



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

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

**"Aplicación de la metodología Six Sigma para la reducción de
material insoluble en sulfato de aluminio tipo A sólido en una
planta Química"**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGISTER EN MEJORAMIENTO DE PROCESOS

Presentado por:

Jonathan Mauricio Pérez Correa

GUAYAQUIL – Ecuador

AÑO: 2020

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme tener ésta oportunidad de estudio.

A mi familia por su apoyo incondicional, motivación y comprensión durante todo éste proceso.

A mi esposa e hijas, sin ellas esto no sería posible.

A mi tutor, por su paciencia, su guía y retroalimentación.

DEDICATORIA

Este trabajo realizado con esfuerzo y tiempo, está dedicado a mis padres, esposa y mis hijas.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ángel Ramírez M., Ph.D.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

María Laura R., MSC.
DIRECTOR DE PROYECTO

María Denise Rodríguez, Ph.D.
VOCAL

DECLARACIÓN 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”

Jonathan Mauricio Pérez Correa

RESUMEN

Este proyecto fue realizado en una planta química del Ecuador y se enfocó en la mejora de un parámetro de calidad del sulfato de aluminio tipo A sólido para permitir que la empresa sea competitiva en los mercados internacionales. El sulfato de aluminio tipo A de fórmula $Al_2(SO_4)_3$ es una sal de color blanco usada principalmente como coagulante para el tratamiento de aguas, existen otras aplicaciones como la industria del papel y textil. El mercado del sulfato de aluminio es muy competitivo por las exportaciones que actualmente se realizan y debido a esto es importante mantener un bajo precio con un alto estándar de calidad para ser competitivos en el medio.

El material insoluble en el sulfato de aluminio tipo A sólido es un parámetro de control de calidad el cual se traduce en materia prima sin reaccionar, las reacciones químicas no son 100% eficientes por lo que es normal en el proceso que exista un porcentaje de material insoluble. Se realizó una mejora en el proceso, con el fin de reducir la generación de este material insoluble durante su producción.

La metodología aplicada para el proyecto fue DMAIC de Six Sigma, la cual sigue 5 etapas, siendo éstas: 1) Etapa de definición; 2) Etapa de medición para determinar y verificar mediante plan de recolección de datos; 3) Etapa de análisis, para determinar las causas raíz del problema; 4) Etapa de mejora y 5) Etapa de control.

Los datos analizados para determinar la situación inicial correspondieron al periodo 2018-2019. Entre junio y octubre del 2018 se detectó un incremento del 8% por encima del límite máximo, este incremento causó un aumento en los reclamos de calidad por parte de los clientes.

Para el análisis del proyecto, se enfatizó en la revisión de las variables de tiempo de agitación y velocidad de agitación, parámetros que afectan directamente la formación del material insoluble en el sulfato de aluminio durante el proceso de producción.

Con la implementación de las mejoras como cambios en el proceso, estandarización del proceso e implementación de cartas de control, se redujo en un 16% por debajo del límite máximo el porcentaje de material insoluble en el sulfato tipo A, cumpliendo con los estándares de calidad y asegurando la competitividad del producto para su exportación.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL	II
ABREVIATURAS	IV
INDICE DE FIGURAS.....	V
INDICE DE TABLAS.....	VI
CAPÍTULO 1	
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1 Problemas de calidad y cuantificación de pérdidas	2
CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Descripción de la metodología	3
CAPÍTULO 3	
3. METODOLOGÍA.....	6
3.1 Etapa de Definición	6
3.2 Etapa de Medición	11
3.3 Etapa de Análisis	20
3.4 Etapa de Mejora.....	31
3.5 Etapa de Control.....	47
CAPÍTULO 4	
4 RESULTADOS OBTENIDOS	50
CAPÍTULO 5	
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53

5.1 Conclusiones53
5.2 Recomendaciones53

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

DMAIC: Definición-Medición-Análisis-Mejora-Control

MI: Material insoluble

RPM: Revoluciones por minuto

SIPOC: Proveedor, Entrada, Proceso, Salida y Cliente

VOC: Voz del Cliente

X: Variables Independientes

Y: Variables Dependientes. Variable Objetivo

4W+1H: Qué (What)-Dónde (Where)-Cuándo (When)-Cómo lo Se (Whats is the specification)- Qué tanto (How much).

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Serie de tiempos valor promedio mensual de material insoluble (M.I.).....	2
Figura 3.1	Serie de Porcentaje de material insoluble.....	14
Figura 3.2	Resumen de datos estadísticos.	15
Figura 3.3	Capacidad del proceso Material insoluble	15
Figura 3.4	Resumen estadístico tiempo de agitación.....	16
Figura 3.5	Correlación porcentaje de material insoluble y tiempo de agitación.	17
Figura 3.6	Resumen estadístico Cantidad de agua agregada en los 79 lotes.....	17
Figura 3.7	Correlación porcentaje de material insoluble y agua agregada.....	18
Figura 3.8	Resumen estadístico Cantidad de ácido agregada en los 79 lotes.....	18
Figura 3.9	Correlación porcentaje de material insoluble y ácido agregado.....	19
Figura 3.10	Resumen estadístico Cantidad de hidróxido agregada en los 79 lotes.....	19
Figura 3.11	Correlación porcentaje de material insoluble e hidróxido agregado.....	20
Figura 3.12	Análisis de Ishikawa para alto porcentaje de material insoluble	21
Figura 3.13	Porcentaje de Material insoluble a 70 RPM.....	34
Figura 3.14	Porcentaje de material insoluble a 80 RPM	35
Figura 3.15	Porcentaje de material insoluble a 90 RPM	35
Figura 3.16	Diagrama de cajas intervalos de velocidad 70, 80 y 90 RPM	36
Figura 3.17	Gráfica de intervalos de confianza para 70, 80 y 90 RPM.....	36
Figura 3.18	ANOVA 1 factor 70, 80 y 90 RPM	37
Figura 3.19	Prueba de Tukey 70, 80 y 90 RPM.....	37
Figura 3.20	Prueba de normalidad de los residuos Anova 1 factor 70, 80 y 90 RPM	38
Figura 3.21	Prueba de igualdad de varianzas 70, 80 y 90 RPM.....	39
Figura 3.22	Porcentaje de material insoluble con 30 min agitación	40
Figura 3.23	Porcentaje de materia insoluble a 35 minutos de agitación.....	40
Figura 3.24	Porcentaje de material insoluble a 45 minutos de agitación.....	41
Figura 3.25	Porcentaje de material insoluble a 50 minutos agitación.....	41
Figura 3.26	Diagrama de cajas de intervalos 30, 40, 45, 50 y 55 minutos	42
Figura 3.27	Gráfica de intervalos de confianza 30, 35, 45, 50 y 55 minutos	42
Figura 3.28	Anova un factor 30, 35, 45, 50 y 55 minutos	43
Figura 3.29	Comparaciones de Tukey 30, 35, 45, 50 y 55 minutos.....	44
Figura 3.30	Prueba de normalidad residuos ANOVA 1 factor 30, 35, 45, 50 y 55 minutos	45
Figura 3.31	Prueba de igualdad de varianzas 30, 35, 45, 50 y 55 minutos	45
Figura 3.32	Gráfica I-MR porcentaje de material insoluble	49
Figura 4.1	Porcentaje de material insoluble con mejoras implementadas.....	50
Figura 4.2	Análisis de capacidad porcentaje de material insoluble mejorado.....	51
Figura 4.3	Comportamiento del material insoluble durante el proyecto	52

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Valores promedio de porcentaje de material insoluble	6
Tabla 2	Definición del Problema 4W + 1H.....	7
Tabla 3	Roles y Funciones del Equipo de Trabajo.....	9
Tabla 4	Carta Resumen del Proyecto	9
Tabla 5	Planteamientos previos	10
Tabla 6	VOC Aumento de material insoluble	10
Tabla 7	Matriz de selección de mediciones.....	11
Tabla 8	Acciones Just Do It	12
Tabla 9	Plan de recolección de Datos.....	13
Tabla 10	Matriz Causa – Efecto	23
Tabla 11	Plan verificación del aumento material insoluble	24
Tabla 12	Verificación de causas de aumento de material insoluble.....	30
Tabla 13	Análisis 5 ¿Por qué? Por aumento de material insoluble	30
Tabla 14	Plan de acción para mejoras en el porcentaje de material insoluble	31
Tabla 15	Cronograma de implementación de mejoras.....	33
Tabla 16	Proceso mejorado para producción sulfato tipo A sólido.....	46
Tabla 17	Plan de seguimiento	47
Tabla 18	Indicador del Proyecto.....	48
Tabla 19	Resultados obtenidos del porcentaje de material insoluble	50

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES

El proyecto se realizó en una empresa química dedicada a la producción y comercialización de distintos productos químicos. Se producen 2 tipos de sulfato de aluminio: el tipo A y el tipo B. El sulfato tipo B tiene una presentación líquido y sólido, el sulfato tipo A solo tiene la presentación sólida.

El sulfato de aluminio tipo A es un producto químico sólido y blanco que se emplea principalmente para el tratamiento de aguas. Este se produce localmente en reactores tipo batch, luego de un proceso de secado el sulfato de aluminio sólido tipo A es llevado a un proceso de molienda hasta determinada granulometría para ser usado en la industria. Con el paso del tiempo las exportaciones de este producto han ido en aumento lo cual representa un mercado importante para el crecimiento de las ventas de la compañía.

El aumento en las exportaciones desde Ecuador hacia distintos países obliga a la producción local a aumentar su capacidad y mantener un estricto estándar de calidad para poder mantenerse competitivo en el mercado.

La producción de sulfato de aluminio de aluminio tipo A en la empresa es en promedio de 700 toneladas mes. Se realizan análisis de calidad a la materia prima, producto semielaborado y al producto terminado; de esta manera se asegura los estándares de calidad en cada etapa del proceso y en caso de detectar desviaciones poder corregirlas. Si se detecta producto fuera de especificaciones que no puede ser liberado este se reprocesa o se libera según los niveles de aprobación.

Este proyecto se enfocó en el reactor 3 donde se produce el sulfato de aluminio tipo A sólido, donde se verificó en base a la información de junio del 2018 a marzo del 2019 que existe un aumento en el material insoluble que se encuentra fuera del límite permisible por requerimiento de norma en el producto terminado. En la figura 1.1. se puede observar el aumento en el porcentaje promedio de las órdenes mensuales.

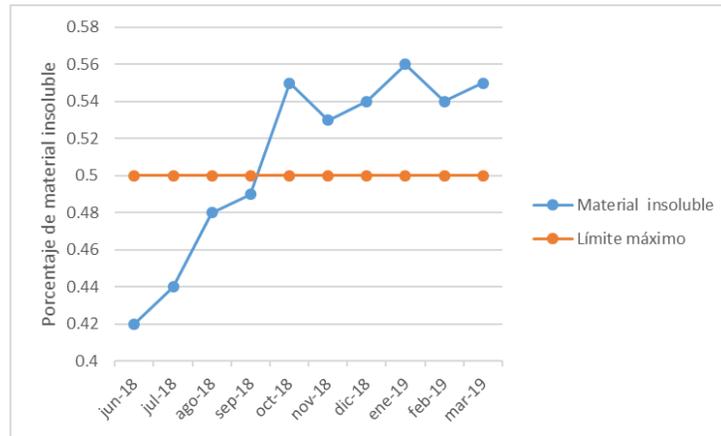


Figura 1.1 Serie de tiempos valor promedio mensual de material insoluble (M.I.)

1.1 Problemas de calidad y cuantificación de pérdidas

El material insoluble en el sulfato tipo A sólido se define como el porcentaje de materia prima que no reacciona bajo las condiciones normales de operación. Este material insoluble es básicamente hidróxido de aluminio (materia prima) sin reaccionar. Es importante mencionar que ninguna reacción química es perfecta por lo que siempre se tendrá un residual que no reacciona.

El aumento de material insoluble en el sulfato tipo A sólido causa una serie de problemas que se detallan a continuación:

- Reclamo de clientes: Presencia de sedimentos en tanques de disolución de sulfato de aluminio tipo A. Este exceso de material insoluble sedimenta en el fondo de los tanques lo que puede causar taponamientos de líneas u otro tipo de inconvenientes.
- Pérdida de mercado interno: El producto importado al tener una mejor calidad tiene más aceptación que la producción local lo cual disminuye la participación en el mercado. El departamento comercial ha establecido que potencialmente se puede dejar de vender más de \$80000 dólares mensuales por pérdida de clientes.
- Pérdida de mercado externo: Negociaciones de la compañía están garantizando oportunidades de exportación de sulfato tipo A sólido pero el alto porcentaje de material insoluble puede ser un factor decisivo al momento de concretar la venta.
- Costo de materia prima: Este material insoluble es materia prima sin reaccionar por lo cual todo el exceso que tiene es materia prima del cual no se obtuvo un beneficio económico.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción de la metodología

Six sigma es percibido como un concepto filosófico o de sentido amplio, su uso como filosofía ayuda a cambiar el mundo y la transformación de una empresa. Tratar esta metodología como una estrategia asegura el desarrollo y aumenta la posición de la empresa en el mercado (Taborski, 2010).

Esta metodología se basa en seis principios fundamentales que deben implementarse en las empresas que desean desarrollar y aumentar su posición en el mercado. El primer punto es la concentración en el cliente. Todas las acciones que se realicen deben estar de acuerdo con las especificaciones y los requisitos de los clientes. Six sigma también se basa en datos reales que se utilizan para realizar un análisis detallado enfocado en la mejora continua de todos los aspectos del desarrollo funcional en la organización, así como en la gestión y cooperación proactiva sin límites en todos los niveles de la empresa. Se debe subrayar que no solo es un enfoque para resolver los problemas de manufactura, sino también de procesos comerciales (Taborski, 2010).

La clave para poder implementar un proyecto six sigma en una industria tan particular como la química es tener muy claro el proceso a mejorar, conocer la cinética de la reacción que se tiene pensado analizar y asegurar un análisis profundo de los parámetros que afectan la velocidad de la reacción (Ashok, Jaideep, & Jiju, 2006).

El análisis de variables críticas en las reacciones químicas es la base para poder mejorar el control de calidad. Implementar control estadístico de procesos y que sea comprendido por todo el personal es clave para poder mantener los resultados esperados (Minjin , Young-Hak , In-Su, & Chonghun, 2003).

DMAIC es un acrónimo de las palabras Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar. Esta metodología se basa en la mejora del proceso según el ciclo de Deming (Sokovic, Pavletic, & Pipan, 2010).

A continuación, se detallan las cinco etapas de la metodología DMAIC:

Definición

La primera etapa de la metodología DMAIC es la de Definición, cuyo propósito principal es verificar si las acciones que deben tomarse para resolver los problemas están alineadas con las prioridades en la organización, que hay apoyo de la administración y disponibilidad de recursos necesarios.

Comienza con la identificación del problema que necesita una solución y termina con la comprensión de este problema, así como una clara evidencia de la supervisión de la gestión.

Hay muchas maneras de identificar un proyecto para mejora. En primer lugar, es mejor centrarse en factores externos, que crean el costo para la organización y toman acciones para eliminarlos y después resolver los problemas de costos internos. Una herramienta útil que ayuda a estrechar el problema puede ser el diagrama de Pareto (Shankar, 2009).

En esta etapa se usan herramientas para definir los objetivos como son:

- SIPOC – Es usado para la resolución de problemas, es una herramienta poderosa para el mapeo de procesos. Su nombre corresponde a los siguientes cinco elementos: proveedores (suppliers), entradas (input), proceso (process), salidas (output) y los clientes (customers) de cada proceso ((Marques, Requeijo, Saraiva, & Frazao-Guerreiro, 2013).
- VOC – Describe el proceso de capturar los requerimientos del cliente, el cual da información detallada de que es lo que el cliente necesita y quiere, esta información luego se prioriza según su importancia (Griffin & Hauser, 1991).
- CTQ's – Su nombre hace referencia a parámetros críticos para la calidad, que se obtiene del punto de vista del cliente.

Como parte primordial de la etapa de definición se debe crear el equipo de trabajo, el cual consta de un consejo directivo que genera y supervisa los objetivos del proyecto, un patrocinador que facilita los recursos necesarios y toma la decisiones de cambios en procesos para facilitar el desarrollo del proyecto, el jefe de proyecto se encarga de definir responsabilidades al equipo y se asegura de mantener las implementaciones logradas y los miembros del equipo que deben brindar todo el apoyo y seguir las órdenes del jefe de proyecto de lo que se necesite realizar.

En la etapa de definición, se deberán detectar condiciones estándares básicas del proceso y corregirlas previo a continuar con el proyecto, para evitar que estas intervengan en la medición y posterior análisis.

