



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Incrementar la remoción de la turbidez de la meladura no
clarificada en el proceso de clarificación, para la cristalización y
posterior obtención del azúcar blanco”**

PROYECTO DE TITULACION

Previo a la obtención del Título de:

MAGISTER EN MEJORAMIENTO DE PROCESOS

Presentada por:

Milton Luis Macías García

GUAYAQUIL-ECUADOR

Año: 2022

AGRADECIMIENTO

A mi director de proyecto, el Ph. D. Marcos Buestan B., a mis amistades y especialmente a mi familia por apoyarme en este siguiente nivel de formación profesional.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi Madre un gran ejemplo de superación que me inspira a cumplir mis objetivos, a mi Esposa, por su constante apoyo y alegría en cada meta alcanzada.

TRIBUNAL DE TITULACION

**Marcos Buestan B., Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO**

**Ma. Fernanda López S. Msc.
VOCAL**

DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Milton Luis Macías García

RESUMEN

El siguiente trabajo consistió en un estudio realizado en un Ingenio Azucarero que mediante la implementación de un DOE (Design of Experiments) se analizó las posibilidades que tenía la planta para incrementar el % remoción turbidez. El diseño de experimentos permite identificar los factores que presentan una mayor influencia en una variable respuesta establecida, en la que mediante los niveles de trabajo de estos factores se puede determinar la configuración que genere el efecto deseado en la variable de respuesta.

En el proceso de clarificación meladura se presentaron factores como la dosificación de ácido fosfórico, dosificación floculante y la temperatura donde influyen en la clarificación de la meladura, sus respectivos niveles de trabajo disponibles teniéndose 54 combinaciones. Para el experimento se realizaron 2 dos réplicas de cada combinación y luego de revisarse que el modelo construido cumplía las condiciones de los residuos, se revisó la calidad del modelo en cuanto a los factores e interacciones que presentaron mayor significancia y el valor R cuadrado siendo este de 70 %, por lo tanto, el modelo elaborado era aceptable para el proyecto.

Se obtuvieron las configuraciones adecuadas de operación con las cuales se realizó una corrida verificadora en donde se obtuvieron resultados satisfactorios con una media de remoción turbidez del 71.9 % en comparación al promedio de remoción obtenida en el año 2021 que fue de 52 %, los niveles con los que deben operar los factores son los siguientes: temperatura de 78 °C; dosificación de ácido fosfórico de 300 ppm y dosificación floculante de 10 ppm en la cual confirmó que existe un incremento en el porcentaje de remoción turbidez en la meladura.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
CAPÍTULO 1.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Problema a resolver.....	2
1.3. Objetivo General.....	3
1.4. Objetivos Específicos.....	3
1.5. Importancia de resolver el problema.....	3
1.6. Resultados esperados.....	4
1.7. Descripción de la metodología.....	4
CAPITULO 2.....	7
2. PREPARACION DEL EXPERIMENTO.....	7
2.1. Elección de factores, niveles y rangos.....	7
2.2. Elección diseño experimental.....	10
2.3. Ejecución del experimento.....	10
2.3.1. Análisis del modelo.....	15
2.3.2. Evaluación del modelo y sus supuestos.....	16
2.3.3. Análisis del experimento sintetizado.....	19
2.3.4. Niveles adecuados de operación.....	21
CAPITULO 3.....	23
3. VERIFICACION RESULTADOS.....	23
3.1. Corrida vericatoria.....	23
3.1.1. Análisis de capacidad antes y después.....	26
3.1.2. Gráficas de control I-MR Antes y Después.....	27
3.2. Beneficios económicos.....	28
CAPITULO 4.....	29
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
4.1. Conclusiones.....	29
4.2. Recomendaciones.....	29
BIBLIOGRAFIA.....	30

ABREVIATURAS

BRIX	Solidos totales disueltos
PPM	Parte por millón
DOE	Desing of Experiments
H0	Hipótesis nula
H1	Hipótesis alterna

SIMBOLOGIA

\$	dólares
%	porcentaje
Kg	Kilogramos
TON	Toneladas
UMA	Unidades Métricas Absolutas

INDICE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Producto no conforme del azúcar blanco por efecto turbidez	1
Figura 1.2 % Remoción Turbidez periodo 2021	2
Figura 1.3 Análisis Capacidad % Remoción Turbidez	2
Figura 1.4 Diferencias calidad de turbidez de azúcar blanco.....	4
Figura 2.1 Dosis floculante sobre remoción turbidez (Rein, 2012)	8
Figura 2.2 Efecto Temperatura sobre Remoción Turbidez (Rein, 2012)	9
Figura 2.3 Desarrollo de orden aleatorio MINITAB	10
Figura 2.4 Diagrama Pareto.....	15
Figura 2.5 Análisis de Varianza	16
Figura 2.6 Resumen del modelo	16
Figura 2.7 Informe resumen RESI1	17
Figura 2.8 Grafica residuo vs ajuste	18
Figura 2.9 Graficas de corridas de RESI	18
Figura 2.10 ANOVA de factores del modelo sintetizado	19
Figura 2.11 Diagrama de Pareto de factores del modelo sintetizado	20
Figura 2.12 grafica factorial del experimento.....	21
Figura 3.1 Prueba normalidad.....	24
Figura 3.2 Blox Plot	25
Figura 3.3 Comparación capacidades Antes y Después.....	26
Figura 3.4 graficas control I-MR Antes y Después	27

INDICE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Factores, niveles y rangos a experimentar.....	9
Tabla 2 Formato registro porcentaje remoción turbidez.....	11
Tabla 3 dosificaciones ácido fosfórico en función del flujo meladura	12
Tabla 4 dosificación floculante en función del flujo meladura	12
Tabla 5 datos porcentaje remoción turbidez, primera corrida.....	13
Tabla 6 datos % remoción turbidez, segunda corrida.....	14
Tabla 7 idóneas con mayor % remoción turbidez	22
Tabla 8 Datos de remoción turbidez corrida verifictoria	23
Tabla 9 Prueba de hipótesis corrida verifictoria	24
Tabla 10 Detalles de los costos por reproceso.....	28
Tabla 11 Beneficio económico anual	28

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

El Ingenio Azucarero donde se desarrolla el proyecto está ubicado en el cantón Cnel. Marcelino Maridueña en la provincia del Guayas, Ecuador. El principal negocio de la empresa es la venta de azúcar blanca, azúcar morena, azúcar impalpable, miel final (melaza) y energía eléctrica. Actualmente cuenta con 412 empleados en el área de Fabrica. La empresa a partir del 2002 incremento su capacidad para el procesamiento de caña de 10000 ton/día a 15000 ton/día y de la misma forma es acompañada de la automatización en el proceso Elaboración de azúcar en cual se subdivide en: recepción jugo, pre-encalado, sulfitado, encalado, clarificación jugo, precalentamiento, pre-evaporación, evaporación, clarificación meladura, cristalización, centrifuga y secado.

Dos de las etapas sin ser suficientes son esencialmente claves para producir azúcar blanco especial de calidad para el agrado del mercado, estas etapas son la clarificación de jugo y posterior la clarificación de meladura, donde el principal objetivo es remover la mayor cantidad de impurezas, de no ser removidas provocan problemas de operación en la velocidad de cristalización, purga en las centrifugas, alterando la turbidez del producto final, traduciéndose esto a baja calidad en el azúcar blanco , ver figura 1.1 Producto no conforme del azúcar blanco por efecto turbidez .

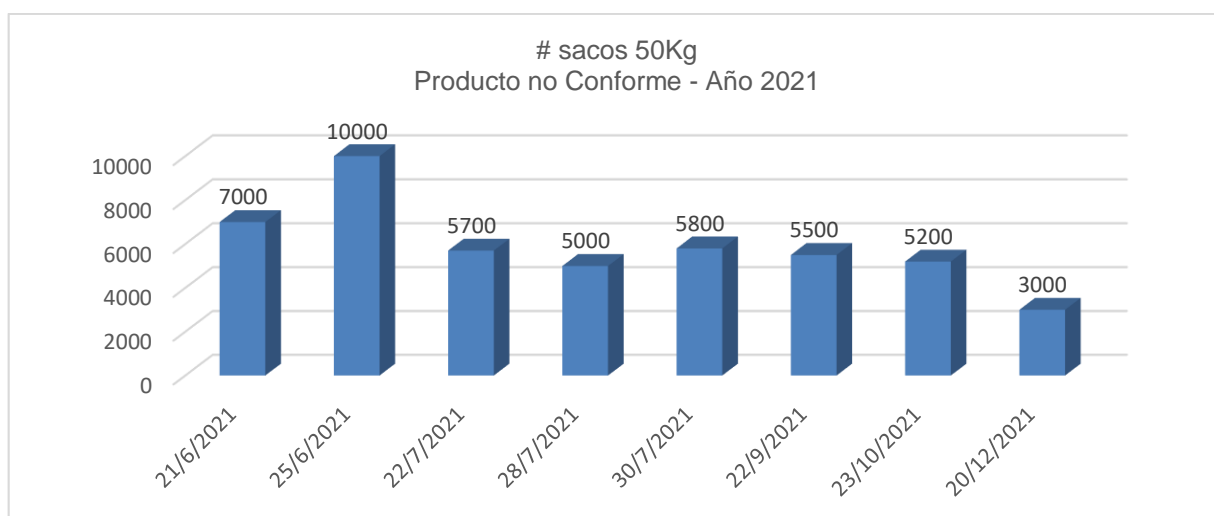


Figura 1.1 Producto no conforme del azúcar blanco por efecto turbidez

Fuente: Autor

1.2. Problema a resolver

Baja remoción de turbidez en el proceso de clarificación de meladura desde junio a diciembre del año 2021 (Zafra 2021) en un 52 % promedio en base a los datos históricos y a la gráfica de serie en donde se muestra inestabilidad en el proceso.

