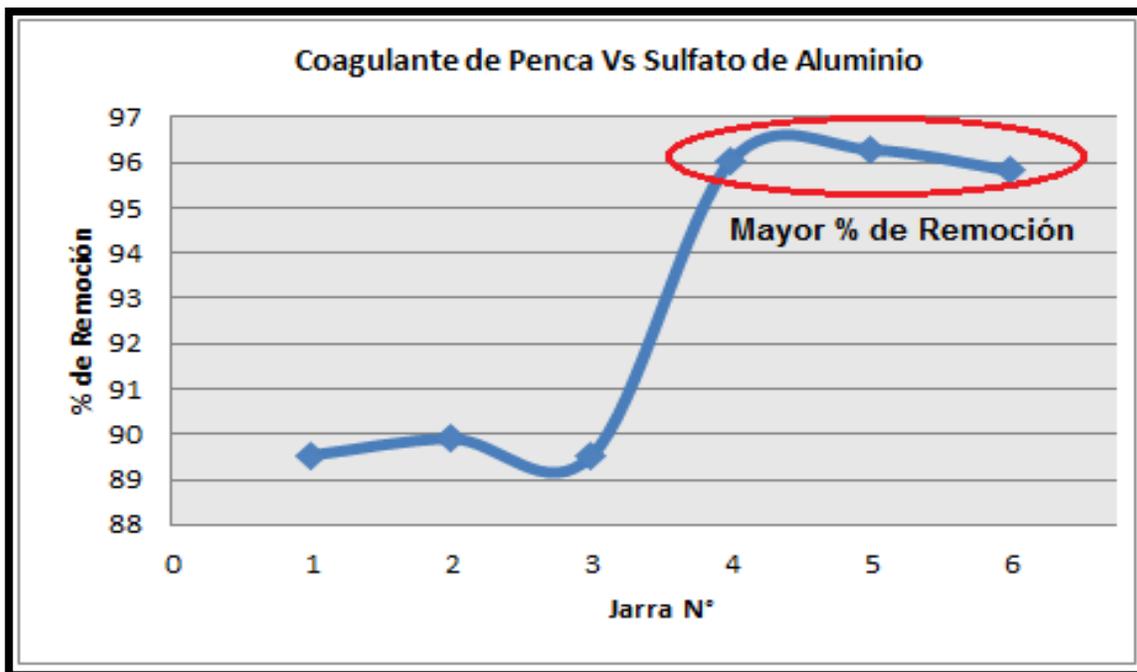
Código de muestra: B

Tabla N° 51: Penca de tuna Vs Sulfato de Aluminio (Muestra B)

B	Dosis (mg/l)	Vel. / agit. (rpm)	Turb ₀ (NTU)	pH ₀	pH _f	Turb _F (NTU)	% Rem Turb	Índice de Willcomb
Penca de tuna	6	30	92.5	7.16	7,15	9.67	89.54	8
					7,18	9.34	89.90	10
					7,16	9.68	89.53	8
Sulfato de Aluminio	6	30	92.5	7,16	6,34	3.65	96.05	10
					6,29	3.44	96.28	10
					6,32	3.87	95.82	8

Gráfica N°13: Turbiedad (final) obtenida con el Coagulante de Penca de Tuna Vs. turbiedad (final) obtenida con el Sulfato de Aluminio – Muestra B





Fuente: Elaboración propia

- Como se puede ver en los gráficos y datos anteriores queda comprobado que el Sulfato de Aluminio es mejor coagulante que el Coagulante de Penca de Tuna, debido a que presenta un mayor porcentaje de remoción de turbiedad.
- Un punto importante es que para las jarras en las que se usó el Sulfato de Aluminio la formación de flócs fue más efectiva y es por esto que el índice de Willcomb se presenta con los valores más altos de su escala en las muestras de agua tratada.
- Como se puede apreciar en las tablas 38 y 39 el % de remoción disminuye cuando a turbiedad es más alta, es por esto que en la muestra B, el índice de Willcomb en una de las jarras no llego a 10.
- También se pudo observar que el pH de las muestras tratadas con Sulfato bajaba notablemente a diferencia de las muestras tratadas con coagulante de

penca de tuna y este es un punto que se debe controlar ya que el rango de pH en aguas de consumo tiene un intervalo de permisibilidad de 6.5 a 9.