Medición:

La segunda etapa es la de medición, se refiere a la recopilación de información sobre los procesos que se van a mejorar y se enfoca en la información que se necesita para comprender mejor todos los procesos en la organización, las expectativas de los clientes, las especificaciones de los proveedores y la identificación de los posibles lugares donde puede ocurrir un problema.

Para esta etapa se puede realizar un mapa de procesos de la situación real y realizando el modo de falla y el análisis del efecto (FMEA) que indicará los lugares de posible riesgo. El tema principal de la fase de medición es recopilar y analizar los datos que se necesitarán en la fase de control para mostrar las diferencias y evaluar el progreso que se presentará a la administración. También es esencial evaluar el sistema de medición y garantizar que todos los datos sean veraces y se recopilen de manera adecuada (Shankar, 2009).

Análisis:

La tercera etapa es la de análisis, se utilizan diferentes herramientas y métodos para encontrar las causas fundamentales, evaluar el riesgo y analizar los datos. Para confirmar el análisis, se deben realizar algunas muestras y se debe demostrar que los problemas potenciales son problemas reales.

En esta fase es necesario definir la capacidad del proceso, aclarar los objetivos basados en datos reales obtenidos en la fase de medición y comenzar el análisis de la causa raíz que tiene un impacto en la variabilidad del proceso.

Mejora:

La cuarta etapa es la de mejora, con la información levantada en la etapa de análisis se realiza la implementación de las acciones propuestas de las causas raíces encontradas que afectan directamente a la variable a mejorar. Se deben medir una vez implementadas las mejoras para poder evidenciar que las acciones tomadas reducen el problema.

Control:

La quinta etapa es la de control, es acerca de la confirmación si los cambios implementados en la etapa de mejora son suficientes y continuos al verificar la calidad del proceso mejorado. Además, controla el estado futuro del proceso para minimizar la desviación de los objetivos y asegura que la corrección se implemente antes de que tenga una mala influencia en el resultado del proceso.

Se deben implementar sistemas de control como el control estadístico de procesos, el cual debe ser monitoreado continuamente. En esta fase, los gráficos de control se utilizan para identificar si el proceso es controlable o no (Smętkowska & Mrugalska, 2018).

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1 Etapa de Definición

En esta etapa se definió el problema, se justificó las razones o beneficios para la realización del proyecto, identificando el alcance del mismo, estableciendo los clientes, sus expectativas y sus requerimientos críticos.

3.1.1 Alcance

La empresa de producción de químicos donde se desarrolló el proyecto, fabrica algunos tipos de sulfato de aluminio, los parámetros que se miden son porcentaje de alúmina, basicidad y material insoluble.

El proyecto se enfoca en la mejora del porcentaje de material insoluble en el sulfato tipo A sólido, el cual se encuentra por encima del límite máximo. La empresa cuenta con 3 reactores de producción en el cual solo en el reactor 3 se produce el sulfato de aluminio tipo A.

En la tabla 1 se puede observar el promedio de los datos obtenidos de octubre del 2018 a marzo del 2019 donde el promedio de material insoluble es de 0.54 %.

Mes	Porcentaje promedio de material insoluble.
Octubre 2018	0.55
Noviembre 2018	0.53
Diciembre 2018	0.54
Enero 2019	0.56
Febrero 2019	0.54
Marzo 2019	0.55

Tabla 1. Valores promedio de porcentaje de material insoluble

3.1.2 Definición del Problema

Se definió el problema empleando la herramienta de 4W + 1H, presentada en la tabla 2.

Metodología: 4W +1H	
¿Qué?	Alto porcentaje de material insoluble en el sulfato de aluminio tipo A.
¿Dónde?	En el producto terminado.
¿A partir de cuándo?	Desde Octubre del 2018.
¿Cómo lo sé?	Mediante el análisis de los datos históricos de los últimos 10 meses.
How much?	Sobrepasando en un 9% el valor de 0.5% que es el máximo permitido.

Tabla 2. Definición del Problema 4W + 1H

Con esta herramienta se define que el problema es: Alto porcentaje de material insoluble en el producto terminado de sulfato de aluminio tipo A sólido. El porcentaje promedio actual es de 0.54%, cuando el valor máximo permitido es de 0.5%.

3.1.3 Objetivos

3.1.3.1 Objetivo General

Disminuir el porcentaje de material insoluble por debajo de 0.5% mediante la aplicación de metodología six sigma en el Sulfato Tipo A sólido.

3.1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar toma de datos del estado actual del proceso y mediante el análisis estadístico determinar su capacidad real.
- Identificar las causas raíz del problema mediante el uso de herramientas de calidad.
- Implementar mejoras en el proceso con la información obtenida del análisis de datos.
- Establecer nuevos sistemas de control para garantizar que las variables de interés cumplan con los parámetros establecidos.

3.1.4 Variable de Interés

Se ha definido una variable de interés que es: Porcentaje de material insoluble en el sulfato de aluminio tipo A sólido.

3.1.5 Selección de Equipo de Trabajo

Para la selección del equipo de trabajo primero se debe conocer el proceso y las personas que intervienen en el mismo. En el anexo A se presenta el diagrama del proceso de producción de sulfato de aluminio tipo A sólido y en el anexo B el SIPOC de este proceso.

En la tabla 3 se detallan los miembros del equipo, describiendo el rol y la función de desempeño.

Cargo	Rol	Función
Gerente General	Consejo Directivo	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar los avances del proyecto. • Garantizar disponibilidad de recursos y tiempos para la realización del proyecto. • Validar que los resultados obtenidos sean acordes a los objetivos planteados.
Gerente de Operaciones	Patrocinador	<ul style="list-style-type: none"> •Garantizar recursos y apoyo para el proyecto. •Tomar decisiones importantes en el proceso. •Ser el portavoz ante la directiva del proyecto. •Garantizar que se cumplan las implementaciones realizadas.
Jefe de Planta	Jefe de Proyecto	<ul style="list-style-type: none"> •Define el perfil y funciones de cada miembro del equipo. • Define responsabilidades adecuadamente. • Mantener las implementaciones logradas en el proyecto. • Capacitar al equipo y personal involucrado en el proyecto. • Reportar al patrocinador los avances y logros del proyecto.

Cargo	Rol	Función
Supervisor de Producción Operador de planta Supervisor de mantenimiento Coordinador de calidad Analista de calidad	Miembros de Equipo	<ul style="list-style-type: none"> • Brindar soporte en todas las actividades asignadas por el Jefe de proyecto. • Reportar cualquier anomalía que se presente durante cualquier etapa del proyecto.

Tabla 3. Roles y Funciones del Equipo de Trabajo

3.1.6 Principios Rectores

El sulfato de aluminio tipo A sólido solo se trabaja en el reactor número 3, ya que cada reactor tiene un diseño específico. Este proyecto no contempla modificaciones en diseños de equipos.

3.1.7 Resumen de la etapa de definición

Se presenta un resumen del proyecto empleando un project Charter en la tabla 4.

Carta del Proyecto	
Situación	Problema
De los valores obtenidos del porcentaje de material insoluble la mayoría está fuera de especificaciones.	Alto porcentaje de material insoluble en el sulfato de aluminio A sólido. Esto genera una posible pérdida de mercado de exportación valorado en cerca de US\$40000 dólares.
Meta	Alcance
Disminuir el porcentaje de material insoluble por debajo de 0.5% mediante la aplicación de metodología six sigma para la producción de Sulfato Tipo A sólido.	Este proyecto se enfoca en la producción del sulfato de aluminio tipo A sólido, desde la dosificación de materias primas, reacción, reposo en el reactor 3.
Miembros del Equipo	Línea de Tiempo
Gerencia General: Consejo Directivo Gerente de Operaciones: Patrocinador Jefe de Planta: Jefe de Proyecto Miembros del Equipo: Supervisor de Producción Operador de planta Supervisor de mantenimiento Analista de calidad Coordinador de calidad.	Levantamiento de Información: octubre 2018- marzo 2019. Etapa de mediciones: Abril-2019. Etapa de análisis: primera y segunda semana de mayo 2019 Etapa de mejora: Junio y Julio- 2019. Etapa de análisis: primera y segunda semana de mayo 2019. Etapa de mejora: Junio y Julio- 2019. Etapa de control: Segunda quincena de Julio y Agosto 2019.

Tabla 4. Carta Resumen del Proyecto

3.1.8 VOC (Voz del Cliente)

Como parte de la investigación primaria se determinó quienes son los involucrados en el problema a resolver. Se definió si existen expertos y los lugares implicados.

Planteamientos Previos	Disminución de la Cantidad de material insoluble en el Sulfato de Aluminio
¿Quiénes son los expertos en el tema, si los hay?	Operadores de Reacción.
¿Quiénes son los actores involucrados?	Jefe de Planta, Operadores y Analista de Calidad
¿Cuáles son los lugares implicados?	Reactores y Laboratorio de Calidad

Tabla 5. Planteamientos previos

Se empleó la metodología VOC con los expertos en la producción de sulfato de aluminio, de esta manera se determinó los posibles factores que influyen en el aumento de material insoluble en el sulfato A. En la siguiente tabla se muestra los hallazgos encontrados.

Alto porcentaje de material insoluble	
Segmento	Hallazgos
Calibración de Equipos	Se emplean equipos que miden las materias primas que se dosifican en los reactores. Cantidades equivocadas en la dosificación puede causar una deficiente reacción.
Estandarización de Procesos	La no estandarización de la reacción de producción puede causar errores entre operadores.
Velocidad de agitación	La velocidad de agitación puede influir en la reacción de sulfato permitiendo que la materia prima reaccione mejor.
Variación en tiempo de agitación	El tiempo de agitación que se da a la reacción de sulfato es parte importante para que la eficiencia sea la más alta.
Cantidad de Hidróxido agregado	La cantidad de hidróxido agregado en la reacción puede variar por problemas en calibración de equipos.
Cantidad de Agua agregada	La cantidad de agua agregada en la reacción puede variar por problemas en calibración de equipos.
Cantidad de Ácido agregado	La cantidad de ácido agregado en la reacción puede variar por problemas en calibración de equipos.

Tabla 6. VOC Aumento de material insoluble

3.2 Etapa de Medición

En la etapa de medición se determinaron indicadores para la medición para los X's probables determinados en el análisis de VOC. Se elaboró un plan de recolección de datos para la obtención de la información.

3.2.1 Matriz de Selección de Mediciones

En la tabla 7 se muestra los indicadores que fueron establecidos para los X probables que pueden afectar el porcentaje de material insoluble.

Y	Objetivo
Porcentaje de material insoluble en el sulfato de aluminio tipo A sólido.	Disminuir el porcentaje de material insoluble por debajo de 0.5% por motivos de variaciones de proceso.
X probables	Indicadores por variación de procesos
Cumplimiento del 100% de calibraciones de equipos de medición.	Porcentaje de material insoluble garantizando equipos calibrados.
Estandarización de procesos de producción.	Porcentaje de material insoluble garantizando estandarización de la producción.
Velocidad de agitación	Velocidad de agitación de la reacción.
Tiempo de agitación	Tiempo de agitación de la reacción.
Cantidad de Hidróxido agregado	Kilos de hidróxido agregado al reactor.
Cantidad de Agua agregada	Kilos de agua agregada al reactor.
Cantidad de Ácido agregado	Kilos de ácido agregado al reactor.

Tabla 7 Matriz de selección de mediciones

3.2.2 Período de toma de datos

Los datos de los indicadores que se tomaron a partir de los X's probables fueron medidos bajo un plan de recolección de datos, para validar la información obtenida en el VOC de los clientes. El periodo de toma de datos comprende desde el 1 al 30 de abril del 2019 y se tomó el porcentaje de material insoluble en el sulfato tipo A.

3.2.3 Condiciones estándares básicas

Antes de realizar la toma de los datos se realizó una revisión a los procesos identificando que existe una falencia en cuanto a la calibración de los equipos. Se evidenció que existen varios avisos al área de mantenimiento por descalibración de las balanzas de dosificación del hidróxido.

En la tabla 8, se detallan las acciones tomadas para corregir las novedades encontradas para asegurar la recolección de los datos.

Condiciones estándares básicas	Acción	Responsable
Asegurar la correcta calibración de los equipos de pesaje y dosificadores de materias primas.	1. Se realizó la calibración de todos los equipos de pesaje y dosificadores. 2. Se realizaron verificaciones diarias de las balanzas para asegurar el pesaje de las materias primas.	Supervisor de producción Jefe de planta Supervisor de mantenimiento

Tabla 8 Acciones Just Do It

3.2.4 Plan de recolección de datos.

En la tabla 9 se muestra el plan de recolección de datos propuesto el cual fue socializado y discutido por los miembros del proyecto acorde al periodo establecido, cada lote de producción tiene una cantidad estándar de materias primas la cual no varía y una velocidad de agitación constante.

Indicadores por Porcentaje de material insoluble						
Métrica	Tipo de variable	Unidad	¿Por qué es necesario recolectar?	Periodo de toma de información	¿Dónde se encuentra la información?	Responsable de la Recolección
Porcentaje de material insoluble por lote	Cuantitativa Continua	Porcentaje	Indicador de la eficiencia de la reacción.	Todos los lotes del 1 al 30 de Abril del 2019	Registro de parámetros de calidad	Analista de calidad / Jefe de Planta
Tiempo de agitación por lote	Cuantitativa Continua	Minutos	Afectación en la eficiencia de la reacción.	Todos los lotes del 1 al 30 de Abril del 2019	Formato de Reacción	Supervisor de Planta / Jefe de Planta
Velocidad de agitación por lote	Cuantitativa Continua	RPM	Afectación en la eficiencia de la reacción.	Todos los lotes del 1 al 30 de Abril del 2019	Formato de Reacción	Supervisor de Planta / Jefe de Planta
Cantidad de Hidróxido agregado en cada lote	Cuantitativa Continua	Kilogramos	Afectación en la eficiencia de la reacción.	Todos los lotes del 1 al 30 de Abril del 2019	Formato de Reacción	Supervisor de Planta / Jefe de Planta
Cantidad de ácido agregado en cada lote	Cuantitativa Continua	Kilogramos	Afectación en la eficiencia de la reacción.	Todos los lotes del 1 al 30 de Abril del 2019	Formato de Reacción	Supervisor de Planta / Jefe de Planta
Cantidad de agua agregada en cada lote	Cuantitativa Continua	Kilogramos	Afectación en la eficiencia de la reacción.	Todos los lotes del 1 al 30 de Abril del 2019	Formato de Reacción	Supervisor de Planta / Jefe de Planta

Tabla 9 Plan de recolección de Datos

3.2.5 Validación de datos

Se realizó la validación de la información levantada durante la toma de datos, se aseguró durante la producción las verificaciones diarias de las balanzas para garantizar el correcto pesado.

Se verificó la información de tiempos de agitación, velocidad de agitación, cantidad de materias primas empleadas en cada lote realizado, asegurando que los datos colocados en los formatos físicos de reporte de reacciones son los reales. Se validó que los datos tomados físicamente sean consistentes a los cargados en el sistema asegurando la información de la toma de datos.

La compañía donde se realizó el proyecto de mejora no autorizó la toma de fotos de equipos, proceso productivo ni otro tipo de documento del sistema de gestión.

3.2.6 Datos Recolectados

Terminada la recolección de los datos por el mes de abril se logró obtener la información del porcentaje de material insoluble de 79 lotes.

La figura 3.1 muestra los datos obtenidos durante el periodo de recolección de datos, se observa que la mayor parte de los datos están fuera del límite superior de 0.5%.

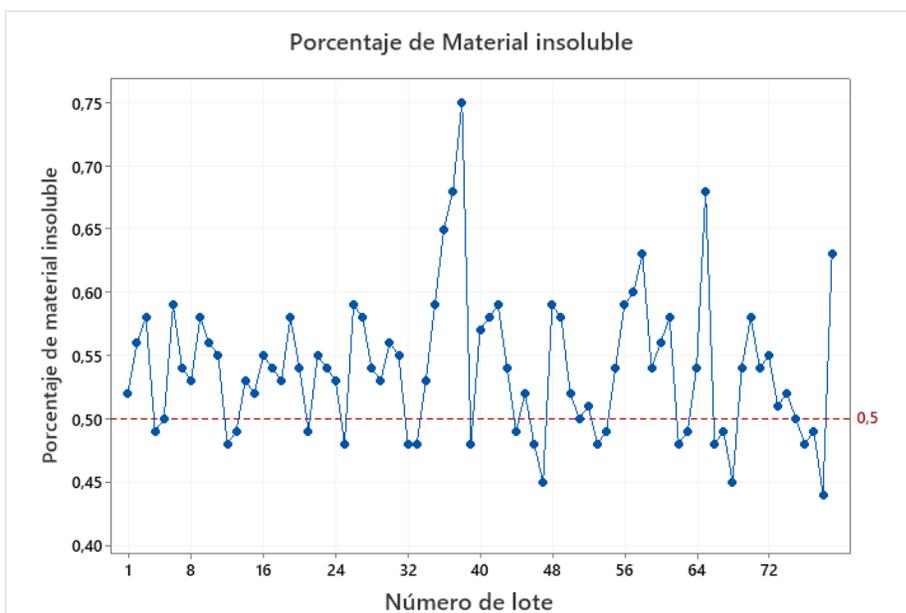


Figura 3.1 Serie de Porcentaje de material insoluble

En la Figura 3.2 se observa el resumen de los datos analizados indicando que la media de los datos es de 0.54%. El valor $p < 0.05$ confirma la no normalidad de los datos.