Se adjunta los porcentajes de remoción de turbidez en la meladura en el periodo 2021, ver figura 1.2

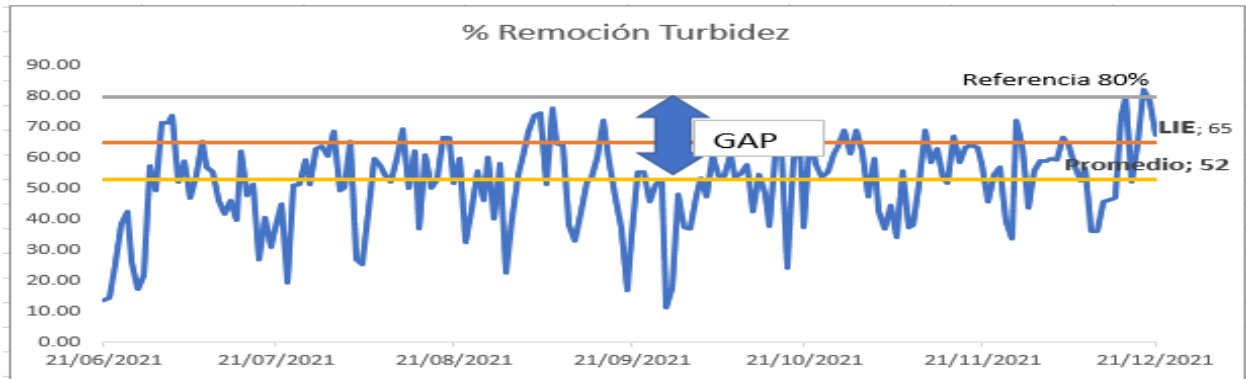


Figura 1.2 % Remoción Turbidez periodo 2021

Fuente: Autor

Adicional se adjunta un análisis de capacidad en donde se puede comprobar que el proceso no es capaz.

Nota: El 85 % de los datos se encuentran fuera de especificación y con un Cpk -0.44 (ver figura 1.3)

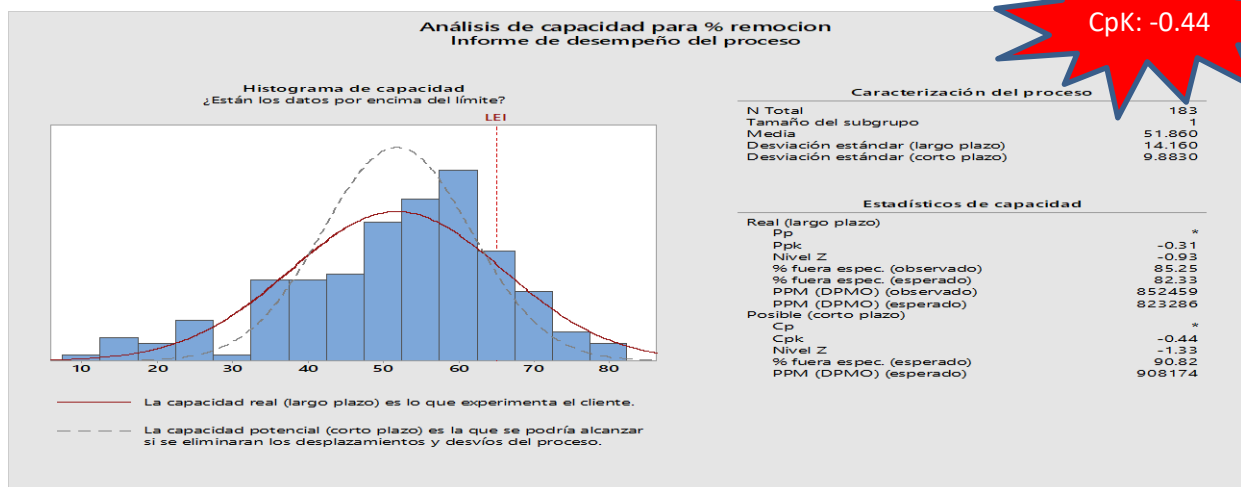


Figura 1.3 Análisis Capacidad % Remoción Turbidez

Fuente: Autor

1.3. Objetivo General

Incrementar en un 50 % la remoción de turbidez de la meladura no clarificada en el proceso clarificación aplicando diseño experimental.

1.4. Objetivos Específicos

- Evaluar la situación actual del proceso con respecto al porcentaje de remoción de turbidez
- Diseñar experimento que permita identificar los factores coagulantes y floculantes en el proceso de clarificación de meladura cruda a escala industrial que influya en la remoción de turbidez
- Restablecer condiciones básicas del proceso de clarificación de meladura
- Determinar la incidencia de los factores y su respectiva interacción sobre la variable turbidez
- Determinar las dosificaciones y temperaturas más adecuadas para obtener la mejor remoción de turbidez en la meladura no clarificada
- Evaluar estadísticamente los nuevos niveles operacionales con respecto al nivel de remoción de turbidez en la meladura no clarificada

1.5. Importancia de resolver el problema

Esta etapa de remoción turbidez en la meladura es clave en la producción de azúcar blanco de calidad para el agrado de los clientes de bebidas, donde el principal objetivo es remover la mayor cantidad de impurezas en la meladura no clarificada, de no ser removidas los sólidos suspendidos generan opacidad en la meladura y dando como resultado un azúcar blanco con tono oscuro ver figura 1.4. del azúcar blanco con defectos turbidez.

La baja calidad del azúcar blanco se traduce al incumplimiento de la especificación de los clientes principales o mayoritarios del Ingenio azucarero que indica lo siguiente en la especificación de Turbidez:

Azúcar Blanca especial, Dentro especificación < 100 U.M.A

Azúcar Blanca especial, Fuera especificación > 100 U.M.A

Azúcar Blanco con defectos turbidez

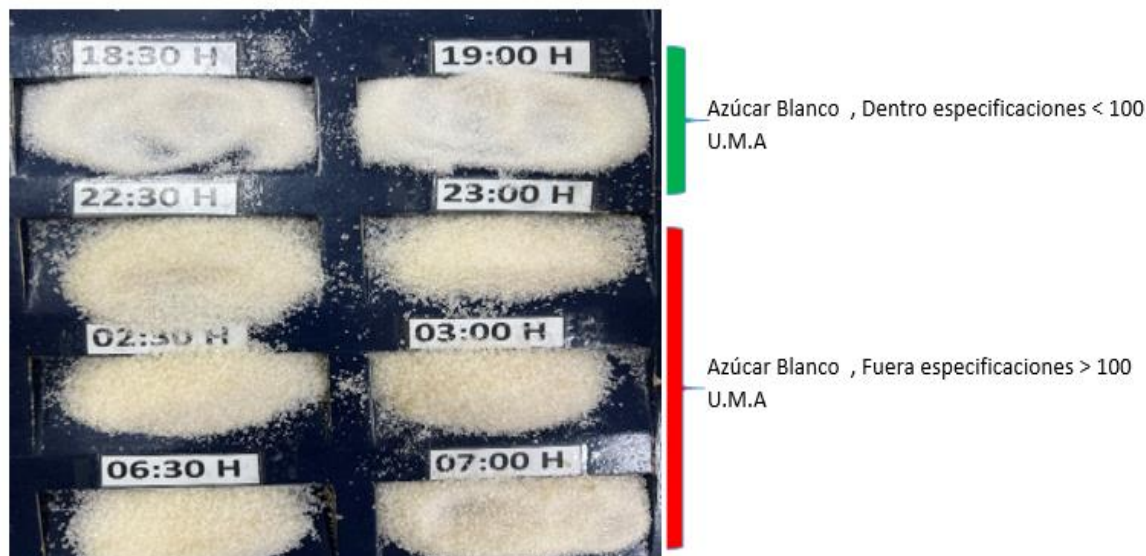


Figura 1.4 Diferencias calidad de turbidez de azúcar blanco

Fuente: Autor

1.6. Resultados esperados

Incrementar la remoción de turbidez en un 50 % entre el promedio y la referencia, del 52 % al 66% hasta diciembre 2022 en la clarificación de la meladura no clarificada.

1.7. Descripción de la metodología

Diseño experimental DOE es una técnica que consiste en determinar un modelo que presente una **variable de respuesta** de un proceso en la cual intervienen varios factores, los cuales poseen una fuerte relación con el resultado buscado en el proceso. Este método es más eficaz que los experimentos basados en ensayo y error que mediante la intuición determinan mejoras en una operación, el diseño de experimentos mediante el análisis de los datos permite detectar que parámetros de trabajo generan un mayor impacto en la variable a mejorar.

Los factores son variables del proceso los cuales pueden ser controlables y no controlables, en el caso de los **factores controlables** son los que generalmente pueden ajustarse durante la operación del proceso, estos poseen **niveles** de operación los cuales permiten experimentar con estos para determinar las mejores alternativas disponibles, existen factores controlables como: velocidad, presión, temperatura, etc. Los **factores no controlables** son aquellos que no pueden modificarse durante el experimento como es el caso de la luz, humedad, calidad de material recibido por el proveedor, etc. Un factor no controlable puede convertirse en controlable siempre y cuando se cuente con la tecnología para realizarlo.

A continuación, se presenta la guía sugerida por (Montgomery, 2004)

- Reconocimiento y planteamiento del problema
- Elección de factores, niveles y rangos
- Selección variable respuesta
- Elección diseño experimental
- Ejecución del experimento
- Análisis estadístico de los datos
- Conclusiones y recomendaciones

Breve explicación de cada punto sugerido por (Montgomery, 2004).

- Identificación y planteamiento del problema.

Este punto podría parecer muy obvio, pero es común que en la práctica no sea sencillo darse cuenta de que existe un problema que requiere experimentación y tampoco es fácil desarrollar una enunciación clara, con la que todos estén de acuerdo, de este problema. Es necesario desarrollar todas las ideas acerca de los objetivos del experimento. Generalmente, es importante solicitar aportaciones de todas las áreas involucradas, ingeniería, aseguramiento calidad, manufactura, mercadotecnia, administración, el cliente y el personal de operación (en la cual por lo general conoce a fondo el personal y al que con demasiada frecuencia se ignora), por esta razón, se recomienda un enfoque de equipo para diseñar experimentos.

- Elección de los factores, los niveles y los rangos.

Cuando se consideran los factores que pueden influir en el desempeño de un proceso o sistema, el experimentador suele describir que estos factores pueden clasificarse como factores potenciales del diseño o bien como factores perturbadores. Los factores potenciales del diseño son aquellos que el experimentador posiblemente quiere hacer variar en el experimento. Es frecuente encontrar que hay muchos factores potenciales del diseño, por lo que es conveniente contar con alguna clasificación adicional de los mismos.