4.7 ANALISIS DE PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA PREVIO Y POSTERIOR AL TRATAMIENTO CON PENCA DE TUNA

4.7.1 Parámetros organolépticos

Tabla N° 52: Resultados de parámetros organolépticos analizados

Parámetro	Muestra	Antes	Posterior	Valor máximo aceptable
Aspecto físico	A	Turbio	Casi transparente	Trasparente
	B	Turbio	Casi transparente	
Olor	A	Ninguno	Ninguno	Ninguno
	B	Ninguno	Ninguno	
Color	A	15	10	15 UCV
	B	20	11.5	

Fuente: Elaboración propia

- Como se ve en los resultados se comprobó que el agua tratada no presenta olor extraño posterior al tratamiento.
- Así mismo se puede verificar que el aspecto físico varía notablemente de turbio a transparente, lo que hace el agua sea aceptable a simple vista.
- En cuanto al color, este disminuye en menor proporción.

4.7.2 Parámetros fisicoquímicos

Tabla N° 53: Resultados de parámetros fisicoquímicos analizados

Parámetro	Muestra	Antes	Posterior	Valor máximo aceptable
Temperatura	A	14.3	14.4	Aceptable
	B	14.5	14.6	
pH	A	7.11	7.16	6.5 - 9.0
	B	7.16	7.18	
Turbiedad	A	75.5	5.17	5 UNT
	B	92.5	8.49	

Fuente: Elaboración propia

- Uno de los puntos más destacables es que el pH no varía de manera considerable y además se encuentra dentro del rango de aceptabilidad propuesto por la NB 512 (Agua potable - Requisitos).
- En cuanto a la turbiedad que es lo que más se evaluó en este proyecto, en ambas muestras se demuestra la remoción notable de turbiedad. En la muestra A se llega a reducir hasta un punto de 5,17 NTU, es decir que se removi6 la turbidez en un 93.15%.
- Para la muestra B la remoci6n fue menor y se lleg6 a una turbiedad final de 8.49 NTU, es decir se logr6 una remoci6n del 90.82 %.
- Como se puede ver comparando con los datos de la norma 512, los valores de turbiedad finales que hallamos est6n un poco por encima del rango de valores m6ximos permisibles, pero cabe rescatar que la coagulaci6n - floculaci6n es solo una parte del tratamiento que se le debe a hacer al agua para su

consumo. Como por ejemplo el proceso de filtración, podría ayudar a disminuir los valores de turbiedad de nuestras muestras.

4.7.3 Parámetros químicos

Luego de los análisis se detallan los resultados en la siguiente tabla:

Tabla N° 54: Resultados de parámetros químicos analizados

Parámetro	Muestra	Antes del tratamiento	Final c/ penca	Final c/ Al ₂ (SO ₄) ₃	Valor máximo aceptable
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	A	69.6	64.8	62.4	370,0
	B	74.4	67.2	57.6	
Acidez (mg/l CaCO ₃)	A	13.2	15.4	8.8	
	B	11	13.2	8.8	
Dureza (mg/l CaCO ₃)	A	130	137.8	101.4	500,0
	B	161.2	166.4	137.8	
Calcio (mg/l Ca ²⁺)	A	39.52	36.4	30.16	200,0
	B	47.84	40.56	37.44	
Magnesio (mg/l Mg ²⁺)	A	7.58	13.26	6.31	150,0
	B	10.11	15.8	10.74	
Cloruros (mg/l Cl ⁻)	A	25	24	26	250,0
	B	30.1	28.5	30.5	
Sulfatos (mg/l SO ₄ ⁻²)	A	24.63	24.11	31.13	400,0
	B	28.54	27.8	35.7	
Hierro	A	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0,3
Manganeso	A	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0,1
Sodio	A	20.5	17.5	17	200,0
Potasio	A	2.76	3.24	2.93	

Fuente: Elaboración propia

- En cuanto a los parámetros químicos analizados y comparándolos con los valores máximos aceptables de la NB 512, se ve que inicialmente los valores de nuestras muestras están dentro de los valores máximos permisibles.

- Evaluando los parámetros analizados después del tratamiento con el Coagulante de Penca de Tuna existe una ligera disminución en los parámetros como la alcalinidad, calcio, cloruros, sulfatos, sodio, potasio. En cuanto al hierro y al manganeso la variación de los resultados en la muestra es innotable.
- Si bien en algunos parámetros se muestra una mejor variación de los resultados con la aplicación de Sulfato de Aluminio, como por ejemplo de la dureza, acidez, magnesio, se debe destacar que el Sulfato de Aluminio es un coagulante químico, que si bien reduce algunos parámetros también aumenta otros como los cloruros, sulfatos y nitratos.
- Además el Coagulante de Penca de Tuna es un coagulante de origen natural que como se pudo ver en los resultados, ayuda más que todo a la remoción de turbiedad y color de aguas. Presentando rangos de remoción superiores a 89%.