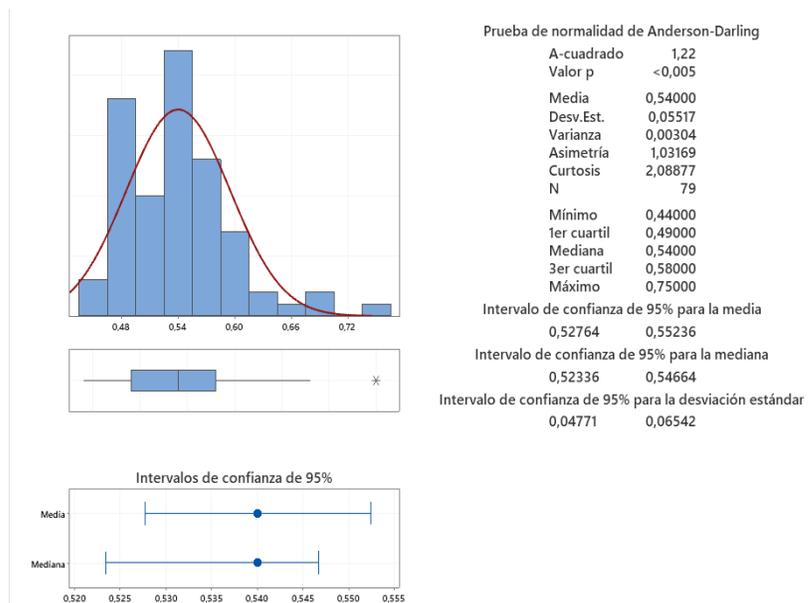


Figura 3.2 Resumen de datos estadísticos.

En la figura 3.3 se observa el análisis de capacidad obtenido de los 79 lotes producidos. Los datos obtenidos son no normales por lo que se usó la transformada de Box-Cox para normalizarlos.

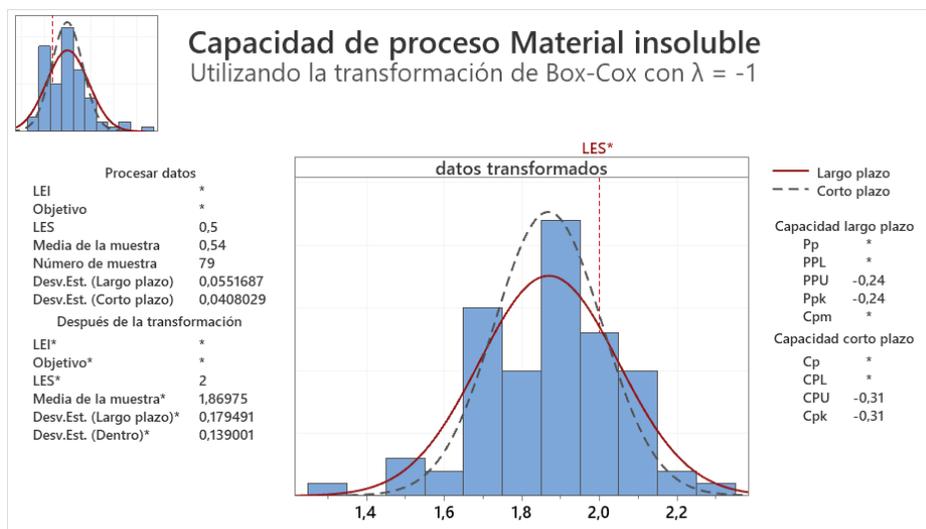


Figura 3.3 Capacidad del proceso Material insoluble

En la figura 3.3 se evidencia un valor de Cpk de -0.31 lo cual indica que el proceso no es capaz de cumplir con las especificaciones ya que la media de los datos está por encima del límite superior.

En la figura 3.4 se observa el resumen estadístico de los tiempos de agitación de los 79 lotes de producción, donde se observa una media de 41.73 minutos.

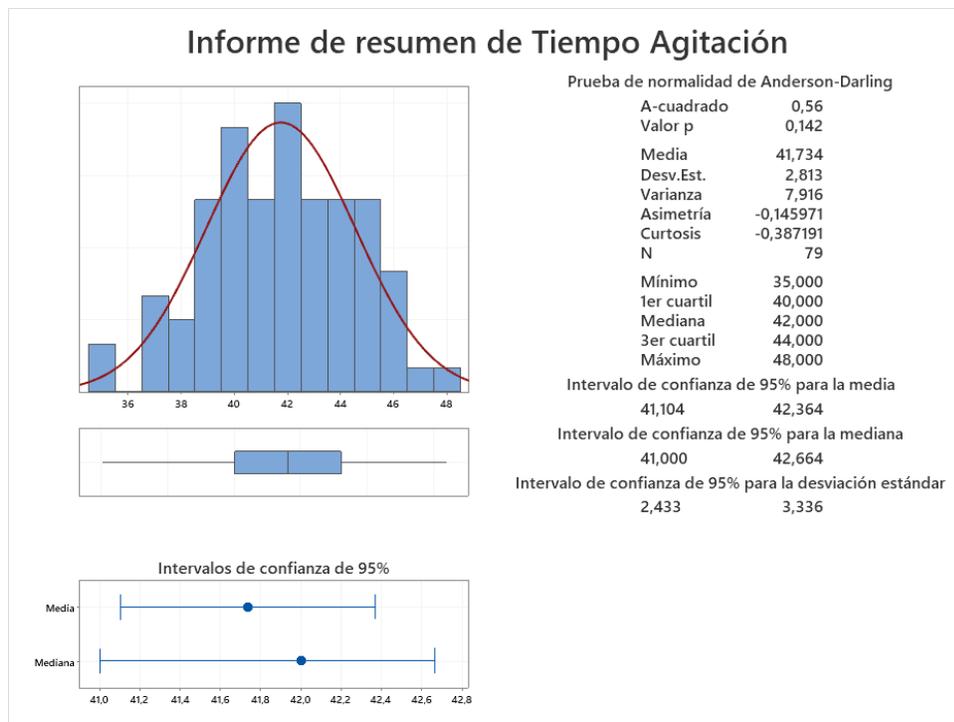


Figura 3.4 Resumen estadístico tiempo de agitación

Se realizó un análisis de correlación entre el porcentaje de material insoluble y el tiempo de agitación, dando como resultado un coeficiente de correlación de -0.729 indicando que tiene una correlación. Entre mayor es el tiempo de agitación menor es el porcentaje de material insoluble.

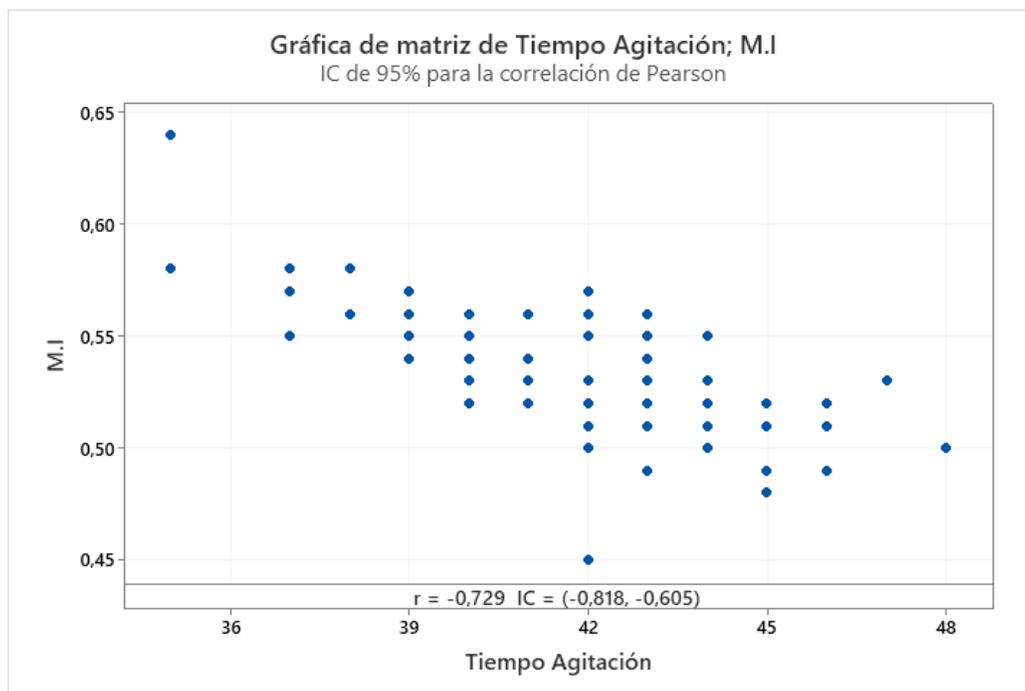


Figura 3.5 Correlación porcentaje de material insoluble y tiempo de agitación.

En la Figura 3.6 se observa un resumen estadístico de las mediciones de la cantidad de agua agregada a los 79 lotes de producción.

Estadísticas

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
H2O	79	0	3006,7	0,957	8,51	3000,0	3000,0	3005,0	3010,0	3035,0

Figura 3.6 Resumen estadístico Cantidad de agua agregada en los 79 lotes

Se realizó un análisis de correlación para verificar la influencia de la variación de pesos de agua en el porcentaje de material insoluble obteniendo un coeficiente de correlación de 0.104 el cual indica que no existe influencia de la variación de la cantidad agregada de agua.

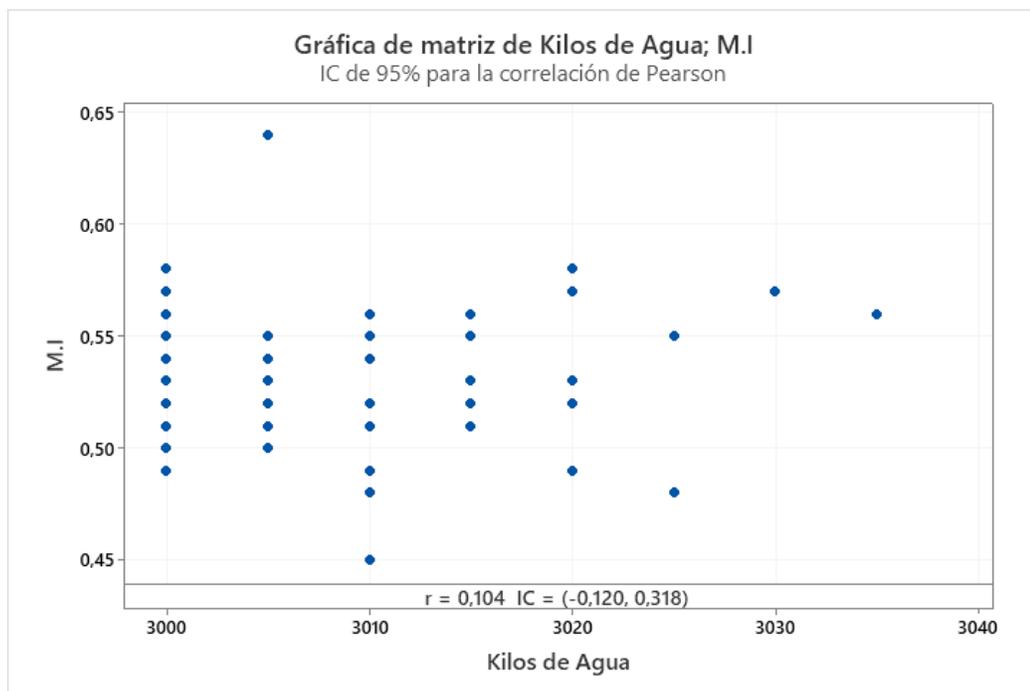


Figura 3.7 Correlación porcentaje de material insoluble y agua agregada

En la figura 3.8 se observa el resumen estadístico de la cantidad de ácido agregada los 79 lotes de producción y en la figura 3.9 se presenta el análisis de correlación obteniendo un coeficiente de correlación de 0.061 el cual indica que no existe relación con la variación del material insoluble.

Estadísticas

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Ácido	79	0	2849,8	0,277	2,46	2845,0	2850,0	2850,0	2850,0	2855,0

Figura 3.8 Resumen estadístico Cantidad de ácido agregada en los 79 lotes

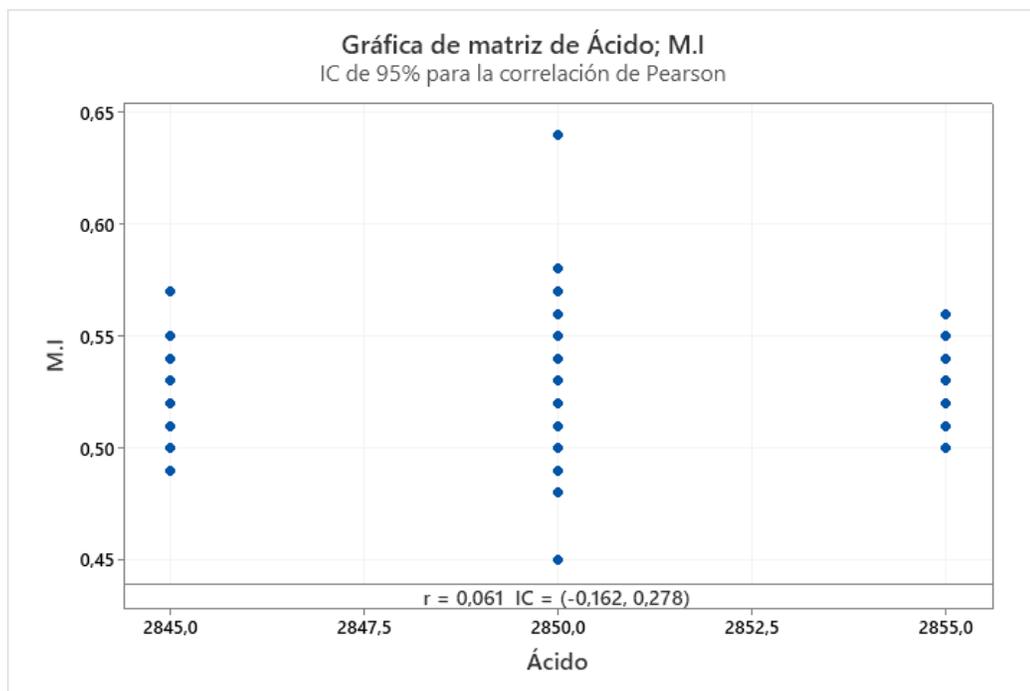


Figura 3.9 Correlación porcentaje de material insoluble y ácido agregado

En la figura 3.10 se observa el resumen estadístico de la cantidad de hidróxido agregado los 79 lotes de producción y en la figura 3.11 se presenta el análisis de correlación obteniendo un coeficiente de correlación de -0.098 el cual indica que no existe relación con la variación del material insoluble.