Una vez que el experimentador ha seleccionado los factores del diseño, debe elegir los rangos en los que hará variar estos factores, así como los niveles específicos con los que se realizarán las corridas.

Cuando el objetivo del experimento es el tamizado de los factores o caracterización del proceso, por lo general es mejor mantener reducido el número de niveles de los factores.

- Selección de la variable de respuesta.

Para seleccionar la variable respuesta, el experimento deberá tener la certeza de que esta variable proporciona en realidad información útil acerca del proceso bajo estudio. En la mayoría de los casos, el promedio o la desviación estándar (lo ambos) de la característica medida será la variable de respuesta. No son la excepción las respuestas múltiples. La eficiencia de los instrumentos de medición (o error de medición) también es un factor importante.

- Elección del diseño experimental.

Si las actividades de planeación previas al experimento se realizan como es debido, este paso es relativamente sencillo. La elección del diseño implica la consideración del tamaño de la muestra (número replicas), la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales y la determinación de si entran en juego o no la formación de bloques u otras restricciones sobre la aleatorización.

- Ejecución del experimento.

Cuando se lleva a cabo el experimento es vital monitorear con atención el proceso a fin de asegurarse de que todo se está haciendo conforme a la planeación. Los errores en el procedimiento experimental en esta etapa destruirán por lo general la validez experimental

- Análisis estadístico de los datos.

Deberán usarse métodos estadísticos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivas y no de carácter apreciativo. Si el experimento se da diseñado correctamente y si se ha llevado a cabo de acuerdo con el diseño, los métodos estadísticos necesarios no deben ser complicados.

Recuerden que los métodos estadísticos no pueden demostrar que un factor (o factores) posee un efecto particular. Solo proporcionan pautas generales en cuanto a la confiabilidad y la validez de los resultados.

- Conclusiones y recomendaciones

Una vez que se han analizado los datos, el experimento debe sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción. Los métodos gráficos suelen ser útiles en esta etapa, en particular para presentar los resultados. También deberán realizarse corridas de seguimiento o pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

CAPITULO 2

2. PREPARACION DEL EXPERIMENTO

2.1. Elección de factores, niveles y rangos

Para el desarrollo del experimento se requiere establecer una serie de factores los cuales presentan relación con la variable de respuesta.

De acuerdo a las referencias consultadas, los insumos químicos aplicados al proceso tienen una característica específica y la cual modifica de una forma diferente la composición fisicoquímica de la meladura para su correspondiente clarificación, detallo los siguientes factores:

Ácido fosfórico

La cantidad de ácido fosfórico necesaria según lo recomendado en el libro (Rein, 2012) varía de acuerdo con la variedad de la caña y las circunstancias, pero en general se calcula que son necesarios entre 150 mg hasta 350 mg de fosfato P_2O_5 /Kg Sólidos Disueltos SD, hay variedades de caña que presentan menos de esto por lo que hay que realizar análisis y compensar lo faltante. Estas cantidades están dadas en concentración de P_2O_5 , que es el compuesto anhídrido de fósforo que se mezcla con agua para preparar el ácido fosfórico usado en el proceso.

En el campo del ingenio azucarero existen variedades de caña y suelos con fosfatos inferiores o bajos a 300 mg/kg caña, por esta razón se establecen dosificaciones entre 300 hasta 400 ppm de ácido fosfórico.

La cantidad presente en la meladura de fosfatos debe ser la suficiente para poder reaccionar de manera completa con el sacarato de calcio que se suministra en la alcalización, para ello es de vital importancia tener en cuenta la cantidad de meladura (flujo o caudal) que se piensa dosificar con la sustancia.

Floculante

El efecto de la dosificación del floculante aniónicos, poliacrilamidas es recomendado en el libro (Rein, 2012) sobre la remoción de turbidez se ilustra en la figura 2.1. Esto indica que una dosis de aproximadamente 15 mg/Kg Sólidos Disueltos SD es la óptima. Con meladuras de muy baja calidad pueden requerirse mayores dosis de hasta 30 mg/Kg SD para obtener los mejores resultados.

Por lo general un buen agente floculador mejora la floculación, aumenta la velocidad de decantación o flotación. Los tipos de floculante normalmente usados en la industria azucarera son las poliacrilamidas aniónicas

En base al FDA (Regulations, 2022). El aditivo identificado se usa como floculante en la clarificación de jugo y meladura que no exceda 5 ppm en peso jugo o 10 ppm en peso meladura. Por esta razón el Ingenio azucarero maneja dosificaciones entre 8 a 12 ppm, en

base a esta cita del FDA nuestro producto terminado se monitorea y valida su cumplimiento en laboratorios certificados.

En la figura 2.1 se muestra la remoción de turbidez lograda al variar la dosificación en ppm de floculante. fue obtenido del libro (Rein, 2012).

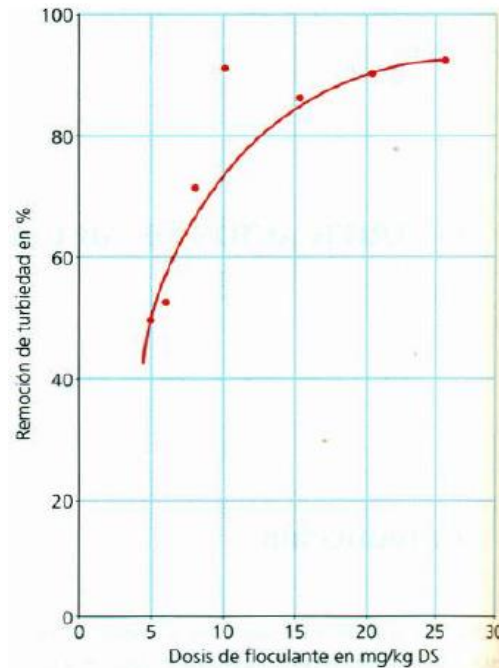


Figura 2.1 Dosis floculante sobre remoción turbidez

Fuente: (Rein, 2012)

Temperatura

En base a lo descrito en el libro (Rein, 2012) se menciona que la temperatura tiene un efecto significativo sobre la remoción de turbidez. Esto se muestra en la figura 2.2, que indica que se obtiene un mejoramiento progresivo aumentando la temperatura hasta 85°C, Posterior el efecto se detiene.

El ingenio azucarero solo puede manejar temperaturas entre 70°C hasta 78 °C por diseño de proceso, La tubería que alimenta vapor 10 psi al calentador tiene una distancia de 20 a 25 m sin aislante térmico en la cual el condensa y genera reducción en los grados Brix o solidos totales disueltos de la meladura afectando el tiempo de cristalización.

Esta variable tiene relación directa con la floculación, es uno de los factores que influyen en la velocidad a la que tiene lugar las reacciones químicas.

Es importante tener cuidado con la manera en que se maneja esta variable ya que un descenso de la temperatura generaría cambios principalmente de floculación, dado que la formación de flóculos sería incompleta ya que la reacción de la cal con los fosfatos presente depende de la temperatura a la que se somete la meladura. También reduce la viscosidad de la meladura ayudando a que los flóculos puedan flotar.

En la figura 2.2 se muestra el efecto de la temperatura sobre la remoción de la turbidez, el cual fue obtenido del libro (Rein, 2012).

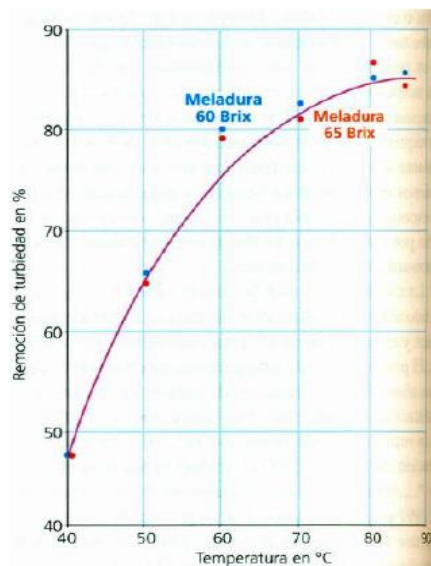


Figura 2.2 Efecto Temperatura sobre Remoción Turbidez

Fuente: (Rein, 2012)

A continuación, se presenta los factores con sus respectivos niveles. En la cual se define que por cada factor en el proceso de clarificación estos se pueden modificar en función de lo establecido en la tabla 2.1 sin embargo, se debe considerar que las modificaciones deben realizarse cada 4 horas para poder evaluar cambios en la meladura clarificada.

Tabla 1 Muestra los factores, niveles y rangos a experimentar que inciden en el proceso de clarificación de meladura.

Tabla 1
Factores, niveles y rangos a experimentar

Factor Independiente	# Niveles	Niveles		
		Bajo	Medio	Alto
Dosis Ácido Fosfórico,				
1 ppm	3	300	350	400
2 Dosis floculante, ppm	3	8	10	12
3 Temperatura, °C	3	70	75	78

Fuente: (Rein, 2012)

2.2. Elección diseño experimental

Cada factor necesita ser evaluado en sus tres niveles esto con el fin de abordar la forma en que se comporta la variable respuesta entre los niveles alto y bajo esto es con el fin de evaluar la presencia de curvatura.

La combinación y aleatoriedad de las corridas se presentan en la tabla 1, Para el experimento del proyecto se escogió un modelo factorial general de 3 factores con 3 niveles, Debido a que al relacionar los factores se tienen 54 combinaciones se decidió realizar únicamente 2 réplicas de cada combinación.

2.3. Ejecución del experimento

El orden aleatorio es desarrollado a través de MINITAB ver figura 2.3, y fue comunicado a los operadores de la clarificación de meladura, en la cual se realizaban 2 modificaciones por turno de 8 horas.

Es decir, cada 4 horas se realizaban cambios en el proceso (factores que impactan en la variable de respuesta), el orden en la cual se modificaban los factores fue en base a la tabla 1.

Posterior el laboratorio de producción realizaba un muestreo de la meladura no clarificada y meladura clarificada antes de realizar la siguiente modificación o cambios de los factores.