4.7.4 Parámetros microbiológicos

Tabla N° 55: Resultados de parámetros microbiológicos analizados

Parámetro	Muestra	Antes	Posterior
Coliformes totales	A	5.2 x 10 ⁵	2.1 x 10 ⁴

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en los resultados la remoción de coliformes totales no es muy significativa, quedando aun carga microbiana significativa.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.3. CONCLUSIONES

- Mediante análisis de la penca de tuna se halló que estas contienen un alto porcentaje de humedad del **92%**, un pH ácido de **4.38** y un coeficiente de difusividad a través del sólido de **$5.24 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h}$** , esta información es corroborada con datos reportados en bibliografía, por tanto, se puede concluir que la especie utilizada como materia prima corresponde al género *Opuntia ficus indica*.
- La obtención del coagulante en polvo a partir de la **penca de tuna** se logró de manera satisfactoria mediante el empleo de operaciones unitarias como ser: secado, triturado, tamizado y extracción de pigmentos, las cuales no representaron mayor complejidad en su procedimiento.
- El rendimiento global del proceso de obtención del **coagulante de penca de tuna** fue del **4.34 %**, el cual es bajo a causa de la alta cantidad de agua presente en la planta, encontrándose una humedad del **92%**. Sin embargo, cabe destacar que luego de las pruebas de dosificación resulta que se necesitan pequeñas cantidades de coagulante de penca de tuna para el tratamiento de aguas naturales con contenido de turbiedad.
- Mediante las pruebas de jarra se determinaron los parámetros óptimos del tratamiento para la aplicación del coagulante de **penca de tuna**, que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 56: Parámetros óptimos finales de tratamiento

Parámetros finales óptimos para el tratamiento					
Turb_o (NTU)	Dosis	Velocidad de agitación (rpm)	Tiempo de Sedimentación (min)	Turb_F (NTU)	% Rem Turb
Código de Muestra: A					
75.5	5 mg/l	30 rpm	15 min	5.17	93.15
Código de Muestra: B					
92.5	6 mg/l	30 rpm	20 min	8.49	90.82

Fuente: Elaboración propia

- Por otro lado, se determinó que el coagulante extraído de *Opuntia Ficus Indica* presenta una alta actividad como coagulante debido a su capacidad para remover la turbidez inicial de aguas naturales con turbiedad intermedia, presentando un porcentaje de remoción promedio del **93.15 % a 90.82 %** para las muestras A y B respectivamente. También se logró establecer que el material no altera significativamente el pH del agua tratada, encontrándose dentro de los límites de la NB 512 en cuanto a este parámetro (6.5 - 9.0).
 - Con la aplicación del Sulfato de Aluminio en muestras de agua natural, bajo las mismas condiciones, se logró determinar que el Sulfato de Aluminio presenta un mayor porcentaje de remoción de turbiedad con un promedio del **96.62 % y 96.05%** para las muestras A y B respectivamente. En cuanto al pH, este parámetro sufre una disminución representativa ya que se encuentran por debajo de los límites de la NB 512 en cuanto a este parámetro, presentándose un promedio de **6.31** en las muestras tratadas con Sulfato de Aluminio.
- De los resultados hallados con los dos coagulantes se concluye que el coagulante de Penca de tuna con respecto al Sulfato de Aluminio tiene un

comportamiento eficiente en cuanto a la disminución de la turbiedad que era el objetivo perseguido en este trabajo.