Estadísticas

Variable	N	N*	Media	media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Hidróxido	79	0	2408,7	1,22	10,9	2400,0	2400,0	2405,0	2415,0	2450,0

Figura 3.10 Resumen estadístico Cantidad de hidróxido agregada en los 79 lotes

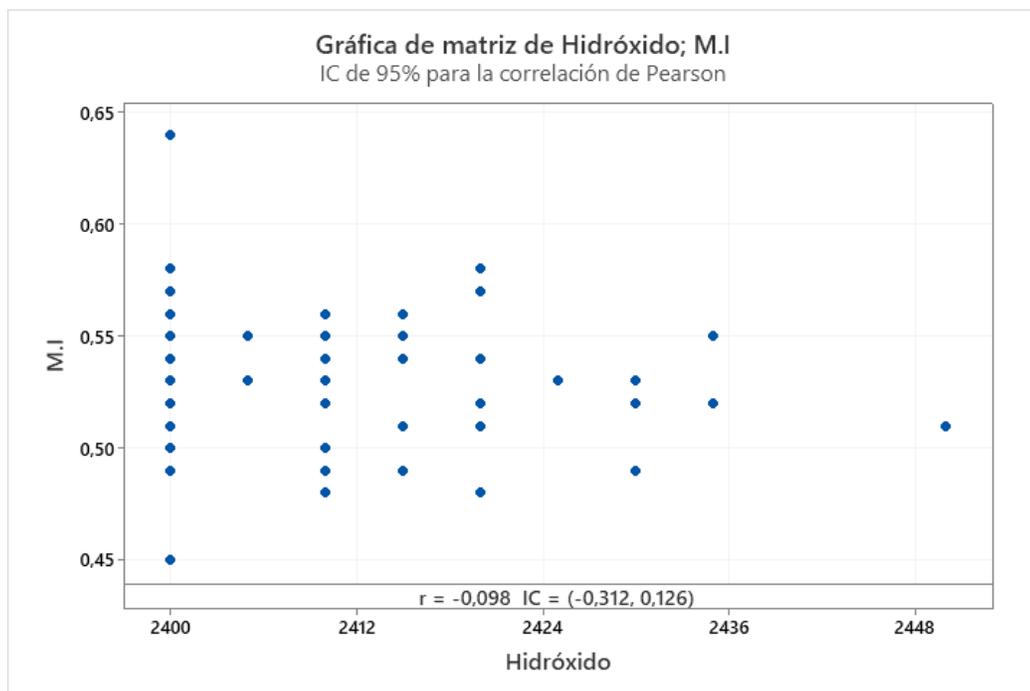


Figura 3.11 Correlación porcentaje de material insoluble e hidróxido agregado

3.3 Etapa de Análisis

3.3.1 Análisis Ishikawa

Para este análisis participaron los siguientes miembros del proyecto: Gerente de operaciones, Jefe de planta, supervisor de producción, supervisor de mantenimiento, analista de calidad y operadores de reacción, se revisaron todas las causas potenciales que pueden generar el alto porcentaje de material insoluble.

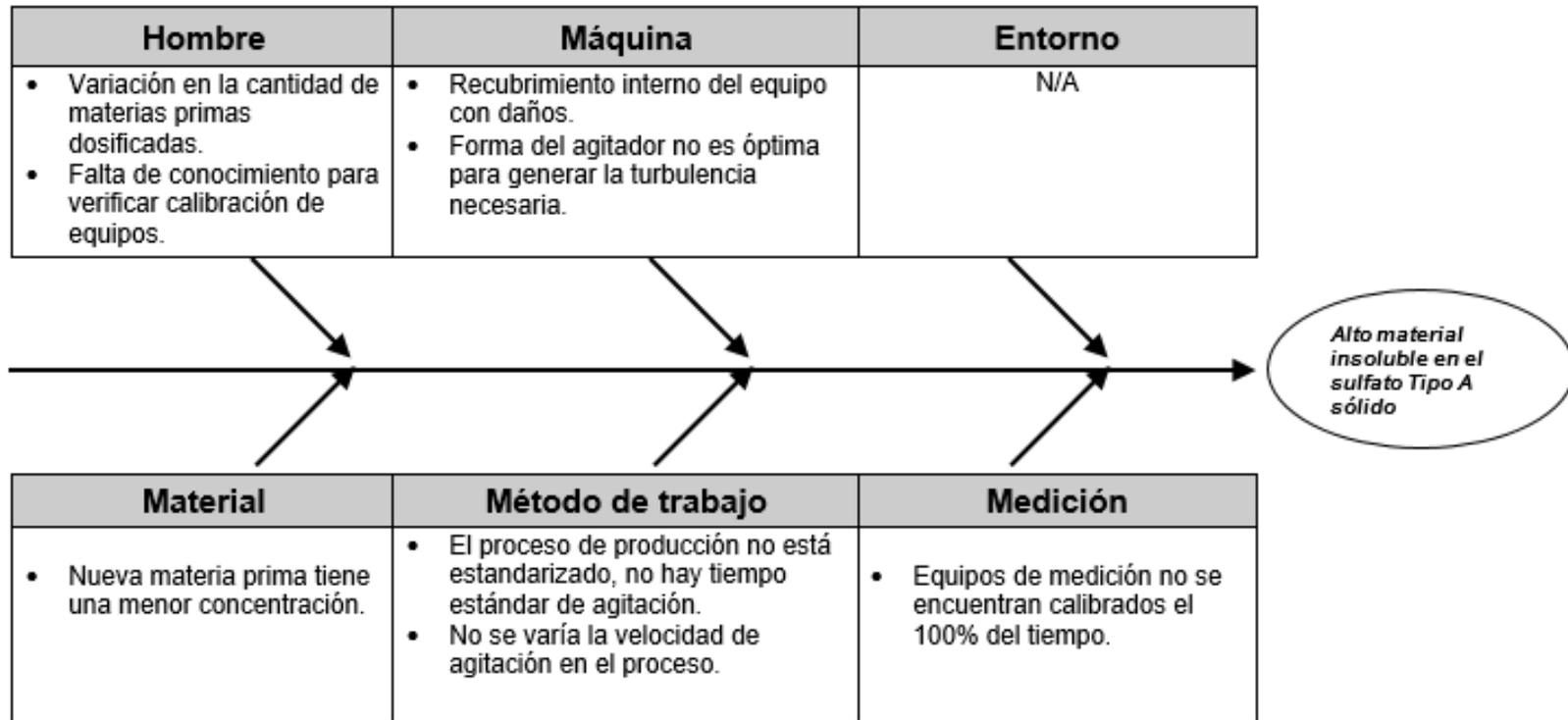


Figura 3.12 Análisis de Ishikawa para alto porcentaje de material insoluble

3.3.2 Matriz Causa Efecto

Se realizó una calificación del impacto que tienen las X's sobre la variable Y que es el porcentaje de material insoluble. Se contó con el mismo equipo de trabajo con el que se realizó el análisis de Ishikawa para esta calificación.

Se realizó la calificación en base a la frecuencia de las novedades y magnitud en la afectación del porcentaje de material insoluble.

Los criterios de influencia y ponderaciones considerados son las siguientes:

- **Frecuencia (Peso: 5)**
 - Valor de 0 cuando no ocurre.
 - Valor de 1 cuando ocurre en menos del 25% de los lotes realizados.
 - Valor de 3 cuando ocurre entre el 25% y 50% de los lotes realizados.
 - Valor de 9 cuando ocurre más del 75% de los lotes realizados.

- **Magnitud (Peso: 5)**
 - Valor de 0 cuando afecta no afecta.
 - Valor de 1 cuando afecta en menos del 25% de los lotes realizados.
 - Valor de 3 cuando afecta entre el 25 y 75% de los lotes realizados.
 - Valor de 9 cuando afecta a más del 75% de los lotes realizados.

Las causas potenciales que obtuvieron un valor mayor a 60 son consideradas para el análisis posterior.

Potenciales Causas (X's)		Frecuencia (5)	Magnitud (5)	Resultado	Observaciones
Aumento de porcentaje de material insoluble	Variación en la cantidad de materias primas dosificadas.	3	1	20	No ocurre con mucha frecuencia y no afecta significativamente en el material insoluble.
	Falta de conocimiento para verificar calibración de equipos.	3	3	30	La descalibración de los equipos no ocurre con tanta frecuencia, la variación en la dosificación no afecta significativamente el material insoluble.
	Recubrimiento interno del equipo con daños.	1	3	20	Cuando el reactor presenta problemas en el recubrimiento se coordina una parada para realizar la reparación por lo que no afecta a un número grande de reacciones.

Potenciales Causas (X's)	Frecuencia (5)	Magnitud (5)	Resultado	Observaciones
Forma del agitador no es la óptima para generar la turbulencia necesaria.	3	1	20	No está comprobado que la forma del agitador afecte el aumento del material insoluble, el personal de mantenimiento no lo ve como una problema.
Nueva materia prima tiene una menor concentración.	9	0	45	Se constató que existe una ligera disminución en la concentración de hidróxido en la materia prima pero cumple los parámetros de calidad exigidos por lo que no se considera que afecte al aumento de material insoluble.
Insuficiente tiempo de agitación	9	9	90	El tiempo de agitación afecta la eficiencia de la reacción por lo que tiene un gran impacto en el aumento del material insoluble, al no estar estandarizado afecta a todos los lotes.
Insuficiente velocidad de agitación	9	9	90	La velocidad de la agitación afecta directamente a la eficiencia de la reacción, al no estar estandarizado afecta a todos los lotes que se producen.
Equipos de medición no se encuentran calibrados el 100% del tiempo.	3	3	30	No se realiza una validación de los equipos diaria para asegurar la correcta dosificación de las materias primas. La variación en la dosificación no afecta significativamente el porcentaje de material insoluble.

Tabla 10 Matriz Causa – Efecto

3.3.3 Plan de verificación de Causas

Se elaboró un plan de verificación de las causas potenciales para el aumento del porcentaje de material insoluble, este se detalla en la tabla 11.

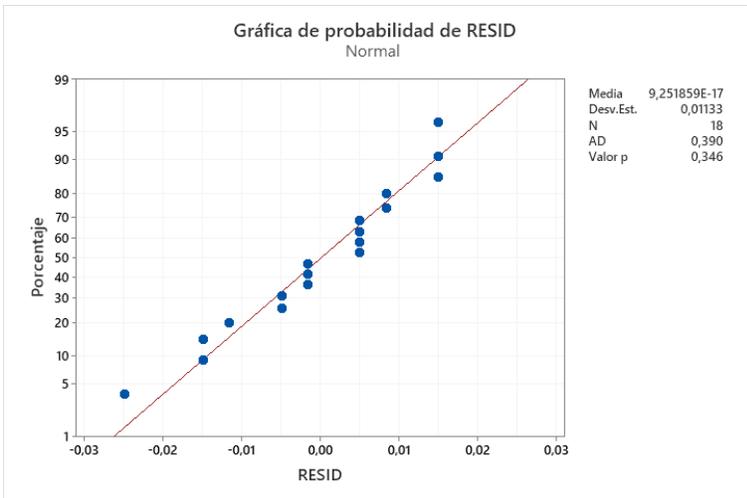
Aumento Porcentaje Material Insoluble				
Causa Potencial X	Explicación	¿Cómo verificarla?	¿Quién verificará?	¿Cuándo verificará?
Baja velocidad de agitación.	La velocidad de agitación puede influir directamente a la velocidad y eficiencia de la reacción.	Chequeo de RPM del agitador en los lotes. Anova de 1 factor con 3 niveles de velocidad.	Supervisor de procesos/ jefe planta	1-8 Mayo/2019
Bajo tiempo de agitación.	El tiempo de agitación afecta en la eficiencia de la reacción y asegura el consumo de las materias primas.	Medición de los tiempos de agitación. Anova de 1 factor con 3 niveles de tiempo.	Analista de calidad / Jefe de planta	8-15 Mayo/2019

Tabla 11 Plan verificación del aumento material insoluble

3.3.4 Verificación de causas del aumento del porcentaje de material insoluble.

Una vez se completó la verificación de las posibles X's del aumento del porcentaje de material insoluble se obtiene la siguiente información en la tabla 12:

Aumento material insoluble	
Causa Potencial	Resultado de Verificación
Falta de velocidad del agitador del reactor	<p>Se realizó un análisis de Anova de un solo factor con 3 niveles para verificar la influencia de la velocidad de agitación con el porcentaje de material insoluble. Para el análisis se usaron las velocidades de 60, 70 y 80 RPM.</p> <div style="text-align: center;"> <p>Gráfica de caja de M.I.</p> </div> <p>La gráfica de cajas muestra el comportamiento de las pruebas que se realizaron, se verifica que la prueba a 80 RPM es la que menor porcentaje de material insoluble tiene.</p> <div style="text-align: center;"> <p>Gráfica de intervalos de M.I. vs. METODO 95% IC para la media</p> <p><i>La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.</i></p> </div>

Aumento material insoluble																									
Causa Potencial	Resultado de Verificación																								
Falta de velocidad del agitador del reactor	<p>En la gráfica de intervalos se evidencia que hay un traslape entre la prueba a 60 y 70 rpm lo que supone que las medias poblacionales son estadísticamente iguales.</p> <p>Método</p> <p>Hipótesis nula Todas las medias son iguales Hipótesis alterna No todas las medias son iguales Nivel de significancia $\alpha = 0,05$</p> <p style="text-align: center;"><i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.</i></p> <p>Análisis de Varianza</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Fuente</th> <th>GL</th> <th>SC Ajust.</th> <th>MC Ajust.</th> <th>Valor F</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>METODO</td> <td>2</td> <td>0,008044</td> <td>0,004022</td> <td>27,63</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>15</td> <td>0,002183</td> <td>0,000146</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>17</td> <td>0,010228</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Con el valor de p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula de que todas las medias son iguales.</p> <p>Se comprueba la normalidad de los residuos, la igualdad de varianzas e independencia de residuos.</p> <div style="text-align: center;">  </div>	Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	METODO	2	0,008044	0,004022	27,63	0,000	Error	15	0,002183	0,000146			Total	17	0,010228			
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p																				
METODO	2	0,008044	0,004022	27,63	0,000																				
Error	15	0,002183	0,000146																						
Total	17	0,010228																							

Aumento material insoluble	
Causa Potencial	Resultado de Verificación
Falta de velocidad del agitador del reactor	<div style="text-align: center;"> <p>Prueba de igualdad de varianzas: M.I vs. METODO</p> <p>Prueba de Bartlett Valor p 0,249</p> <p>Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para Desv.Est.</p> </div> <p>Conclusión: En base al análisis realizado se determina que la velocidad de agitación influye directamente en la cantidad de material insoluble y a mayor velocidad más eficiente es la reacción y menor el porcentaje de material insoluble. Se deben realizar pruebas a mayor velocidad para determinar la óptima.</p>
Variación tiempos de agitación	<p>Para verificar como influye el tiempo de agitación con el porcentaje de material insoluble se ejecutó un análisis de Anova realizando variaciones en el tiempo de agitación.</p> <div style="text-align: center;"> <p>Gráfica de caja de M.I.</p> </div>

Aumento material insoluble																	
Causa Potencial	Resultado de Verificación																
Variación tiempos de agitación	<p>Del gráfico de cajas se observa la diferencia de medias entre los 3 métodos probados y se puede apreciar que la prueba a 45 minutos es la que menor porcentaje de material insoluble genera.</p> <div style="text-align: center;"> <p>Gráfica de intervalos de M.I vs. METODO 95% IC para la media</p> <table border="1"> <caption>Datos extraídos del gráfico de intervalos</caption> <thead> <tr> <th>Método</th> <th>Media (M.I.)</th> <th>Intervalo Inferior (95% IC)</th> <th>Intervalo Superior (95% IC)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T 35</td> <td>0.548</td> <td>0.539</td> <td>0.557</td> </tr> <tr> <td>T 45</td> <td>0.518</td> <td>0.508</td> <td>0.528</td> </tr> <tr> <td>T 30</td> <td>0.562</td> <td>0.552</td> <td>0.572</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.</small></p> </div> <p>En la gráfica de intervalos se evidencia que hay un traslape entre la prueba a 30 y 35 minutos lo que supone que las medias poblacionales son estadísticamente iguales.</p> <p>Método</p> <p>Hipótesis nula Todas las medias son iguales Hipótesis alterna No todas las medias son iguales Nivel de significancia $\alpha = 0,05$</p> <p style="text-align: center;"><i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.</i></p>	Método	Media (M.I.)	Intervalo Inferior (95% IC)	Intervalo Superior (95% IC)	T 35	0.548	0.539	0.557	T 45	0.518	0.508	0.528	T 30	0.562	0.552	0.572
Método	Media (M.I.)	Intervalo Inferior (95% IC)	Intervalo Superior (95% IC)														
T 35	0.548	0.539	0.557														
T 45	0.518	0.508	0.528														
T 30	0.562	0.552	0.572														

Aumento material insoluble																									
Causa Potencial	Resultado de Verificación																								
Variación tiempos de agitación	<h3 style="color: #0070C0;">Análisis de Varianza</h3> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-decoration: underline;">Fuente</th> <th style="text-decoration: underline;">GL</th> <th style="text-decoration: underline;">SC Ajust.</th> <th style="text-decoration: underline;">MC Ajust.</th> <th style="text-decoration: underline;">Valor F</th> <th style="text-decoration: underline;">Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>METODO</td> <td>2</td> <td>0,006411</td> <td>0,003206</td> <td>25,31</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>15</td> <td>0,001900</td> <td>0,000127</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>17</td> <td>0,008311</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Con el valor de p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula de que todas las medias son iguales.</p> <p>Se comprueba la normalidad de los residuos, la igualdad de varianzas e independencia de residuos.</p> <div style="text-align: center;"> </div>	Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	METODO	2	0,006411	0,003206	25,31	0,000	Error	15	0,001900	0,000127			Total	17	0,008311			
	Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p																			
	METODO	2	0,006411	0,003206	25,31	0,000																			
	Error	15	0,001900	0,000127																					
	Total	17	0,008311																						