Los operadores fueron entrenados para realizar el cálculo del porcentaje de remoción turbidez para su posterior registro. De igual manera se les dio el seguimiento diario a los operadores para evitar cualquier error de cálculo y registro.

The screenshot displays the Minitab interface for creating a factorial design. The main window shows a spreadsheet with columns C1, C2, and C3. Overlaid on this are three dialog boxes:

- Crear diseño factorial:** Shows the selection of 'Diseño factorial completo general' for 3 factors.
- Crear diseño factorial: Diseños:** Shows a table with 3 factors (A, B, C) and 3 levels each, with 2 replicates selected.
- Crear diseño factorial: Factores:** Shows the configuration for factors A, B, and C, each with 3 levels and specific values.

The background spreadsheet shows the following data for 'emoción turbidez':

	C8	C9	C10	C11	C12	C ^
	emoción turbidez	AJUSTES1	RES11	AJUSTES2	RES12	AJUS
34	23.73	36.570	-12.840	54.6120	-30.8820	45.
35	74.48	67.330	7.150	68.5076	5.9724	66.
36	54.65	52.570	2.080	55.4981	-0.8481	55.
37	62.11	68.805	-6.695	68.8359	-6.7259	74.
38	63.24	60.935	2.305	59.7870	3.4530	59.
39	66.80	61.155	5.645	55.8265	10.9735	59.
40	72.84	74.135	-1.295	74.6187	-1.7787	70.
	62.67	70.985	-8.315	65.2831	-2.6131	68.
	50.34	56.920	-6.580	61.6093	-11.2693	60.
	70.56	68.215	2.345	62.9531	7.6069	70.
	57.76	64.130	-6.370	60.7231	-2.9631	60.
	62.61	60.375	2.235	58.0565	4.5535	53.
	65.22	64.450	0.770	64.6837	0.5363	67.
	62.91	56.890	6.020	49.7154	13.1946	50.
	61.45	60.530	0.920	57.2287	4.2213	63.
	59.14	61.980	-2.840	68.2365	-9.0965	65.
	58.83	62.500	-3.670	60.3948	-1.5648	60.
	64.05	59.610	4.440	57.1704	6.8796	54.
	70.97	72.600	-1.630	76.3493	-5.3793	70.
	75.16	65.450	9.710	71.0659	4.0941	69.
	58.63	60.935	-2.305	59.7870	-1.1570	59.

Figura 2.3 Desarrollo de orden aleatorio MINITAB

Fuente: Autor

La ejecución del experimento se la realizó en 2 etapas, las primeras 27 corridas se la realizo durante casi 2 semanas y la segunda en dos semanas posteriores una vez terminada la primera corrida.

Los datos fueron registrados por los operadores del clarificador de meladura en un documento impreso con los factores, niveles y rangos establecidos (Tabla 2). Adicional los operadores calcularon y registraron el porcentaje de remoción turbidez.

Tabla 2
Formato registro porcentaje remoción turbidez

Fecha	Operador	Dosificacion acido fosforico (ppm)	Dosificacion Floculante (ppm)	Temperatura °C	Turbidez MNCL	Turbidez MCL	% Remocion Turbidez
		300	12	75			
		300	10	70			
		300	8	78			
		350	12	75			
		400	8	78			
		300	12	70			
		350	12	70			
		400	12	75			
		350	8	70			
		300	8	70			
		300	12	78			
		300	10	75			
		350	10	70			
		350	12	78			
		350	8	75			
		400	8	70			
		400	8	75			
		400	10	78			
		350	8	78			
		400	12	70			
		350	10	75			
		300	8	75			
		400	12	78			
		400	10	75			
		350	10	78			
		300	10	78			
		400	10	70			

Fuente: Autor

Adicional, a los operadores se les entregaron 2 archivos con las dosificaciones en ml/min (mililitros sobre minutos) y gal/min (galones sobre minutos) en función de los flujos de meladura que ingresaron al clarificador. Con la finalidad que puedan realizar los cambios pertinentes con respecto a las dosificaciones de la solución del ácido fosfórico (ver Tabla 3) y del floculante (ver Tabla 4)

Tabla 3
Dosificaciones ácido fosfórico en función del flujo meladura

Flujo Meladura Ton/hora	Dosificacion Acido Fosforico ml/min (300 ppm)	Dosificacion Acido Fosforico ml/min (350 ppm)	Dosificacion Acido Fosforico ml/min (400 ppm)
40	100	117.21	133.95
45	113.02	131.86	150.7
50	125.58	146.51	167.44
55	138.14	161.16	184.18
60	150.7	175.81	200.93
65	163.25	190.46	217.67
70	175.81	205.11	234.42

Fuente: Autor

Tabla 4
Dosificación floculante en función del flujo meladura

Flujo Meladura Ton/hora	Dosificacion Floculante gal/min (8 ppm)	Dosificacion Floculante gal/min (10 ppm)	Dosificacion Floculante gal/min (12 ppm)
40	0.9	1.1	1.4
45	1	1.3	1.5
50	1.1	1.4	1.7
55	1.3	1.6	1.9
60	1.4	1.7	2.1
65	1.5	1.9	2.2
70	1.6	2	2.4

Fuente: Autor

A continuación, se muestra la tabla con los datos de porcentaje de remoción turbidez primera corrida ver Tabla 5

Tabla 5
Datos porcentaje remoción turbidez, primera corrida.

Dosificación acido fosforico (ppm)	Dosificación Floculante (ppm)	Temperatura °C	Turbidez MNCL	Turbidez MCL	% Remocion Turbidez	Flujo Meladura T/h
300	12	75	4075.00	1480.00	63.68	60.00
300	10	70	3515.00	1221.00	65.26	60.00
300	8	78	3420.00	1300.00	61.99	60.00
350	12	75	3683.00	1651.00	55.17	60.00
400	8	78	3566.00	1420.00	60.18	60.00
300	12	70	4081.00	1500.00	63.24	60.00
350	12	70	3579.00	2608.00	27.13	60.00
400	12	75	3745.00	1278.00	65.87	60.00
350	8	70	2984.00	1466.00	50.87	60.00
300	8	70	4457.00	1800.00	59.61	60.00
300	12	78	4298.00	933.00	78.29	60.00
300	10	75	3855.00	1356.00	64.82	60.00
350	10	70	2922.00	1300.00	55.51	60.00
350	12	78	4097.00	848.00	79.30	60.00
350	8	75	4400.00	2226.00	49.41	60.00
400	8	70	3052.00	1511.00	50.49	60.00
400	8	75	4059.00	1373.00	66.17	60.00
400	10	78	3720.00	914.00	75.43	60.00
350	8	78	3750.00	1288.00	65.65	60.00
400	12	70	3225.00	1350.00	58.14	60.00
350	10	75	4037.00	1191.00	70.50	60.00
300	8	75	4303.00	1149.00	73.30	60.00
400	12	78	4076.00	1804.00	55.74	60.00
400	10	75	3976.00	1357.00	65.87	60.00
350	10	78	4081.00	959.00	76.50	60.00
300	10	78	3147.00	811.00	74.23	60.00
400	10	70	4110.00	1500.00	63.50	60.00

Fuente: Autor

A continuación, se muestra la segunda corrida ver Tabla 6.

Tabla 6
Datos % remoción turbidez, segunda corrida.

Dosificacion acido fosforico (ppm)	Dosificacion Floculante (ppm)	Temperatura °C	Turbidez MNCL	Turbidez MCL	% Remocion Turbidez	Flujo Meladura/h
300	12	75	4134.00	1438.00	65.22	60.00
300	10	70	3870.00	1395.00	63.95	60.00
300	8	78	4463.00	1271.00	71.52	60.00
350	12	75	4047.00	1455.00	64.05	60.00
400	8	78	4314.00	1101.00	74.48	60.00
300	12	70	3140.00	1299.00	58.63	60.00
350	12	70	3354.00	1624.00	51.58	60.00
400	12	75	3838.00	1130.00	70.56	60.00
350	8	70	4314.00	1600.00	62.91	60.00
300	8	70	3097.00	1194.00	61.45	60.00
300	12	78	3080.00	890.00	71.10	60.00
300	10	75	3634.00	1485.00	59.14	60.00
350	10	70	3632.00	1206.00	66.80	60.00
350	12	78	4005.00	1495.00	62.67	60.00
350	8	75	3590.00	2738.00	23.73	60.00
400	8	70	3713.00	1684.00	54.65	60.00
400	8	75	3799.00	1564.00	58.83	60.00
400	10	78	4050.00	1100.00	72.84	60.00
350	8	78	4560.00	1200.00	73.68	60.00
400	12	70	3998.00	1495.00	62.61	60.00
350	10	75	3447.00	1456.00	57.76	60.00
300	8	75	3245.00	1195.00	63.17	60.00
400	12	78	3478.00	864.00	75.16	60.00
400	10	75	3351.00	752.00	77.56	60.00
350	10	78	3133.00	1187.00	62.11	60.00
300	10	78	5023.00	1458.00	70.97	60.00
400	10	70	3500.00	1738.00	50.34	60.00

Fuente: Autor

Una vez terminada la prueba la información fue cargada al MINITAB 16, Se obtuvo el diagrama de Pareto y tabla ANOVA donde fue posible explicar la siguiente información.