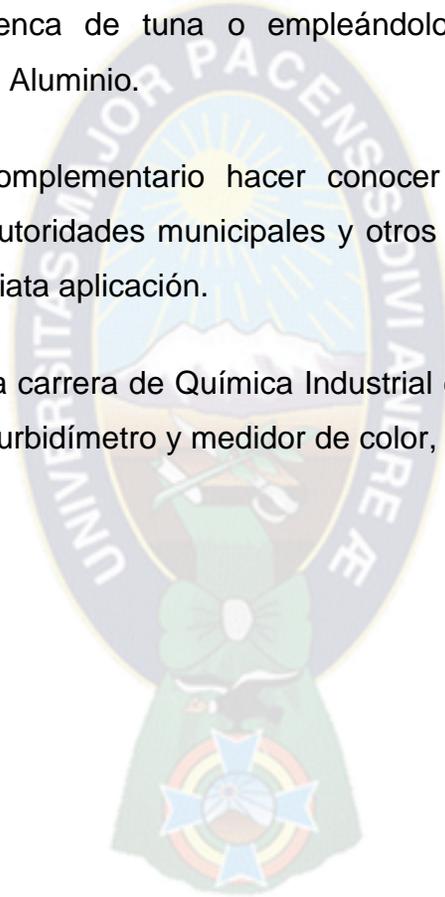
- En cuanto a los valores de turbiedad finales después del tratamiento con coagulante de penca de tuna **5.75 NTU** y **9.56 NTU** respectivamente para las muestras A y B, se observa que estos se encuentran un poco por encima de la NB 512 (5 NTU), sin embargo, esta situación se puede mejorar con la adición de un proceso de filtración.
- Habiéndose realizado el análisis fisicoquímico de ambas muestras, se pudo evidenciar que no existen cambios significativos en la mayoría de los parámetros químicos. Presentándose reducciones leves en los parámetros: alcalinidad, sulfatos, sodio y potasio.
- Cabe destacar que la penca de tuna como materia prima para la obtención de coagulante se la encuentra fácilmente en las regiones altiplánica y valles lo cual influye grandemente en la reducción de costos de obtención de coagulante.
- En cuanto al análisis microbiológico se ve que no existe una remoción significativa de la carga microbiana, concluyéndose así que el agua tratada no es apta para el consumo humano directo, por tanto, se debe adicionar un proceso de cloración para la eliminación de microorganismos.

5.4. RECOMENDACIONES

- El uso de coagulantes vegetales como complemento de las tecnologías para tratamiento de agua natural, representa una oportunidad de investigación e innovación, pues representa parte del desarrollo de una región, además de contribuir a la sostenibilidad generando nuevos valores agregados para las

materias primas locales. Por lo que se puede apreciar en los resultados obtenidos se recomienda promover el estudio y la realización de proyectos de investigación empleando productos naturales de bajo costo en este caso para la purificación de aguas naturales y/o residuales.

- También se recomienda realizar estudios de aplicación (creación de plantas piloto) para agua superficial o residual con alta turbiedad, utilizando solamente el coagulante de penca de tuna o empleándolo como coadyuvante del coagulante Sulfato de Aluminio.
- Con este estudio complementario hacer conocer al Ministerio del Medio Ambiente y Aguas, autoridades municipales y otros para su difusión de estos beneficios y su inmediata aplicación.
- Se recomienda que la carrera de Química Industrial deba contar con el equipo de prueba de jarras, turbidímetro y medidor de color, equipos básicos para este tipo de estudios.



6. **BIBLIOGRAFÍA**

- F. Kemmer & J. McCallion - "Manual Del Agua. Su Naturaleza, Tratamiento Y Aplicaciones"
- Forno Eduardo - "Environmental Pollution And Social Groups In Bolivia: A Situation Assessment"
- IBNORCA – NB 495 ; Agua potable – Definiciones y terminologíae
- IBNORCA – NB 496 ; Agua potable – Toma de Muestras
- IBNORCA – NB 512 ; Reglamento Nacional Para El Control De La Calidad Del Agua Para Consumo Humano
- Primera Revisión
- Ley Del Medio Ambiente 1333, Del 27 De Abril De 1992.
- Montoya Carolina - Efecto Del Incremento En La Turbiedad Del Agua Cruda Sobre La Eficiencia De Procesos Convencionales De Potabilización
- Organización Mundial De La Salud - Guías Para La Calidad Del Agua Potable
- Ochoa Tejeda, María – Estudio Y Evaluación De Una Alternativa Tecnológica Para La Producción De Un Floculante Natural A Partir De La Penca De La Tuna
- Potabilización De Agua Por Ing. Mynor Romero
- Romero Rojas Jairo Alberto - Calidad Del Agua
- Solíz Rodriguez, José – Utilización De Productos Nativos Para La Clarificación De Aguas Naturales
- Solsona Felipe & Juan Pablo Mendez – Tratamientos Convencionales De Desinfección Del Agua.
- Vazquez Gonzalez, Osvaldo - Extracción De Coagulantes Naturales Del Nopal Y Aplicacion En La Clarificacion De Aguas Superficiales
- Venegas, P. 2010. - Los recursos hídricos y los servicios de agua potable y saneamiento. Aspectos Ambientales