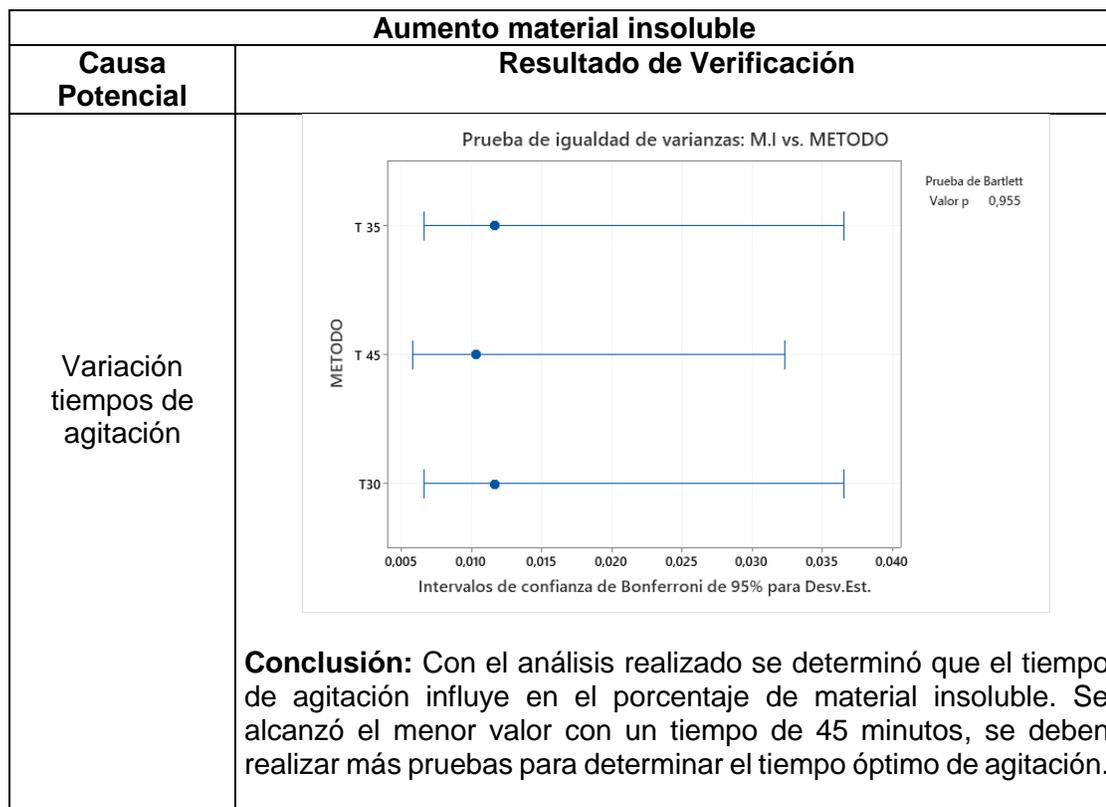


Tabla 12 Verificación de causas de aumento de material insoluble

3.3.5 Análisis de las causas verificadas

Se empleó la herramienta de 5 ¿Por qué? Para el análisis de las causas verificadas. En la tabla 13 se aprecia el análisis realizado.

Aumento % Material Insoluble					
X Críticas	¿Por qué?				
	1	2	3	4	5
1. Velocidad del agitador insuficiente.	Operadores no modifican la velocidad del agitador.	No se encuentra establecido en el procedimiento la velocidad de trabajo óptima.	No se ha determinado la velocidad de trabajo óptima del proceso.		
2. Tiempo de agitación no es el suficiente.	Los operadores no controlan el tiempo de agitación.	No se encuentra establecido en el procedimiento el tiempo reacción óptima.	No se ha determinado el tiempo de trabajo óptimo del proceso.		

Tabla 13 Análisis 5 ¿Por qué? Por aumento de material insoluble

3.4 Etapa de Mejora

Para la implementación de las mejoras se diseñó un plan de acción para eliminar las causas potenciales detectadas en la etapa de análisis. En la tabla 14 se detallan las mejoras planteadas.

Plan de Mejora				
Causa Raíz	Propuestas de Mejora	Responsables	Tiempo requerido	Costo
Falta de velocidad de agitación.	PM1. Determinación de la velocidad óptima de agitación.	Gerente de operaciones Jefe de Planta	15 días	\$0
	PM2. Estandarización del proceso de producción.	Analista de calidad Supervisor de Producción.		
Existe variación en el tiempo de agitación de las reacciones. Los operadores no mantienen constante el tiempo de agitación y lo varían según experiencia.	PM3. Determinar el tiempo de agitación óptimo.	Gerencia de Operaciones.	15 días	\$0
		Jefe de planta		
		Analista de calidad.		
		Supervisor de producción		
	Jefe de Planta			
PM4. Capacitar a los operadores para realizar la calibración y verificación de los equipos.	Supervisor de mantenimiento			
PM5. Modificar el reporte de reacciones para incluir la verificación y calibración de equipos.	Analista de calidad			
	Supervisor de producción			

Tabla 14 Plan de acción para mejoras en el porcentaje de material insoluble

3.4.1 Propuestas de mejora

El detalle de las propuestas de mejora para optimizar el porcentaje de material insoluble se detalla a continuación:

PM1. Determinación de la velocidad óptima de agitación.

Situación Actual: La agitación durante la etapa de reacción en la producción de sulfato de aluminio tipo A sólido es crucial. Los operadores tienen el variador del motor a su alcance, pero por falta de estandarización no varían la velocidad.

Propuesta: Determinar la velocidad óptima para obtener el mejor rendimiento en la reacción relacionando los RPM del agitador con el porcentaje de material insoluble.

PM2. Determinar el tiempo de agitación óptimo.

Situación Actual: El tiempo de la agitación durante la etapa de reacción en la producción de sulfato de aluminio tipo A sólido es crucial. Los operadores no manejan un tiempo estándar de agitación, el mismo operador varía el tiempo de agitación.

Propuesta: Determinar el tiempo óptimo para obtener el mejor rendimiento en la reacción relacionando los de agitación versus el porcentaje de material insoluble.

PM3. Estandarización del proceso de producción.

Situación Actual: El documento del proceso productivo de sulfato de aluminio tipo A sólido no detalla la velocidad ni el tiempo que deben emplearse para la producción.

Propuesta: Modificar el procedimiento de producción de sulfato de aluminio tipo A sólido para incluir la velocidad óptima de la reacción y el tiempo de agitación.

PM4. Capacitar a los operadores para realizar la calibración y verificación de los equipos.

Situación Actual: Los operadores no pueden realizar las calibraciones ni verificaciones de las balanzas lo cual no permite que se den cuenta si los equipos se encuentran descalibrados.

Propuesta: Capacitar a los operadores para realizar verificaciones y calibraciones de las balanzas que se usan para la producción de sulfato de aluminio.

PM5. Modificar el reporte de reacciones para incluir la verificación y calibración de equipos.

Situación Actual: El reporte de reacción no tiene un área donde pueda colocarse la verificación y calibración de los equipos en caso de ser necesarios.

Propuesta: Modificar el reporte de reacciones colocando un área donde se puede colocar información de la verificación y la calibración en caso de ser necesaria. Con esto se genera un compromiso con los operadores de la importancia de estas revisiones.

3.4.2 Análisis e implementación de propuestas de mejora

Debido a que las propuestas de mejora no requieren de inversión económica y solo necesitan de cambios de procedimientos, formatos y de investigación para encontrar parámetros óptimos de operación todas las propuestas de mejora fueron aprobadas por el equipo del proyecto.

Se definió el orden para la realización de las propuestas como se detalla en la tabla 15:

Actividad	Responsables	Inicio del plan	Tiempo requerido	Porcentaje de cumplimiento	Mayo				Junio				Julio		
					19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
PM4. Capacitar a los operadores para realizar la calibración de los equipos.	Supervisor de mantenimiento	15/5/2019	7 días	100%											
PM5. Modificar el reporte de reacciones para incluir la realización de la verificación y calibración.	Supervisor de producción /Analista de calidad	15/5/2019	3 días	100%											
PM1.Determinación de la velocidad óptima de agitación.	Jefe de Planta/Supervisor de producción / Analista de calidad	27/5/2019	15 días	100%											
PM3. Determinar el tiempo de agitación óptimo.	Jefe de Planta/Supervisor de producción / Analista de calidad	17/6/2019	15 días	100%											
PM2. Estandarización del proceso de producción.	Jefe de Planta/Supervisor de producción / Analista de calidad	8/7/2020	7 días	100%											

Tabla 15 Cronograma de implementación de mejoras

PM4. Capacitar a los operadores para realizar la calibración y verificación de los equipos.

La capacitación al personal operativo fue impartida por los técnicos de instrumentación los cuales realizaron actividades teóricas y prácticas asegurando la confiabilidad de la calibración.

Estas capacitaciones fueron detalladas dentro del registro de capacitación de operación y se agregó en la matriz de conocimientos de los operadores de reacción.

PM5. Modificar el reporte de reacciones para incluir la realización de la verificación y calibración.

Se realizó la modificación del registro de reacción, en la cual se agregó un área donde se coloca la verificación de los equipos indicando si el porcentaje de variación está dentro de la tolerancia permitida.

En caso de necesitar calibración se incluye dentro del formato el espacio para poder indicar la fecha y la persona que lo realiza. La calibración es realizada por el operador de planta, de presentarse algún inconveniente esta es realizada por el técnico de instrumentación. La información de los lotes junto con la verificación y calibración es ingresada diariamente al sistema para llevar el control de la frecuencia de calibración de los equipos.

PM1. Determinación de la velocidad óptima de agitación.

Para determinar la velocidad óptima se realizó un estudio a diferentes RPM del agitador. Esto se realizó en conjunto con el equipo de calidad y mantenimiento para garantizar la operatividad de los equipos. La velocidad que se emplea es de 60 RPM por lo que se determinó realizar las pruebas aumentando 10 RPM por ensayo hasta llegar a las 90 RPM que es el máximo que se puede llegar.

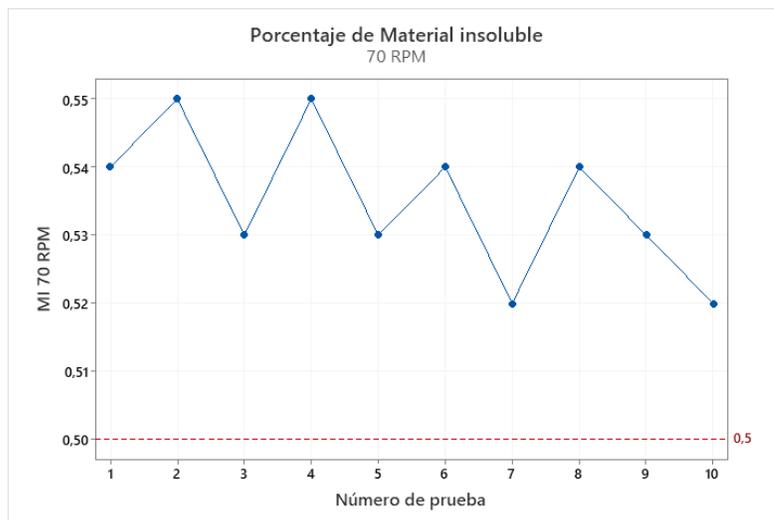


Figura 3.13 Porcentaje de Material insoluble a 70 RPM

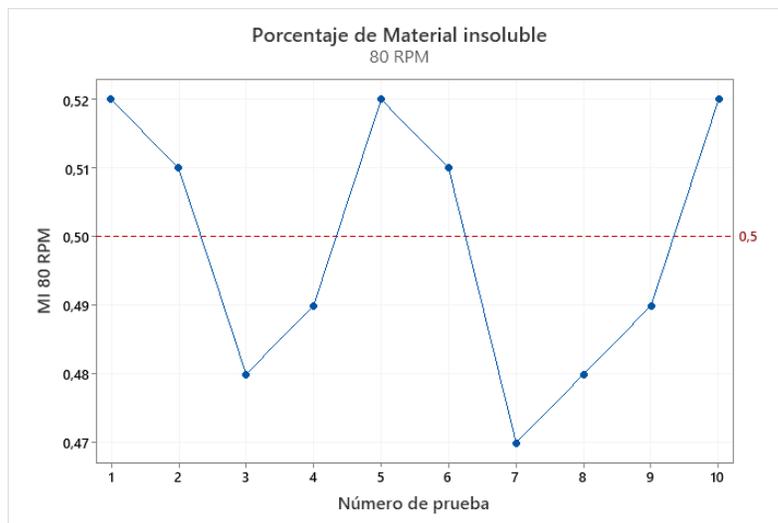


Figura 3.14 Porcentaje de material insoluble a 80 RPM

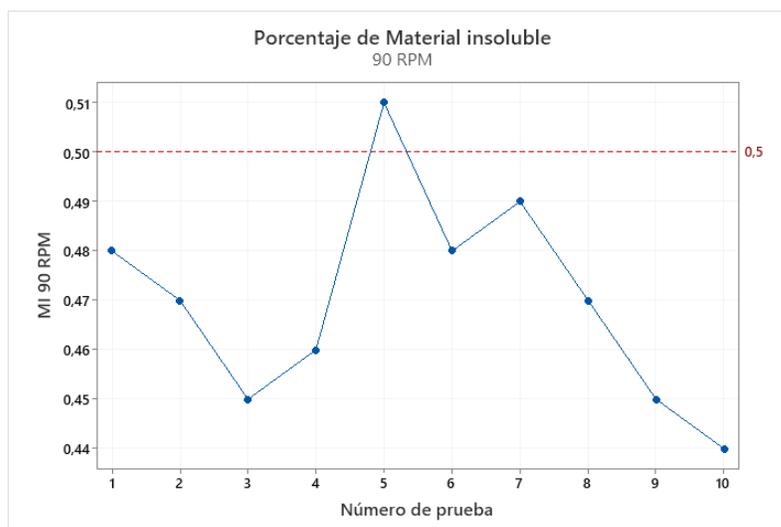


Figura 3.15 Porcentaje de material insoluble a 90 RPM

Realizado los ensayos a 3 velocidades diferentes se realizó un análisis de Anova para verificar si existe alguna diferencia significativa entre las 3 pruebas para poder determinar la óptima para el proceso.

La figura 3.16 muestra la gráfica de cajas a los diferentes intervalos de velocidad donde se observa que con un tiempo de 90 minutos se obtiene la menor cantidad de material insoluble.

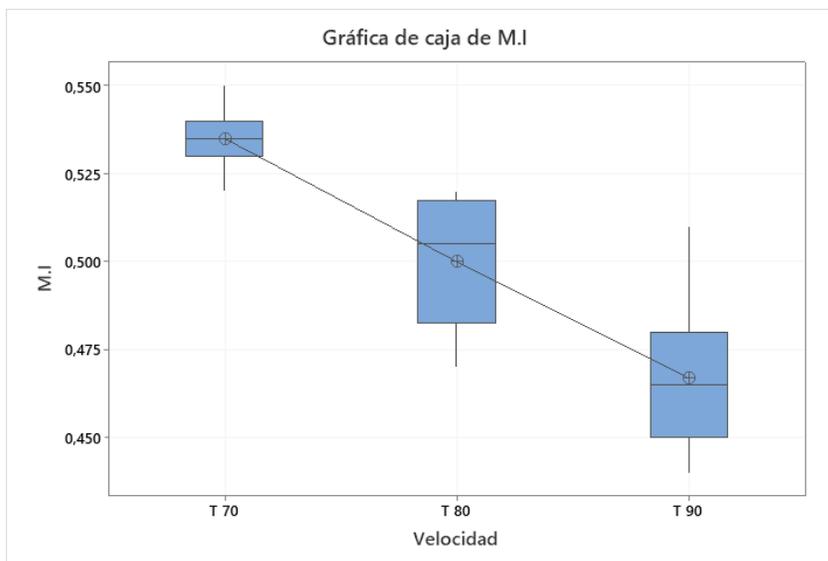


Figura 3.16 Diagrama de cajas intervalos de velocidad 70, 80 y 90 RPM

De la figura 3.17 donde se muestra el análisis comparativo de los intervalos de confianza se puede apreciar que no hay traslapes por lo que se presume que no hay evidencia de que las medias poblacionales son estadísticamente iguales.