2.3.1. Análisis del modelo

El diagrama de Pareto muestra de manera gráfica que factores y combinaciones muestran significancia con respecto a la variable respuesta:

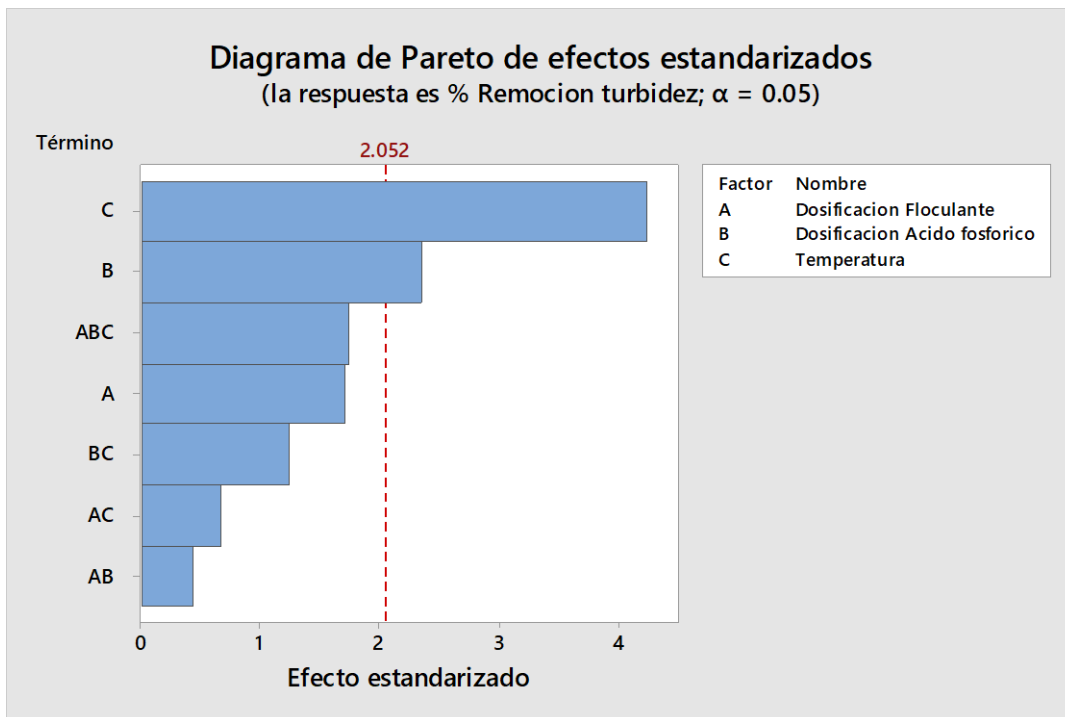


Figura 2.4 Diagrama Pareto

Fuente: Autor

Los factores dosificación floculante (**C**) y dosificación ácido fosfórico (**B**) tiene efecto sobre la variable respuesta (remoción turbidez). El resto de factores o interacciones no tienen efecto sobre la variable de respuesta.

Para determinar los factores que presentan significancia se generó una tabla ANOVA de los factores y sus combinaciones, ver Figura 2.5.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	26	4288.6	164.95	2.46	0.012
Lineal	6	2450.6	408.44	6.09	0.000
Dosificacion Floculante	2	339.1	169.54	2.53	0.098
Dosificacion Acido fosforico	2	557.3	278.66	4.16	0.027
Temperatura	2	1554.2	777.12	11.59	0.000
Interacciones de 2 términos	12	789.9	65.83	0.98	0.489
Dosificacion Floculante*Dosificacion Acido fosforico	4	160.9	40.22	0.6	0.666
Dosificacion Floculante*Temperatura	4	223.4	55.86	0.83	0.516
Dosificacion Acido fosforico*Temperatura	4	405.6	101.4	1.51	0.226
Interacciones de 3 términos	8	1048.1	131.01	1.95	0.092
Dosificacion Floculante*Dosificacion Acido fosforico*Temperatura	8	1048.1	131.01	1.95	0.092
Error	27	1809.6	67.02		
Total	53	6098.3			

Figura 2.5 Análisis de Varianza

Fuente: Autor

Si el valor $P < \alpha 0,05$ (rechazar H_0), Por lo tanto, se comprueba que la dosificación floculante $P= 0.098$ no tiene efecto significativo sobre la remoción turbidez considerando un nivel de significancia del 10 %.

2.3.2. Evaluación del modelo y sus supuestos

De acuerdo a la Figura 2.6 se puede observar que el R-cuadrado debe ser $\geq 70\%$, Por lo tanto, R-cuadrado es considerado un valor adecuado, es decir que el modelo captura el 70.33% de la variación de los datos de la variable respuesta.

Resumen del modelo			
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
8.18678	70.33%	41.75%	0.00%

Figura 2.6 Resumen del modelo

Fuente: Autor

Para este nuevo modelo se revisaron los supuestos de los residuos, como primer paso se realizó una prueba de normalidad, ver Figura 2.7.

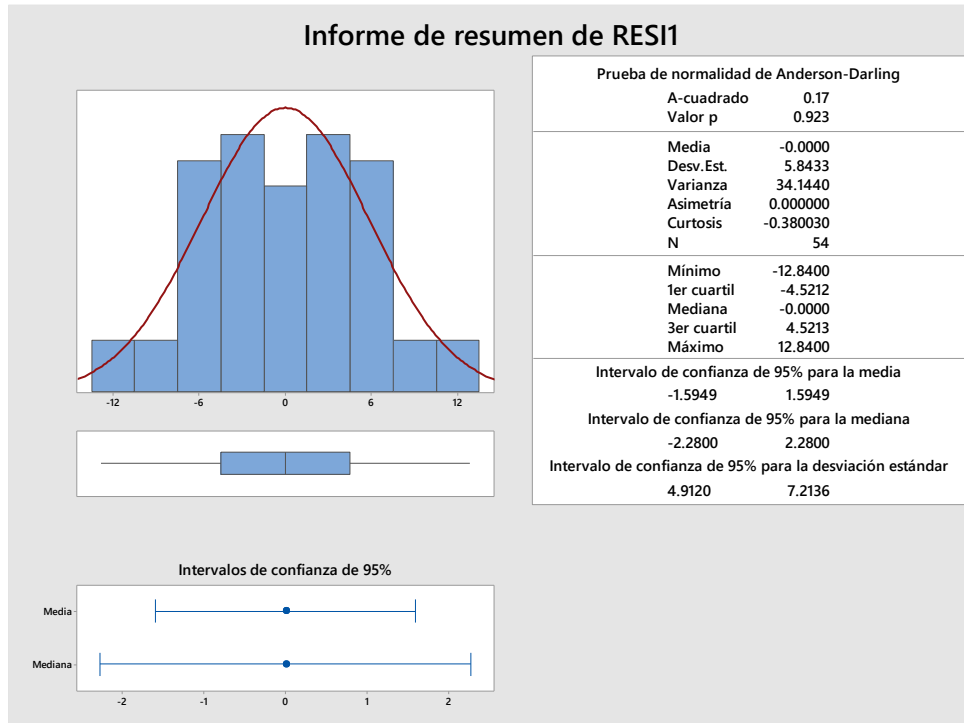


Figura 2.7 Informe resumen RESI1

Fuente: Autor

Con un valor P de 0.923, no se rechaza H_0 (distribución normal), por lo tanto se concluye que el error tiene una distribución normal con media de 0 y desviación de 5.84. Por lo tanto, cumple con supuesto de normalidad.

Se analizó la homogeneidad de la varianza en la cual se busca que la amplitud sea la misma. Se observa en la figura 2.8 de residuos vs ajuste que existe uniformidad aceptable en los valores, no tiene forma de cono que podrían sugerir diferencias de varianza.

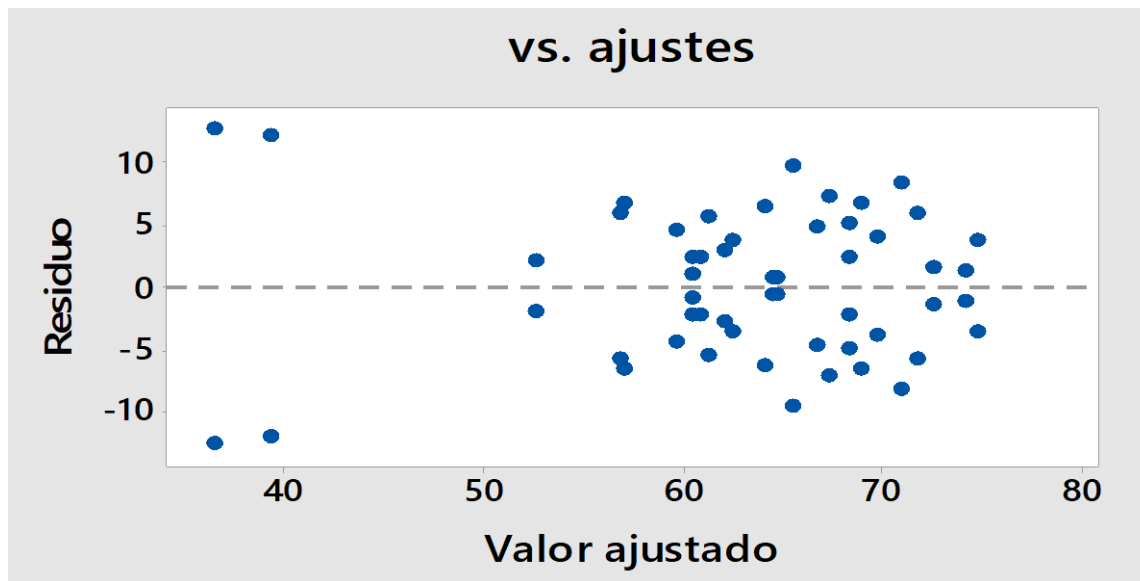


Figura 2.8 Grafica residuo vs ajuste

Fuente: Autor

El último supuesto que se revisó fue la independencia del error vs el tiempo buscando que los residuos tengan un comportamiento aleatorio, para esto se realizó una gráfica de corrida con tamaño de subgrupo 1 mostrada en la Figura 2.9 en la cual se revisaron las siguientes hipótesis:

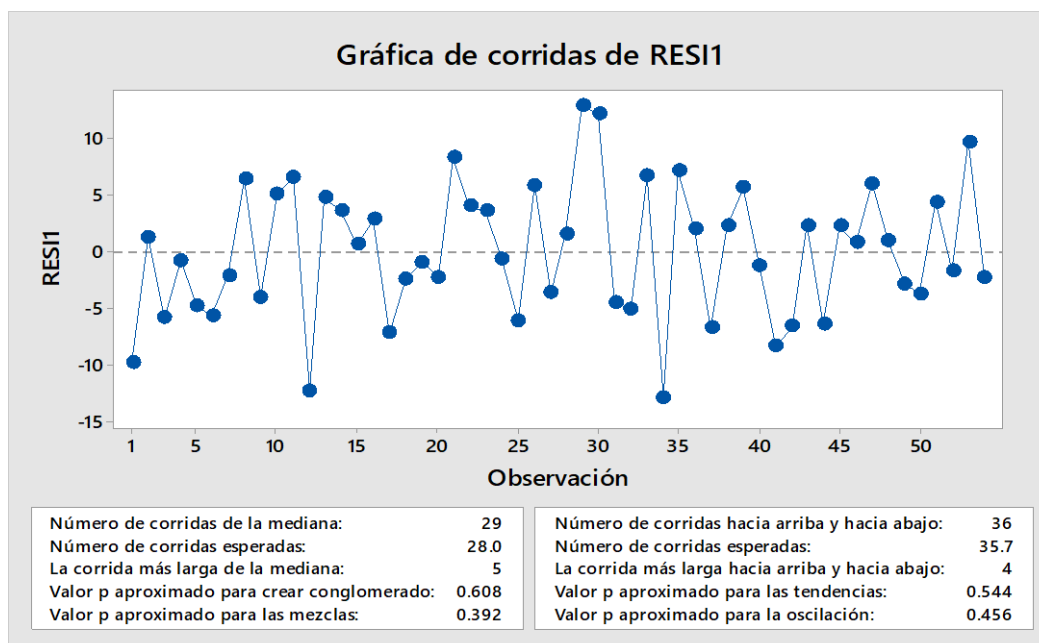


Figura 2.9 Graficas de corridas de RESI

Fuente: Autor

- 1** Ho: el error es independiente
vs
H1: el error muestra conglomerados
con un valor p de 0.608, no se rechaza Ho, el error es independiente.
- 2** Ho: el error es independiente
vs
H1: el error muestra mezclas de distribución
con un valor p de 0.392, no se rechaza Ho, el error es independiente.
- 3** Ho: el error es independiente
vs
H1: el error muestra tendencia
con un valor p de 0.544, no se rechaza Ho, el error es independiente.
- 4** Ho: el error es independiente
vs
H1: el error muestra oscilaciones
con un valor p de 0.456, no se rechaza Ho, el error es independiente.

Debido a que no se ha podido rechazar la hipótesis Ho se continúa considerando el comportamiento del residuo como aleatorio. Al cumplirse con los supuestos se puede continuar con el análisis del experimento.

2.3.3. Análisis del experimento sintetizado

Una vez obtenido y validado el modelo refinado se procedió con la revisión de los resultados generados por el experimento, comenzando con el ANOVA de los factores principales al excluir las interacciones o factores principales identificados como no influyentes en la figura 2.10.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	2111.6	527.89	6.49	0.000
Lineal	4	2111.6	527.89	6.49	0.000
Dosificación Ácido fosfórico	2	557.3	278.66	3.42	0.041
Temperatura	2	1554.2	777.12	9.55	0.000
Error	49	3986.7	81.36		
Falta de ajuste	22	2177.1	98.96	1.48	0.167
Error puro	27	1809.6	67.02		
Total	53	6098.3			

Figura 2.10 ANOVA de factores del modelo sintetizado

Fuente: Autor

Si el valor $P < \alpha$ 0,05 (rechazar H_0), Por lo tanto, se comprueba que la dosificación de ácido fosfórico $P=0.041$ y temperatura $P=0.000$ tienen efecto significativo sobre la remoción turbidez.

Por lo tanto, en la figura 2.10 nos indica que los factores principales escogido en el modelo sintetizado son significativos e influyen sobre la variable de respuesta.

Este resultado fue confirmado también mediante un diagrama de Pareto mostrado en la figura 2.11 en donde se observa que los factores seleccionados presentan significancia para el nuevo modelo sintetizado.

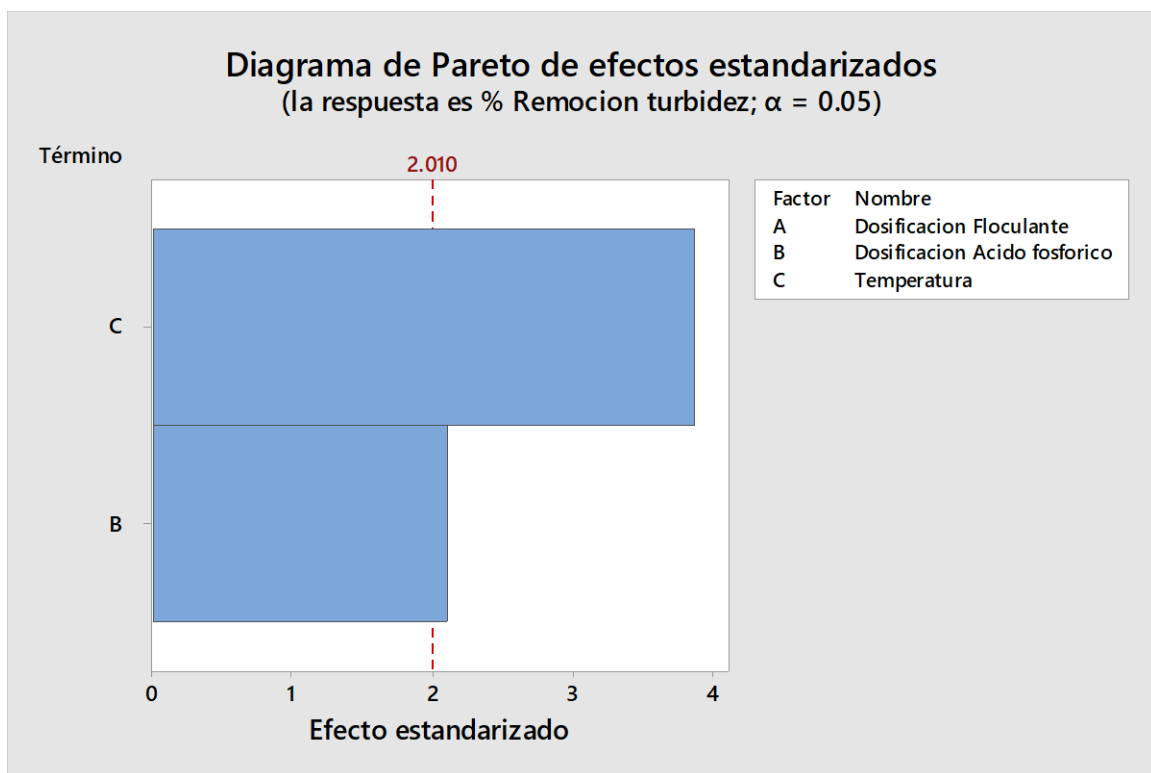


Figura 2.11 Diagrama de Pareto de factores del modelo sintetizado

Fuente: Autor

2.3.4. Niveles adecuados de operación

Se procedió a generar las gráficas factoriales del experimento, Primero se analizaron las gráficas de los efectos principales, Ver figura 2.12.

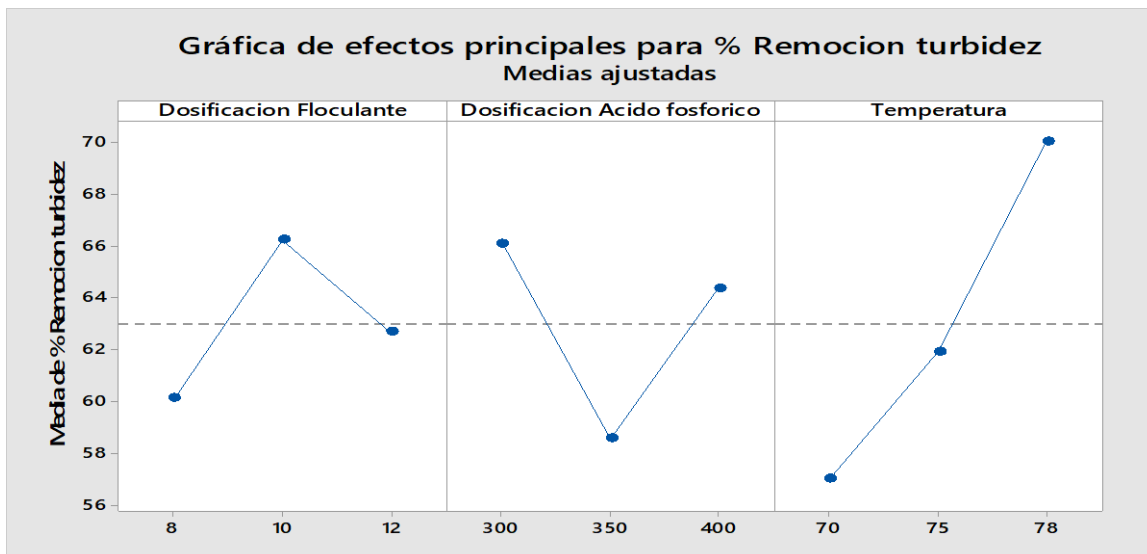


Figura 2.12 grafica factorial del experimento

Fuente: Autor

En la figura 2.12 se puede observar los efectos de cada nivel de los factores principales con respecto a la variable de respuesta. Siendo la temperatura 78°C el factor con mayor significancia en la remoción de la turbidez, obtenido del análisis se tiene que el menor porcentaje de remoción turbidez es con la temperatura de 70°C.

De igual manera con la dosificación Ácido Fosfórico la mayor remoción de turbidez es de 300 ppm obteniendo una mayor remoción turbidez.

Con respecto al último factor, la dosificación Floculante con la de mayor remoción turbidez es con 10 ppm obteniendo una mayor remoción turbidez.

Dado que previamente se había establecido que dicho factor no era influyente ya que tiene un valor de $p = 0.098$ no tiene efecto significativo, fue considerado parte del análisis gráfico ya que su nivel de significancia podría ser influyente si se considera un nivel de significancia del 10%.

Por lo tanto, con esto se determina las configuraciones idóneas con las que la fábrica debe trabajar para obtener mayor remoción de turbidez en la meladura no clarificada, En el siguiente capítulo se validaran estos resultados mediante una corrida verificadora. Ver tabla 7 con las configuraciones idóneas con mayor % remoción turbidez en la meladura no clarificada.

Tabla 7
Idóneas con mayor % remoción turbidez

Temperatura °C	Dosificación Ácido Fosfórico (ppm)	Dosificación Floculante (ppm)
78	300	10

Fuente: Autor

Con esto se determinan las configuraciones idóneas con la que el ingenio azucarero debe trabajar para generar mayor remoción de turbidez en la meladura, En el siguiente capítulo se validarán estos resultados mediante una corrida verificadora.

CAPITULO 3

3. VERIFICACION RESULTADOS

3.1. Corrida verifcatoria.

En la corrida verifcatoria se realizaron 21 corridas con las configuraciones idóneas encontradas, este valor es una muestra significativa considerando un nivel de confianza del 95 % y un nivel de error del 5 % en la cual nos dieron los siguientes datos, ver la tabla 8.

Tabla 8
Datos de remoción turbidez corrida verifcatoria

Dosificacion acido fosforico	Dosificacion Floculante	Temperatura	Turbidez MNCL	Turbidez MCL	% Remocion Turbidez	Flujo Meladura T/h
300	10	78	4188.00	749.00	82.12	60.00
300	10	78	4529.00	920.00	79.69	60.00
300	10	78	5345.00	1316.00	75.38	60.00
300	10	78	5232.00	1533.00	70.70	60.00
300	10	78	5232.00	1533.00	70.70	60.00
300	10	78	4651.00	1454.00	68.74	60.00
300	10	78	5379.00	1166.00	78.32	60.00
300	10	78	5260.00	1290.00	75.48	60.00
300	10	78	4265.00	1261.00	70.43	60.00
300	10	78	4077.00	1329.00	67.40	60.00
300	10	78	3603.00	1174.00	67.42	60.00
300	10	78	5717.00	1774.00	68.97	60.00
300	10	78	4254.00	1568.00	63.14	60.00
300	10	78	3481.00	876.00	74.83	60.00
300	10	78	5229.00	1713.00	67.24	60.00
300	10	78	4197.00	1481.00	64.71	60.00
300	10	78	4038.00	1030.00	74.49	60.00
300	10	78	5180.00	1230.00	76.25	60.00
300	10	78	4376.00	1397.00	68.08	60.00
300	10	78	4820.00	1084.00	77.51	60.00
300	10	78	3232.00	1024.00	68.32	60.00

Fuente: Autor

En la tabla 3.1 se muestran resultados con alta remoción de turbidez afirmando que las configuraciones idóneas encontrados tiene efecto significativo en la variable de respuesta.

Adicional se realiza una prueba de hipótesis con los datos presentados en la tabla 9, los datos presentan una distribución normal con un valor p 0.257, ver Figura 3.1.

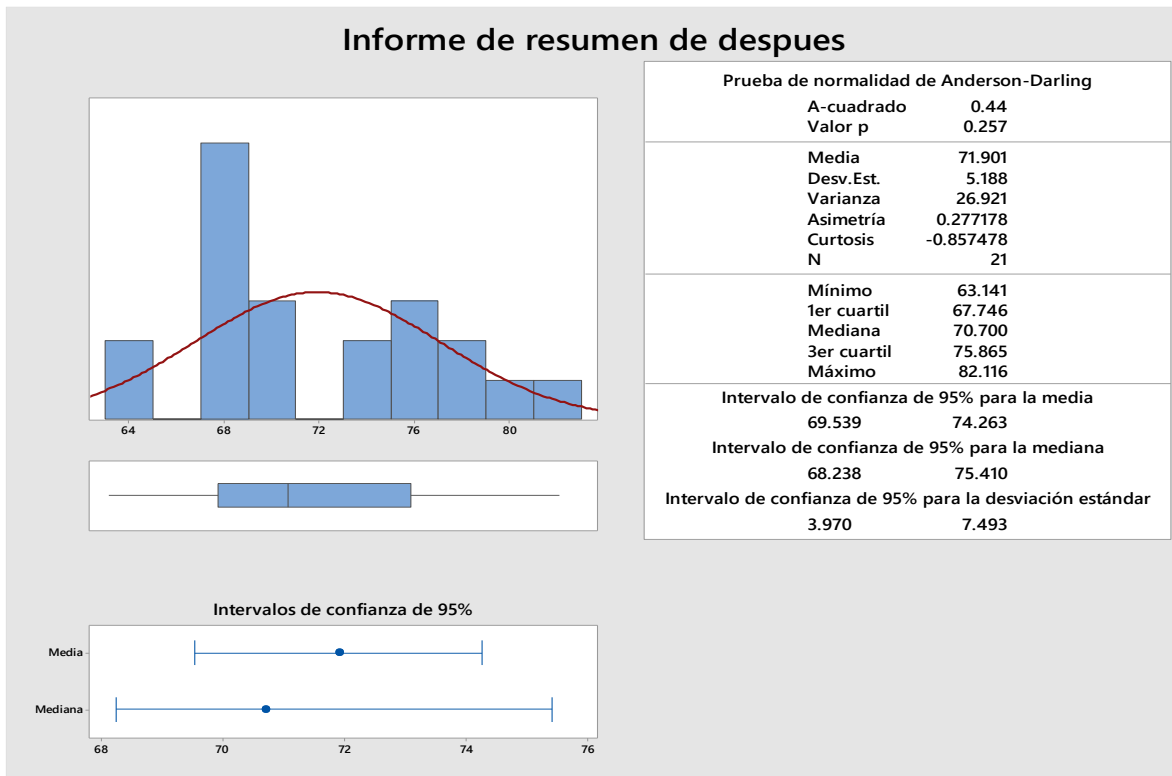


Figura 3.1 Prueba normalidad

Fuente: Autor

En la figura también nos muestra la media de tendencia central de 71.9 y una desviación estándar de 5.18.

La prueba de hipótesis de la corrida verficatoria nos da los siguientes resultados, ver Tabla 9.

Tabla 9
Prueba de hipótesis corrida verficatoria

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 71.9$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 71.9$

Valor T	Valor p
0.00	0.999

Fuente: Autor

Con un valor de p 0.999 no se rechaza la hipótesis nula, mi experimento o corrida verifcatoria ha sido valedero, la media de remoción de turbidez es de 71.9 % en comparación al objetivo planteado que fue de 66 %. ver figura 3.2.

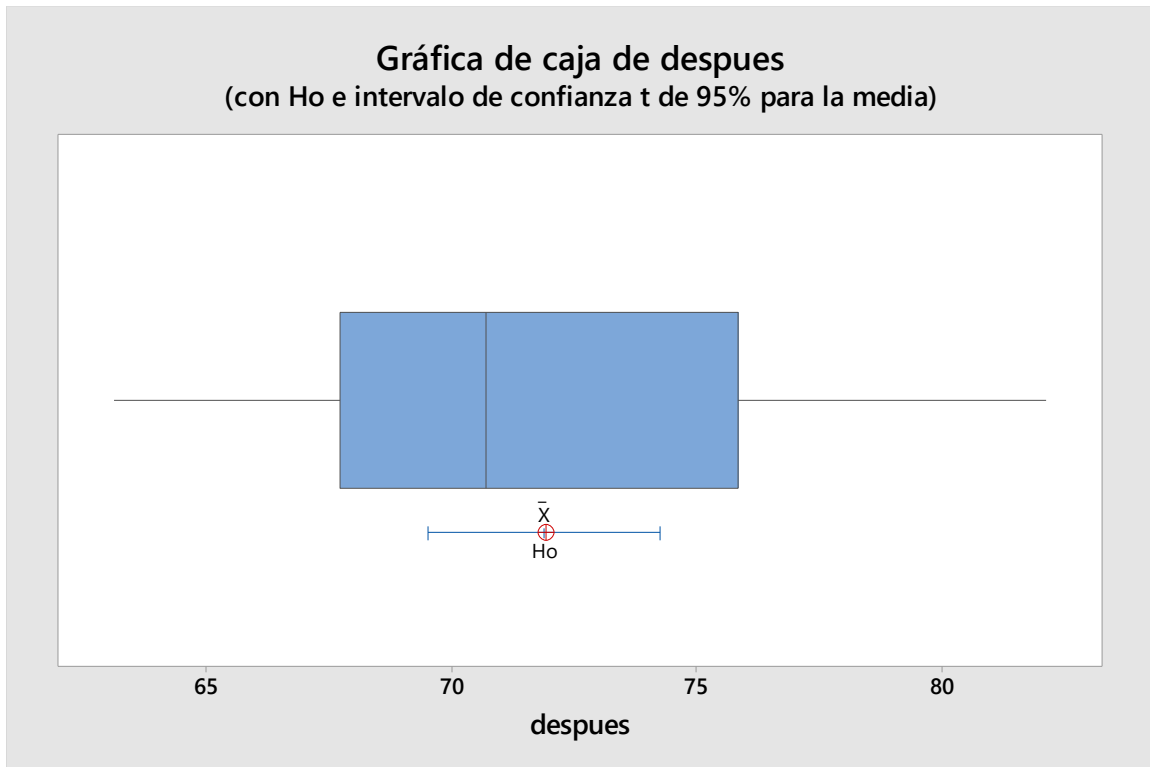


Figura 3.2 Blox Plot

Fuente: Autor

3.1.1. Análisis de capacidad antes y después

En las gráficas de capacidad que se muestran a continuación, antes y después se puede evidenciar la mejora en el Cpk, ver figura 3.3