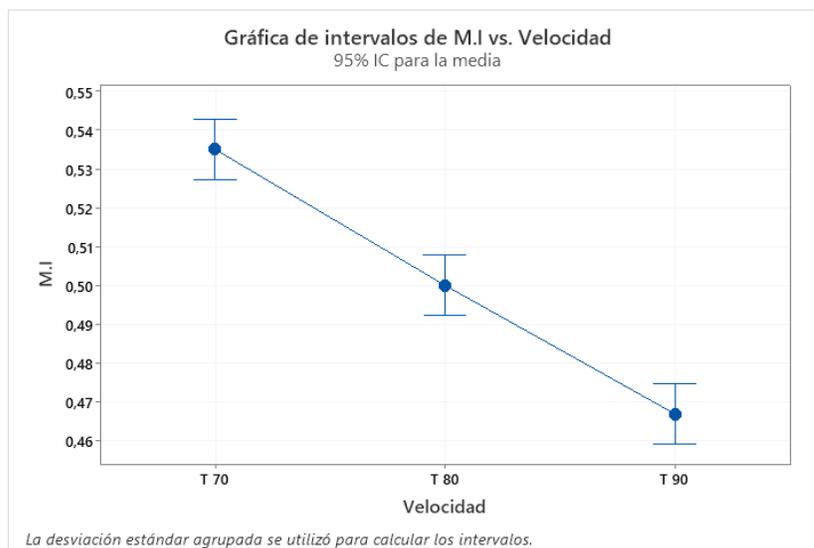


Figura 3.17 Gráfica de intervalos de confianza para 70, 80 y 90 RPM

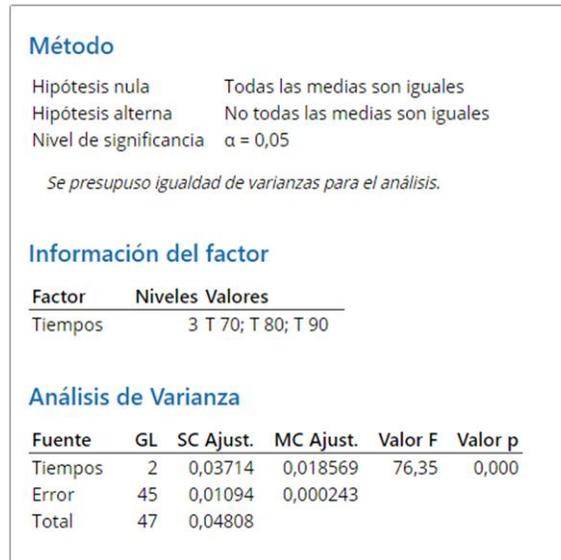


Figura 3.18 ANOVA 1 factor 70, 80 y 90 RPM

En la figura 3.18 se puede observar que el valor p es de 0 por lo que se rechaza la hipótesis nula de que las medias son iguales.

En la figura 3.19 se muestra la prueba de Tukey para comparar las medias entre las pruebas para determinar cuál es el mejor. Como indica la figura si un intervalo no contiene al 0, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

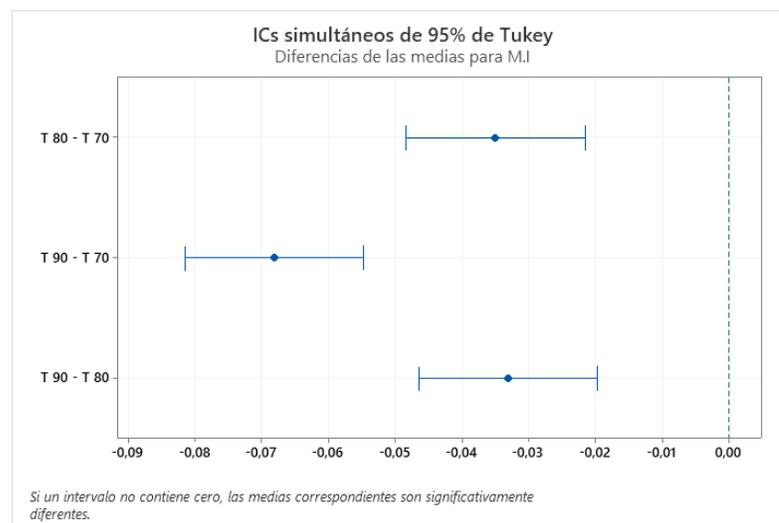


Figura 3.19 Prueba de Tukey 70, 80 y 90 RPM

Para que todo el resultado del análisis tenga validez se debe verificar la normalidad de los residuos y el supuesto de varianzas constantes. En la figura 3.20 se realiza la prueba de normalidad de los residuos con un valor p de 0.265 con lo que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad.

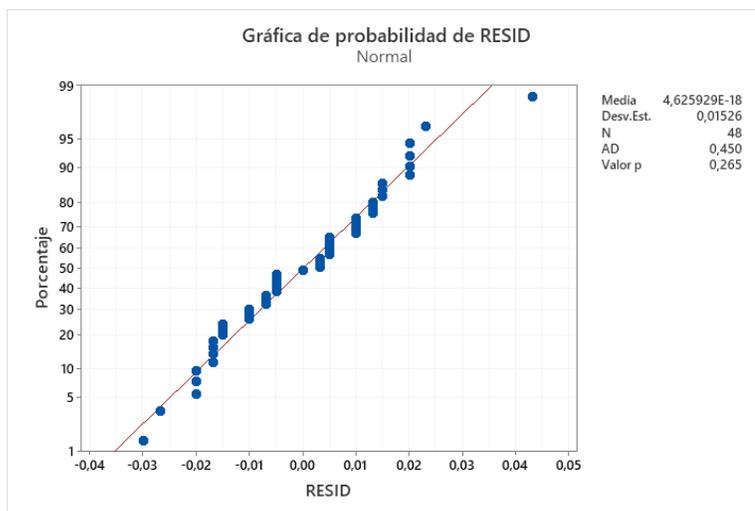


Figura 3.20 Prueba de normalidad de los residuos Anova 1 factor 70, 80 y 90 RPM

Se observa en la figura 3.21 la prueba de Barlett, la cual sirve para verificar el supuesto de varianzas constantes en las 3 pruebas. El valor p es de 0.089 por lo que se acepta la hipótesis nula de que las varianzas son constantes en las 3 pruebas.

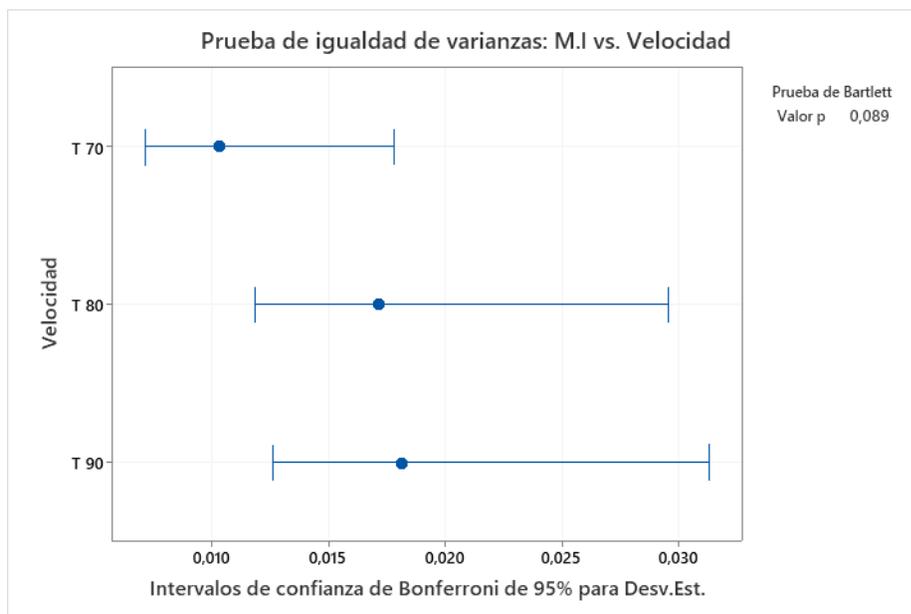


Figura 3.21 Prueba de igualdad de varianzas 70, 80 y 90 RPM

Con toda la información analizada y los supuestos verificados se determina que la velocidad a 90 rpm es el mejor ensayo para disminuir el material insoluble. Esta velocidad se utilizará en adelante para la producción del sulfato de aluminio tipo A sólido.

PM2. Determinar el tiempo de agitación óptimo.

Para determinar el tiempo óptimo de operación se realizó un estudio en línea variando el tiempo de agitación. Para este ensayo se utilizó la velocidad de 90 RPM determinada en el plan de mejora 1.

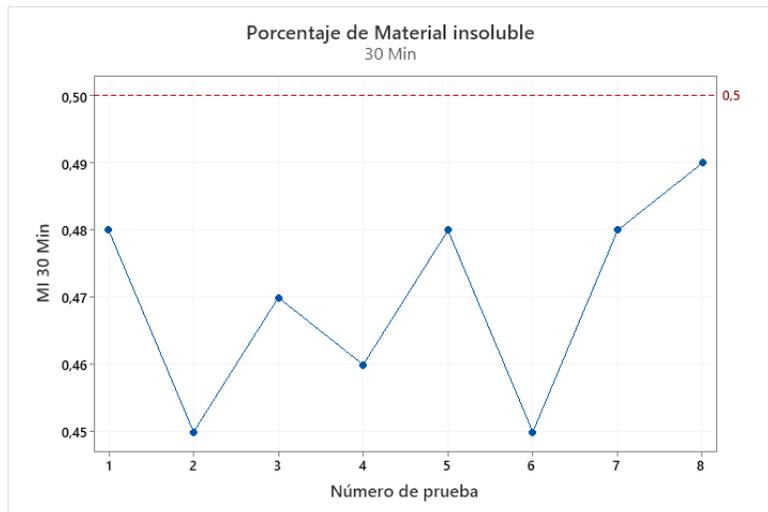


Figura 3.22 Porcentaje de material insoluble con 30 min agitación

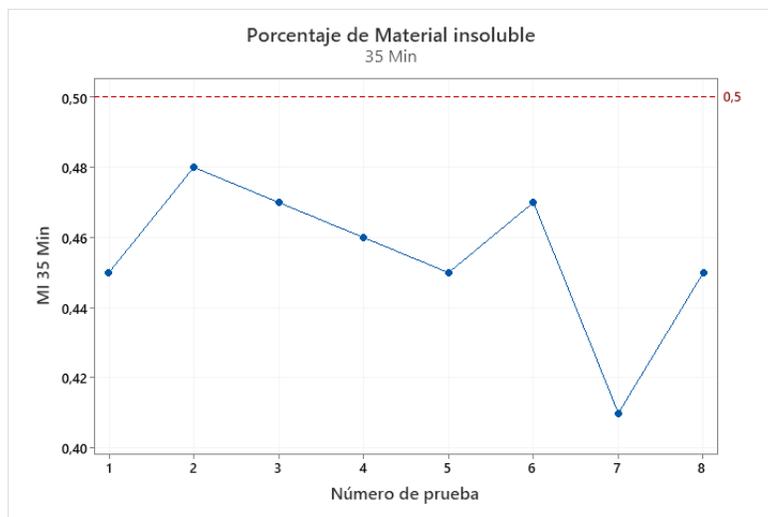


Figura 3.23 Porcentaje de materia insoluble a 35 minutos de agitación

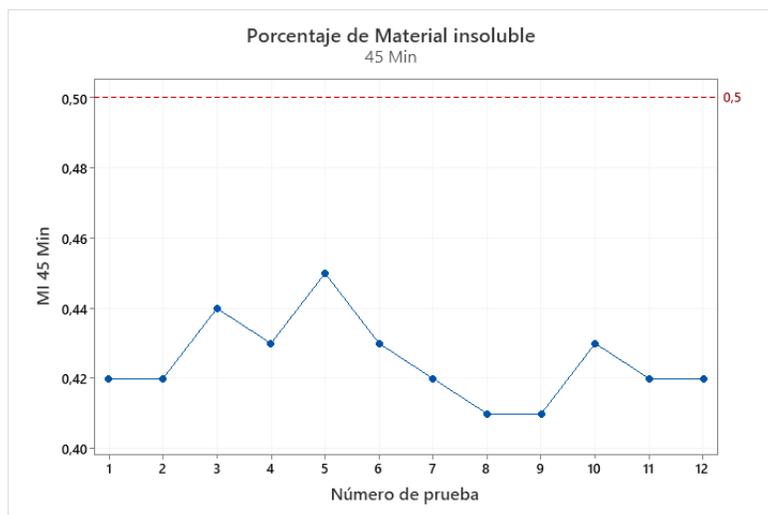


Figura 3.24 Porcentaje de material insoluble a 45 minutos de agitación

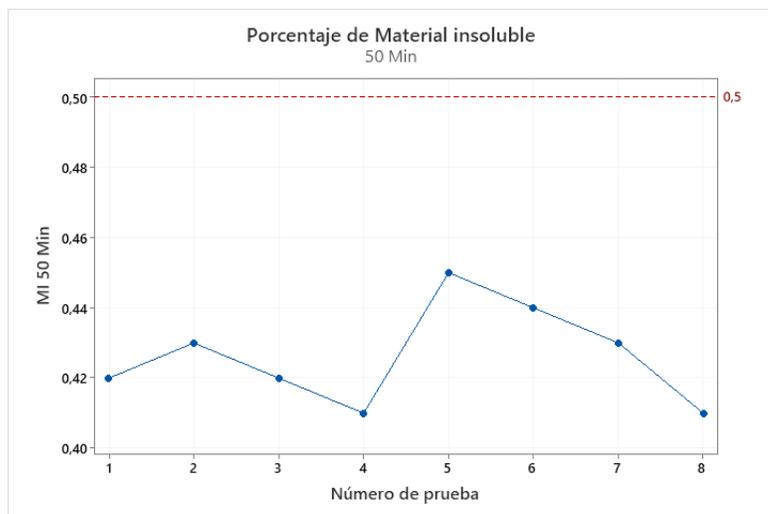


Figura 3.25 Porcentaje de material insoluble a 50 minutos agitación

Realizado los ensayos a 4 tiempos diferentes se elaboró un análisis de Anova para verificar si existe alguna diferencia significativa entre las 4 pruebas y poder determinar cuál es la óptima para el proceso.

La figura 3.26 muestra la gráfica de cajas a los diferentes intervalos de tiempo donde se determina que la media de la muestra con un tiempo de 45, 50 y 55 minutos son muy parecidas.

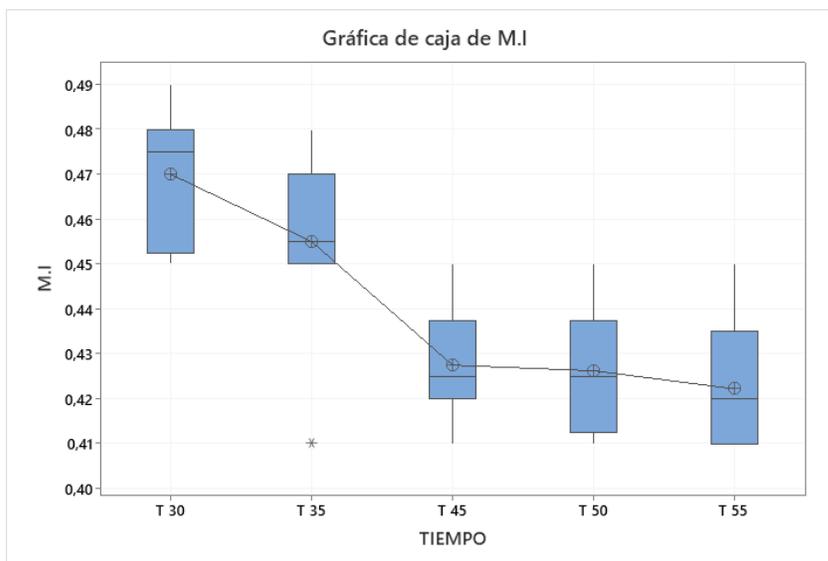


Figura 3.26 Diagrama de cajas de intervalos 30, 40, 45, 50 y 55 minutos

Se evidencia en la Figura 3.27 de los intervalos de confianza el traslape entre los ensayos a 45, 50 y 55 lo que indica que las medias poblacionales son estadísticamente iguales.

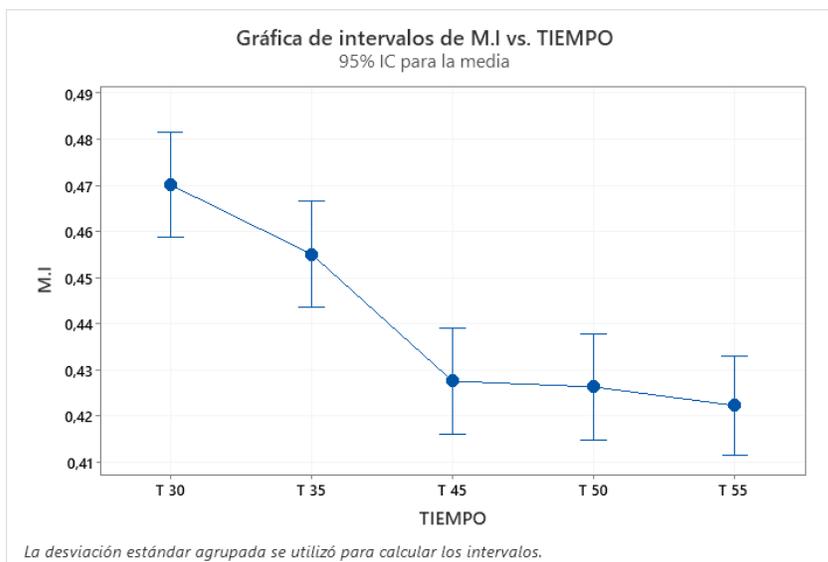


Figura 3.27 Gráfica de intervalos de confianza 30, 35, 45, 50 y 55 minutos

En la figura 3.28 se observa que el valor p es de 0 por lo que se rechaza la hipótesis nula lo cual indica que las medias son iguales.

ANOVA de un solo factor: M.I vs. TIEMPO

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
TIEMPO	5	T 30; T 35; T 45; T 50; T 55

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
TIEMPO	4	0,014605	0,003651	14,46	0,000
Error	36	0,009093	0,000253		
Total	40	0,023698			

Figura 3.28 Anova un factor 30, 35, 45, 50 y 55 minutos

En la figura 3.29 se presenta la comparación de Tukey para las 4 pruebas realizadas. Se evidencia que la prueba de 30 y 35 minutos tiene una media poblacional estadísticamente similar.

También se determina que la prueba a 45, 50 y 55 minutos tiene la media poblacional estadísticamente similar, esto se corrobora en la gráfica donde se observa las parejas de pruebas agrupadas que contienen el 0 corroborando la media poblacional similar.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

TIEMPO N	Media	Agrupación
T 30	8 0,47000	A
T 35	8 0,45500	A
T 45	8 0,42750	B
T 50	8 0,42625	B
T 55	9 0,42222	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

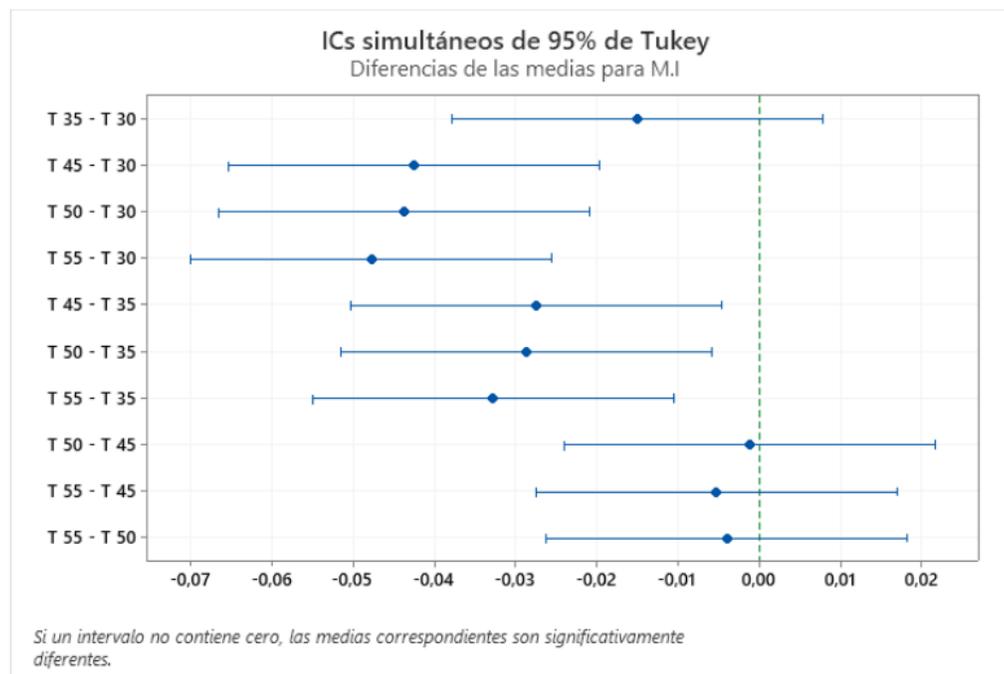


Figura 3.29 Comparaciones de Tukey 30, 35, 45, 50 y 55 minutos

Para que todo el resultado del análisis tenga validez se verificó la normalidad de los residuos y el supuesto de varianzas constantes. En la figura 3.30 se realiza la prueba de normalidad de los residuos con un valor p de 0.537 aceptando la hipótesis nula de normalidad.

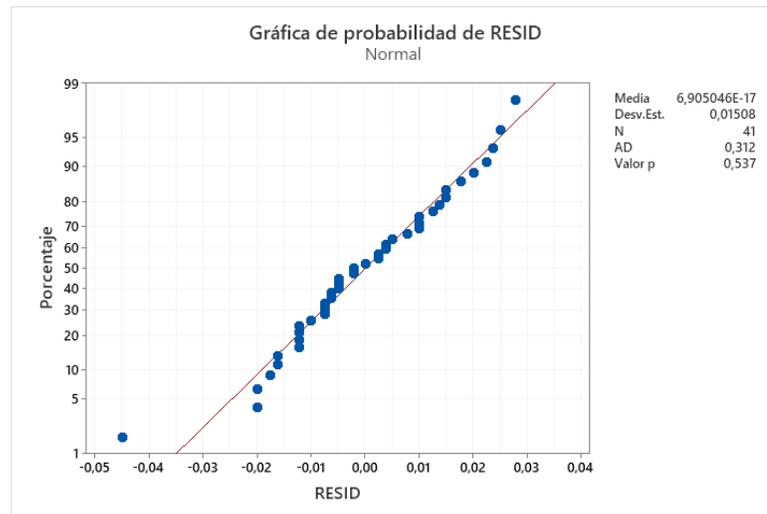


Figura 3.30 Prueba de normalidad residuos ANOVA 1 factor 30, 35, 45, 50 y 55 minutos

En la figura 3.31 se observa la prueba de Barlett para verificar el supuesto de varianzas constantes en las 4 pruebas. El valor p es de 0.689 por lo que se acepta la hipótesis nula de que las varianzas son constantes en las 4 pruebas.

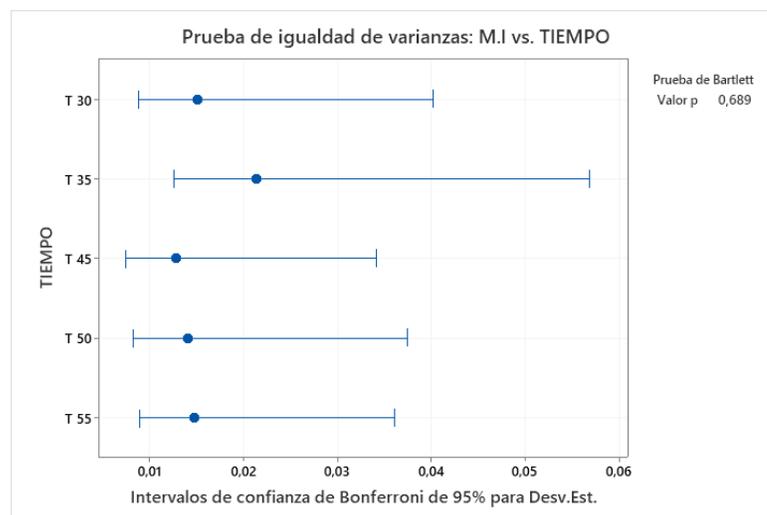


Figura 3.31 Prueba de igualdad de varianzas 30, 35, 45, 50 y 55 minutos

Con toda la información analizada y los supuestos verificados se determina que la velocidad a 45 minutos es la mejor prueba para disminuir el material insoluble ya que la media estadística es similar a la prueba de 50 y 55 minutos, de esta manera se disminuyen 10 minutos por cada lote de producción. Este tiempo se utilizará en adelante para la producción del sulfato de aluminio tipo A sólido.

PM3. Estandarización del proceso de producción.

Se realizó una restructuración del procedimiento de producción de sulfato de aluminio tipo A sólido, colocando los parámetros de operación que se lograron determinar con el análisis de tiempo y velocidad de agitación. También se incluyó el procedimiento de verificación y calibración de los equipos.

Se realizó una inducción a los operadores para el entendimiento del nuevo procedimiento asegurando su comprensión.

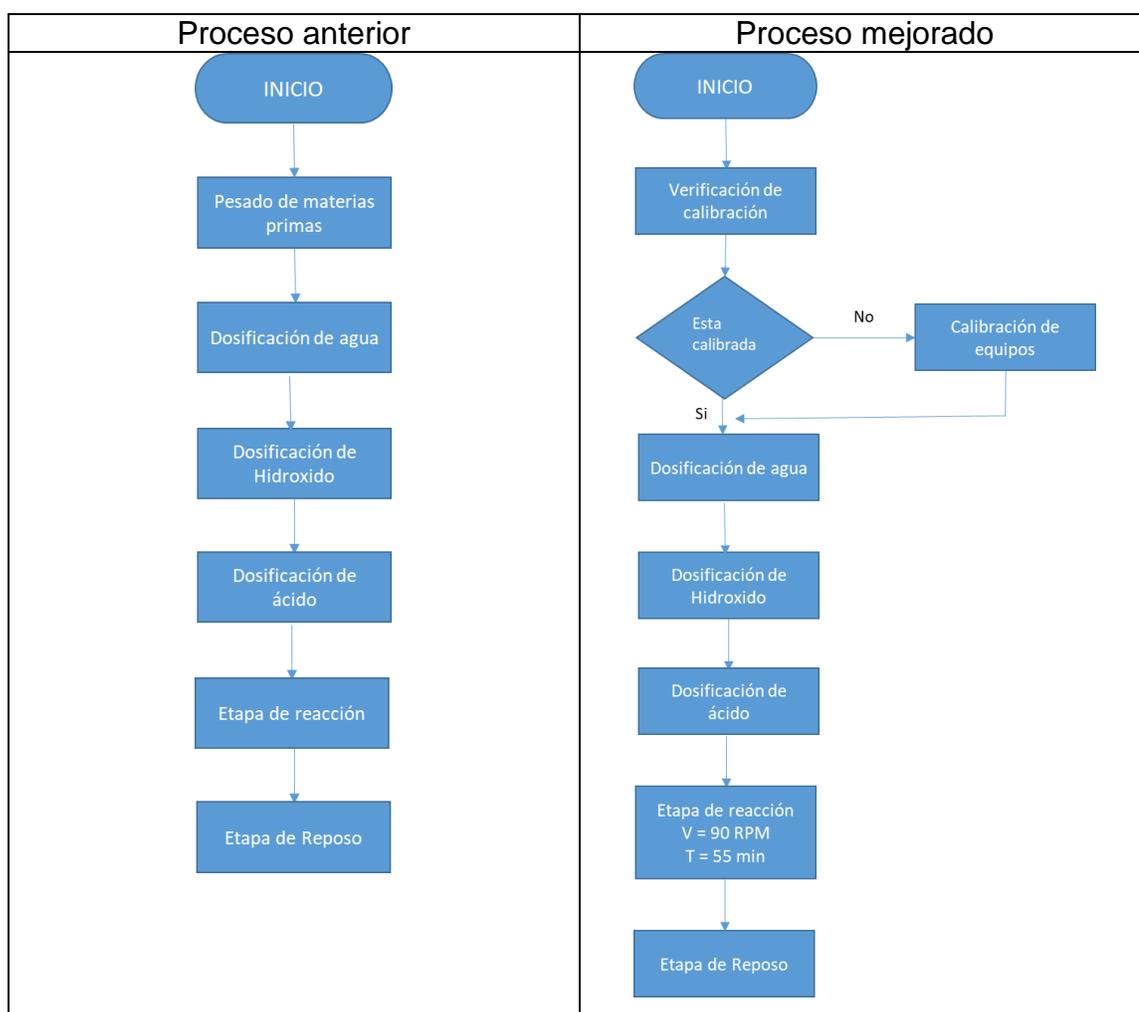


Tabla 16 Proceso mejorado para producción sulfato tipo A sólido

3.5 Etapa de Control

Para garantizar que la variable de control se mantenga bajo los límites permitidos y se mantengan las mejoras implementadas se estableció un sistema de seguimiento:

3.5.1 Seguimiento de acciones mejoradas

En plan de seguimiento se muestra en la tabla 17.

¿Qué voy a controlar?	Actividades	¿Cómo?	¿Cuándo?	Costo	¿Quién?
Calibración de los equipos de planta.	Verificación con pesos y patrón y calibración.	Revisión de registro de reacción y formatos de calibración, auditoría al proceso en el arranque de la producción.	Quincenalmente.	\$0	Jefe de planta.
Verificación de la velocidad de reacción.	Revisión de la velocidad del agitador.	Revisión de los reportes de reacción y auditoría durante la producción del sulfato de aluminio tipo A sólido.	Quincenalmente.	\$0	Jefe de planta / Analista de calidad
Verificación del tiempo de agitación.	Revisión del tiempo de agitación.	Revisión de los reportes de reacción y auditoría durante la producción del sulfato de aluminio tipo A sólido.	Quincenalmente.	\$0	Jefe de planta / Analista de calidad

Tabla 17 Plan de seguimiento

3.5.2 Establecimiento de Indicadores del Proyecto

En la tabla 18 se muestra un plan de seguimiento para los indicadores establecidos en el proyecto.

¿Qué voy a controlar?	Actividades	¿Cómo?	¿Cuándo?	Costo	¿Quién?
Porcentaje de material insoluble en el sulfato A sólido	Implementación de carta de control	Información que levanta el departamento de calidad.	Diaria	\$0	Jefe de planta

Tabla 18 Indicador del Proyecto

3.5.3 Carta de control

Una carta de control es una herramienta estadística que se utiliza para verificar y controlar la estabilidad de un proceso a través del tiempo. Es normal que el proceso tenga variaciones, las cuales se pueden agrupar en causas aleatorias y causas específicas.

Las causas aleatorias son de causa desconocida y se deben al azar, estas son de difícil identificación y eliminación.

Las causas específicas son asignables y pueden ser identificadas y eliminadas para poder estabilizar el proceso.

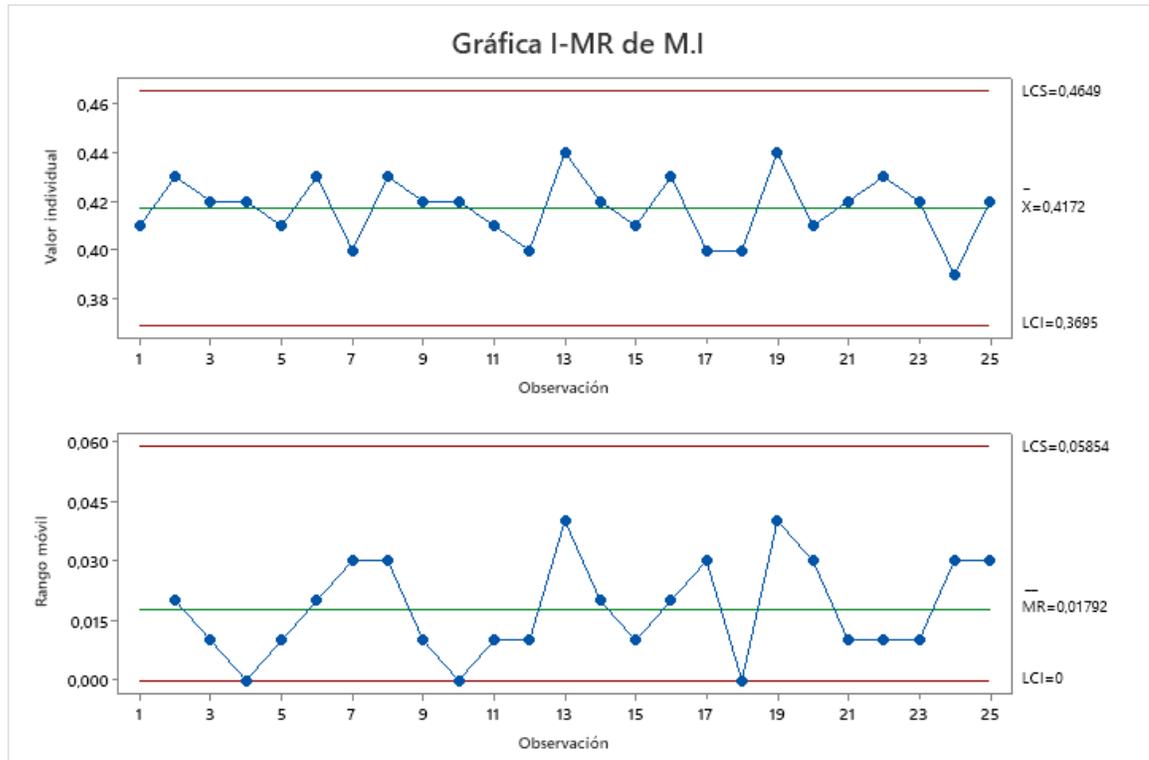


Figura 3.32 Gráfica I-MR porcentaje de material insoluble

Con la información obtenida en la mejora se realizó la carta de control para el proceso de producción de sulfato de aluminio tipo A sólido, en la gráfica de rangos móviles se aprecia la variación del proceso, al encontrarse todos los puntos dentro de los límites de control y al presentar patrones aleatorios se determina que la variación del proceso está bajo control.