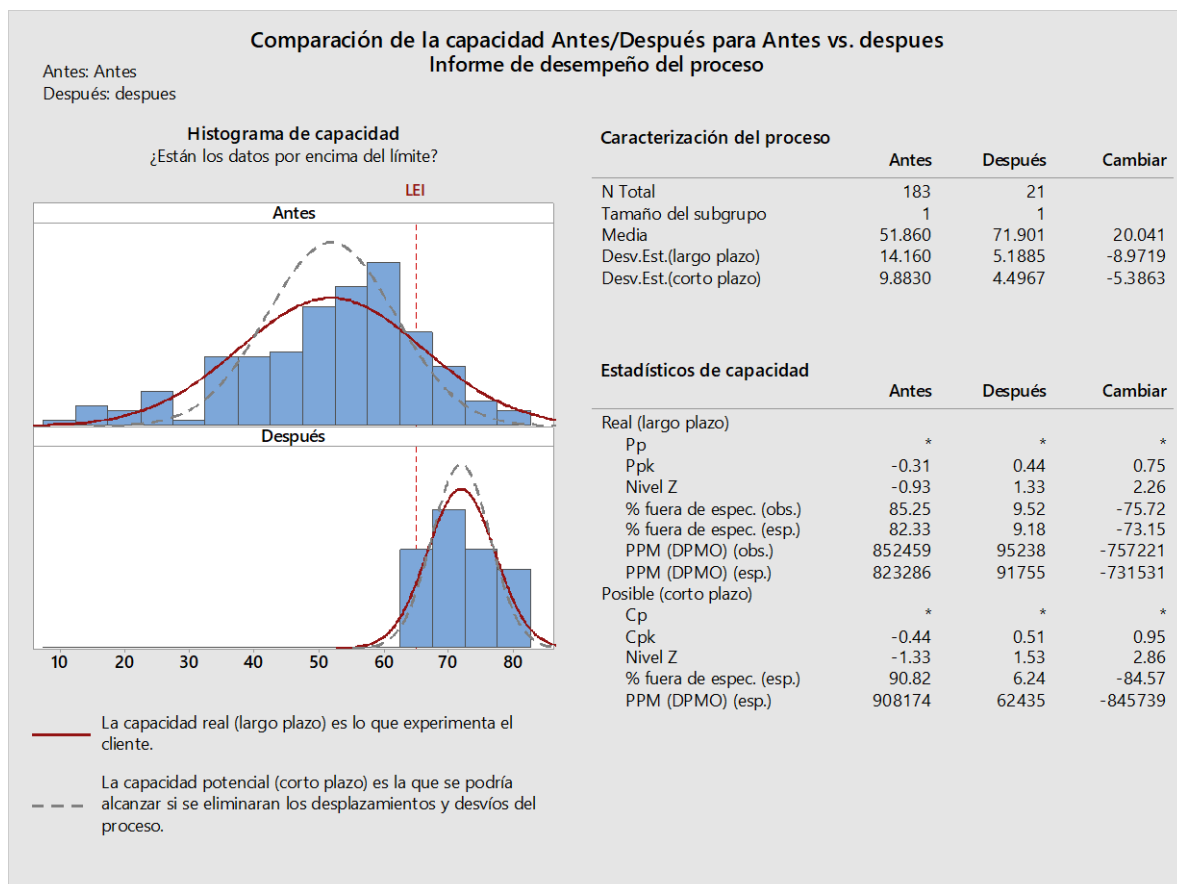


Figura 3.3 Comparación capacidades Antes y Después

Fuente: Autor

Se puede mostrar que la variabilidad del proceso se mejoró significativamente, antes Cpk - 0.44 y después Cpk 0.51. Es decir, el comportamiento de los datos tiene un comportamiento más estable al estar por arriba del límite inferior. Además de disminuir significativamente la probabilidad de obtener corridas con valores fuera del límite de especificación.

3.1.2. Gráficas de control I-MR Antes y Después

En la figura 3.4 las gráficas de control que se muestran a continuación, antes y después se puede evidenciar que los datos muestran estabilidad en el proceso.

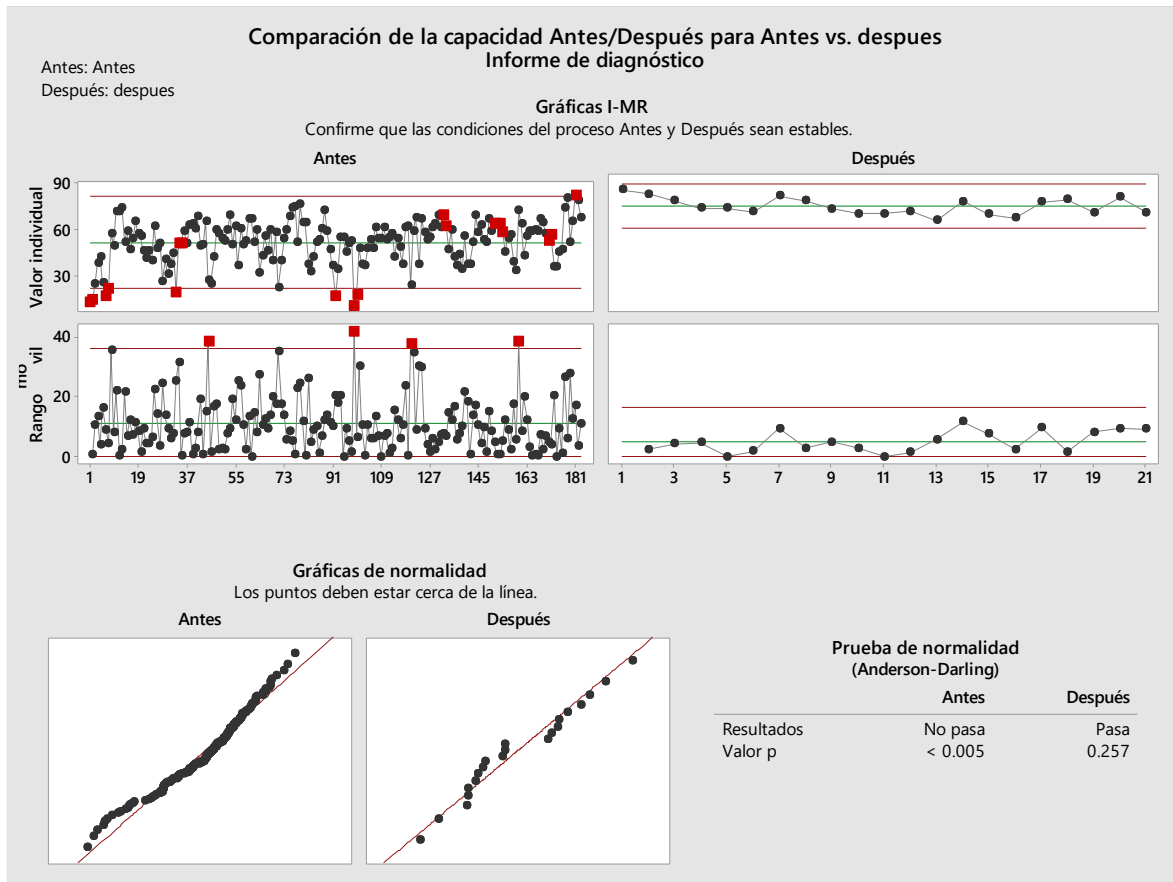


Figura 3.4 graficas control I-MR Antes y Después

Fuente: Autor

3.2. Beneficios económicos

Para calcular los beneficios económicos primero se calculó los costos asociados al reproceso que son la mano de obra e insumo utilizados, adicional se descuenta el 10% por pérdidas indeterminadas (cachaza y mieles) que influyen durante el proceso de disolución del producto no conforme. Ver detalle en la tabla 10.

Tabla 10
Detalles de los costos por reproceso

<u>Item</u>	<u>Costo para reprocesar 1 saco de azúcar</u>	Costo reproceso 1 saco 50 Kg
		\$
1	Costo Mano de obra estibador (arrumar)	0.15
2	Costo Mano de obra estibador (desarrumar)	0.15
3	Costo saco 50 kg	0.26
7	Costo MO por la disolucion	0.15
	TOTAL	0.71

Fuente: Autor

Con el costo de reproceso en base a un saco de 50 kg se procedió al cálculo del beneficio económico anual en base al número de sacos reprocesados en la zafra 2021 y zafra 2022, se muestra el detalle en la tabla 11.

Tabla 11
Beneficio económico anual

	#sacos reprocesados Bagasillo	Costo \$ por reproceso sacos 50 kg	Descuento perdida indeterminada -10%	Total
Zafra 2021	47200	33512	3351.2	30160.8
Zafra 2022	20000	14200	1420	12780
		19312		17380.8 Ahorro anual

Fuente: Autor

En base a la mejora realizada se puede demostrar que el ahorro anual fue de \$17.380.8 ya que el número de sacos reprocesados fue inferior al año 2021.

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

1. Mediante la implementación del diseño de experimento se determinó que los factores de dosificación ácido fosfórico y temperatura en el proceso de clarificación de meladura presentan significancia en el porcentaje remoción de turbidez, siendo escogidos adecuadamente para el desarrollo del proyecto.
2. Evaluando los niveles de trabajo de cada factor se obtuvo que las configuraciones adecuadas donde se genera la mayor remoción de turbidez es la dosificación del ácido fosfórico 300 ppm y temperatura 78°C en el proceso de clarificación de meladura.
3. En base a los resultados obtenidos se evidencia el cumplimiento del objetivo planteado al inicio del proyecto fue del 66 % en la remoción de la turbidez en la meladura, sin embargo, el proyecto alcanzo el 71.9% de remoción por lo tanto se concluye que fue un excelente trabajo por el resultado obtenido que superó la meta planteada.

4.2. Recomendaciones

1. Durante el desarrollo del experimento se pudo evidenciar que aún existe oportunidad de mejora en el proceso de calentamiento de la meladura, ya que el recorrido o trayecto del calentamiento es muy largo y sin aislamiento de las tuberías perdiendo capacidad calorífica, esto impide que la temperatura de calentamiento de la meladura sea inferior a 80 °C. Por lo tanto, se ha sugerido acortar el tramo de tubería de 20 m a 1 m tomándose de la nueva tubería de vapor que se instalara en esta reparación 2023.
2. Es importante recalcar que a pesar de haber instalado medidores de flujo digitales para la dosificación del floculante estos deben ser adaptados a nuestro sistema automático para que los ajustes se los realicen desde el cuarto de control de tachos.
3. También se recomienda realizar mantenimiento y reubicación de la válvula check que se encuentra a la entrada del calentador, esta se encuentra en una posición no adecuada ubicada horizontalmente entre la tubería y el calentador, cuando esta debe estar ubicada verticalmente en el sifón antes del calentador. De esta manera evitaremos que la válvula check ubicada en la tubería de vapor se obstruya con meladura.

BIBLIOGRAFIA

HUGOT, E. (1986). *Ingeniería caña de azúcar*. Amsterdam - Oxford - New York - Tokyo: Elsevier.

Montgomery, D. (. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. In Limusa Wiley. In Limusa Wiley.

Regulations, C. o. (29 de 11 de 2022). *Sustancias poliméricas y adyuvantes poliméricos para el tratamiento de alimentos*. Obtenido de FDA:
<https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcr/CFRSearch.cfm?fr=173.5>

Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlin 2012: Verlag Dr. Albert Bartens.