La implementación de la carta de control permite observar la evolución del proceso gráficamente, como se muestra en la figura 3.32 la media obtenida es de 0.417 % con un límite superior de 0.465% y un límite inferior de 0.369%. Si el proceso está bajo control la totalidad de los puntos estarán entre los límites.

Se realizó la capacitación al personal del departamento de calidad para el manejo y control de la carta. Si se observa valores fuera de los límites quiere decir que el proceso no es estable y se deben realizar los análisis correspondientes para determinar la causa de la variación.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS OBTENIDOS

Implementadas las mejoras se registró la información desde finales de julio y mediados del mes de agosto del 2019, en total se tomaron datos a 25 reacciones de sulfato tipo A sólido.

El resumen de la información se muestra en la tabla 19 donde se puede ver la mejora realizada.

Número de reacciones	Velocidad de agitación	Tiempo promedio de agitación	Porcentaje promedio de material insoluble
25	90 RPM	50 minutos	0.42%

Tabla 19 Resultados obtenidos del porcentaje de material insoluble

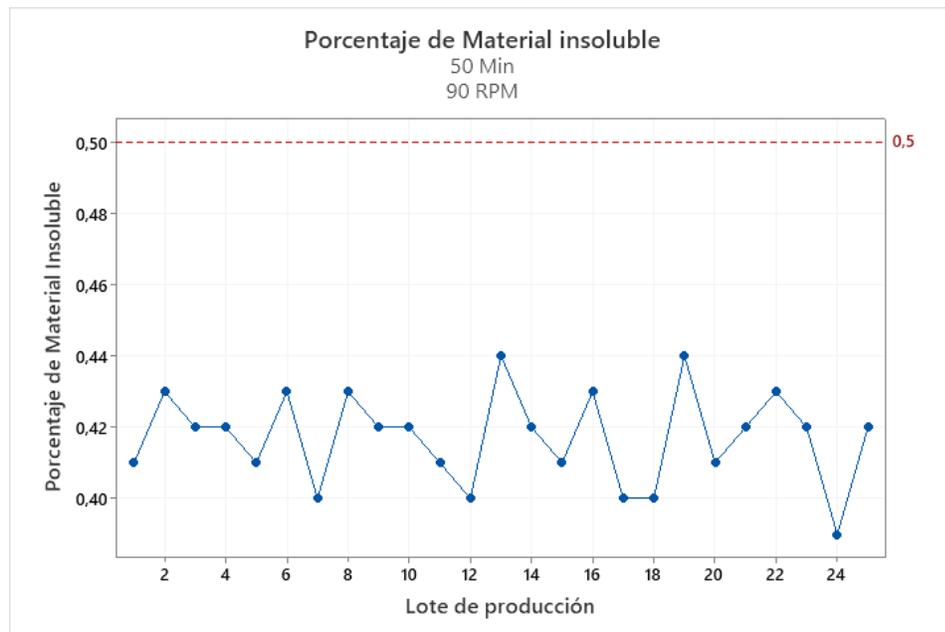


Figura 4.1 Porcentaje de material insoluble con mejoras implementadas

La información obtenida de la situación anterior del proceso indicaba que el promedio del porcentaje de material insoluble era de 0.54%, con la mejora implementada este valor bajo a 0.42% cumpliendo con el máximo de 0.5%.

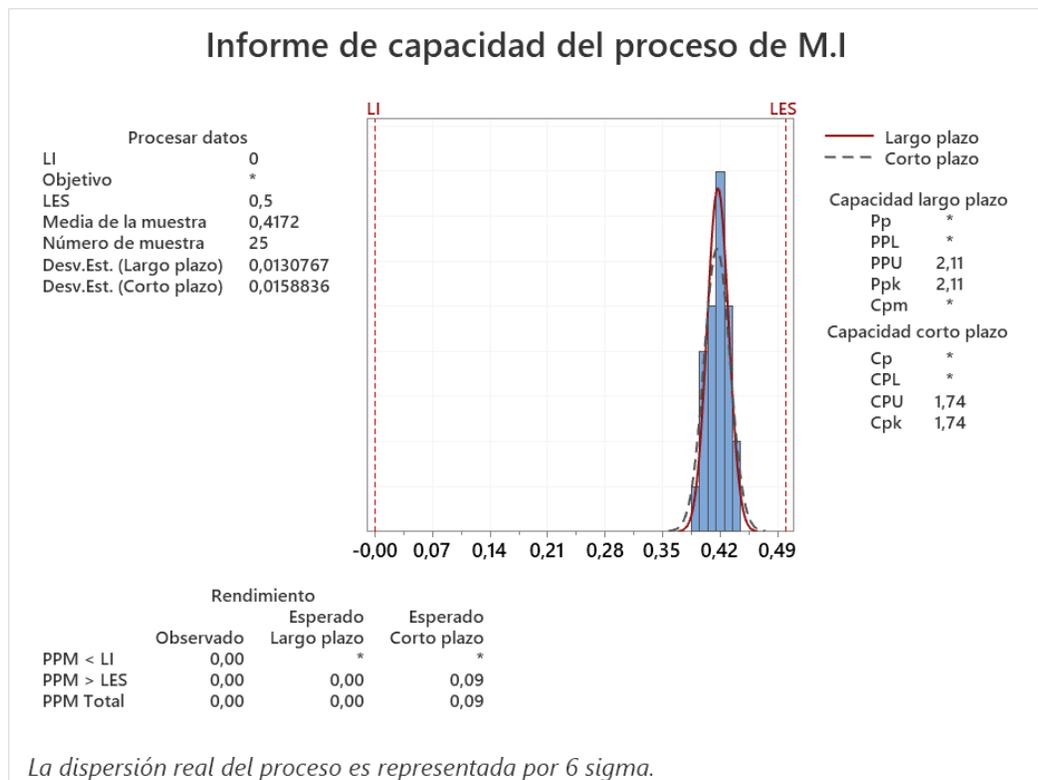


Figura 4.2 Análisis de capacidad porcentaje de material insoluble mejorado

En la figura 4.2 se presenta la capacidad del proceso, la cual es de 1.74 lo que indica que es un proceso más que adecuado y que es capaz de cumplir con las especificaciones.

En la Figura 4.3 se observa el comportamiento del porcentaje de material insoluble durante la realización del proyecto.

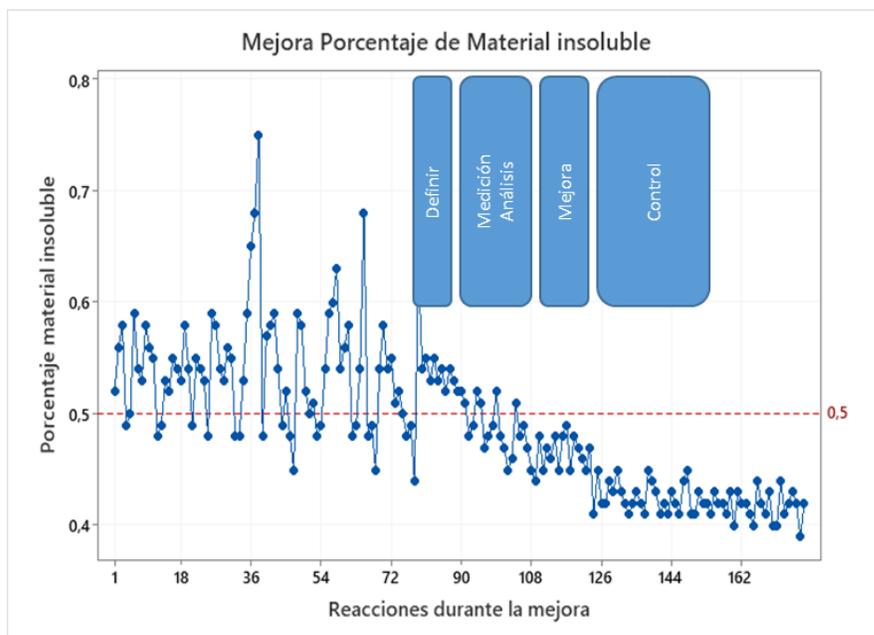


Figura 4.3 Comportamiento del material insoluble durante el proyecto

Al disminuir el porcentaje de material insoluble la compañía se vuelve competitiva en mercados internacionales cumpliendo con todos los parámetros de calidad lo que permite cuidar y mantener un mercado de \$40000 dólares en exportaciones.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El proyecto analizó la situación del proceso de producción de sulfato tipo A sólido en el año 2018 y 2019 evidenciando un valor promedio de 0.54% de material insoluble el cual incumplía los parámetros de calidad.
- Se identificaron algunas de las causas que ocasionaban el aumento del porcentaje de material insoluble y se realizaron las propuestas de mejora para solucionarlas.
- Con el proyecto implementado, se redujo de un valor promedio de 0.54% de material insoluble en el sulfato de aluminio tipo A sólido a un valor de 0.42%. Permitiendo a la compañía mantenerse competitiva en los mercados internacionales con ventas que rodean los \$ 40000 y cumpliendo con la especificación de que sea menor a 0.5%
- Se establecieron nuevos controles como el uso de cartas de control en el proceso de producción de sulfato de aluminio tipo A sólido.
- Se estableció un control de verificación de los equipos de pesaje y dosificación antes del arranque de la producción minimizando las variaciones de materias primas.

5.2 Recomendaciones

- Realizar un proyecto DMAIC evaluando el costo beneficio de aumentar la velocidad de agitación con la compra de nuevos equipos, ya que en las condiciones actuales esto no se puede realizar y de esta manera disminuir el tiempo de la reacción. Con esto se logra reducir el tiempo total de la reacción aumentando la capacidad de la planta de producción.
- Realizar pruebas de Anova variando la velocidad de adición de ácido ya que es el reactivo que inicia la reacción, esto puede permitir realizar la reacción en menor tiempo aumentando la capacidad de la planta.

- Verificar y evaluar las X potenciales que obtuvieron puntaje menor de 60 en la matriz causa y efecto para evaluar una posible mejora.
- Promover el desarrollo de proyectos de mejora para realizar optimización de costos de producción.

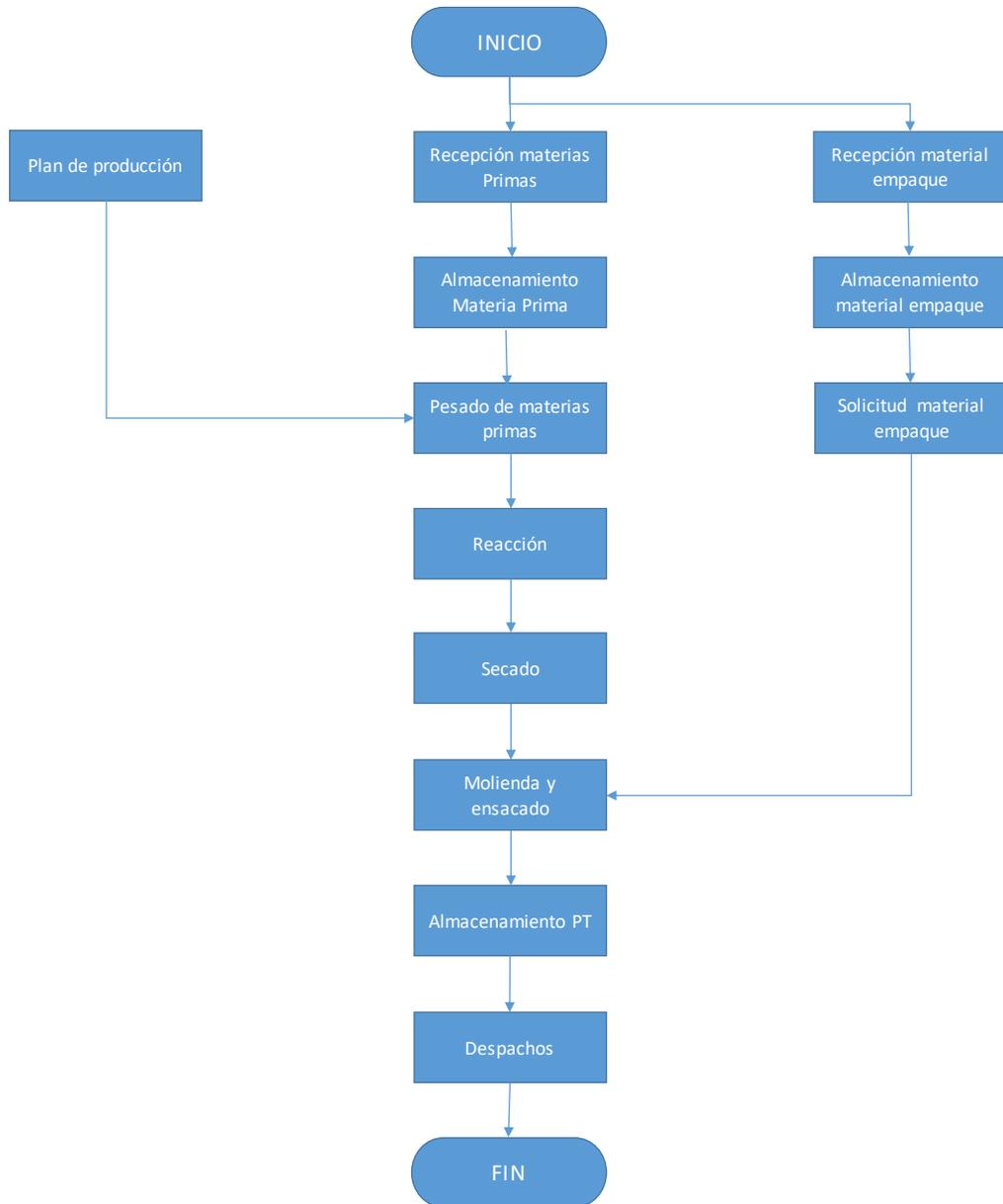
BIBLIOGRAFÍA

- Ashok, K., Jaideep, M., & Jiju, A. (2006). Six Sigma implementation at Dow Chemical Company. *World Class Applications of Six Sigma*.
- Griffin, A., & Hauser, J. (1991). The Voice of the Customer. *Marketing Science* .
- Marques, P., Requeijo, J., Saraiva, P., & Frazao-Guerreiro, F. (2013). Integrating Six Sigma with ISO 9001. *International Journal of Lean Six Sigma*.
- Minjin , K., Young-Hak , L., In-Su, H., & Chonghun, H. (2003). Quality improvement in the chemical process industry using Six Sigma technique. En *Computer Aided Chemical Engineering* (págs. 244-249).
- Shankar, R. (2009). *Process improvement using Six Sigma: a DMAIC guide*. Winsconsin: American Society for Quality .
- Smętkowska, M., & Mrugalska, B. (2018). Using Six Sigma DMAIC to Improve the Quality of the Production Process: A Case Study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 238:590-596.
- Sokovic, M., Pavletic, M., & Pipan, K. (2010). Quality improvement methodologies - PDCA cycle, RADAR matrix, DMAIC and DFSS. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 476-483.
- Taborski, D. (2010). ¿ Es la implemmentación de iniciativa Six Sigma la manera perfecta de mejorar la eficiencia en la organización? En M. S. Kochana, *Aspectos seleccionados de la gestión de la calidad II* (págs. 30 - 48). Cracovia: Wydawnictwo AG.

ANEXOS

ANEXO A

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PRODUCCIÓN SULFATO DE ALUMINIO TIPO A SÓLIDO.



ANEXO B

SIPOC PROCESO DE PRODUCCIÓN SULFATO DE ALUMINIO TIPO A SÓLIDO.

Proceso: Producción Sulfato de Aluminio Tipo A sólido				
PROVEEDOR	ENTRADA	PROCESO	SALIDA	CLIENTE
Bodega materia prima Control de Calidad Planeación Servicios Industriales	Hidróxido Ácido sulfúrico Material de empaque Agua	1. Pesado de materias primas 2. Dosificación de agua 3. Dosificación de hidrato 4. Dosificación de ácido 5. Reacción del producto 6. Reposo del producto 7. Secado del producto 8. Molienda 9. Ensacado y paletizado	Sulfato de aluminio tipo A sólido Agua de limpieza	Bodega de Producto terminado Servicios Industriales Control de calidad

