

**APLICACIÓN DE UN DISEÑO DE EXPERIMENTO QUE CONTRIBUYA A
MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS DE SACAROSA EN PATIO DE CAÑA PARA UN
INGENIO AZUCARERO DEL VALLE DEL CAUCA**

BRAIAM SERNA GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2014**

**APLICACIÓN DE UN DISEÑO DE EXPERIMENTO QUE CONTRIBUYA A
MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS DE SACAROSA EN PATIO DE CAÑA PARA UN
INGENIO AZUCARERO DEL VALLE DEL CAUCA**

BRAIAM SERNA GONZÁLEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Industrial

Director

M.Sc. CARLOS ALBERTO ROJAS TREJOS

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2014**

Nota de aceptación:

Firma Jurado

Observaciones

Zarzal, Mayo 15 de 2014

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios por permitirme vivir este momento de mi vida y la sabiduría para culminar esta etapa académica.

A mi familia por el apoyo y comprensión por el tiempo dedicado en realizar el trabajo.

A todo el personal del área de control procesos quienes me brindaron su apoyo incondicional en este proyecto.

A todos mis profesores, quienes con su dedicación me enseñaron y acompañaron en este proceso de formación académica.

Al Profesor Carlos Alberto Rojas quien me orientó con sus valiosos consejos durante todo el desarrollo del trabajo.

A mis compañeros de estudio, amigos y todos los que de una u otra forma me apoyaron en este trabajo académico.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	1
LISTA DE GRÁFICOS	2
LISTA DE FIGURAS.....	3
LISTA DE ANEXOS.....	4
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
2. JUSTIFICACIÓN	15
3. OBJETIVOS	16
3.1. OBJETIVO GENERAL	16
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
4. MARCO DE REFERENCIA.....	17
4.1. ESTADO DEL ARTE	17
4.2. MARCO TEÓRICO.....	27
4.2.1. La caña de azúcar.....	27
4.2.2. Sistemas de almacenamiento	30
4.2.3. Deterioro de la caña	30
4.2.4. Cromatografía de alta resolución.....	31
4.2.5. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)	31
4.2.5.1. Antecedentes históricos del diseño de experimentos.....	31
4.2.5.2. Conceptos básicos en el Diseño de Experimentos	33
4.2.5.3. Principios básicos en el diseño de experimentos	36
4.2.5.4. Clasificación y selección de los diseños de experimentos.....	37
4.2.5.5. Análisis de la varianza (ANOVA).	39
4.2.5.6. Regresión lineal simple.....	40

5. PROPUESTA METODOLÓGICA	41
6. CASO DE ESTUDIO	46
7. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
7.1. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE ALMACENAMIENTO DE CAÑA EN PATIO DE FÁBRICA.....	49
7.2. DETERMINAR LOS FACTORES QUE MÁS INFLUYEN EN LA PÉRDIDA DE SACAROSA EN PATIO DE CAÑA MEDIANTE UN DISEÑO DE EXPERIMENTOS.	60
7.3. REALIZAR UN PLAN DE ACCIÓN QUE CONTRIBUYA A MINIMIZAR LA PÉRDIDA DE SACAROSA EN EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO DE LA CAÑA DE AZÚCAR.	80
8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	83
CONCLUSIONES	88
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	98

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Balance azucarero de países en el mercado de azúcar (Millones de tmvc)	7
Tabla 2. Pérdidas de sacarosa en patio por apilamiento.	8
Tabla 3. Porcentaje de pérdidas de sacarosa en el ingenio objeto de estudio	11
Tabla 4. Configuración más utilizada en suministro de caña a Fábrica.....	12
Tabla 5. Herramientas generales de DMAIC.....	26
Tabla 6. Constituyentes de la caña de azúcar.....	27
Tabla 7. Puntos de diseño o tratamientos.....	35
Tabla 8. Clasificación de los diseños experimentales.....	38
Tabla 9. Tabla de ANOVA.	39
Tabla 10. Metodología propuesta para el trabajo de investigación.....	42
Tabla 11. Continuación Metodología propuesta para el trabajo de investigación.	43
Tabla 12. Metodología propuesta para realizar DOE.	44
Tabla 13. Continuación Metodología propuesta para realizar DOE.	45
Tabla 14. Desempeño económico de la compañía.	47
Tabla 15. Operarios y equipos utilizados en patio de fábrica.	52
Tabla 16. Estimación de las Pérdidas económicas.....	56
Tabla 17. Diagrama de Afinidad.....	57
Tabla 18. Variedad de Caña de Azúcar a Cosechar para el periodo Ene-Oct. 2013.....	61
Tabla 19. Edades de caña de azúcar a cosechar Ene-Oct de 2013.....	64
Tabla 20. Equipos necesarios para el desarrollo del experimento.	69
Tabla 21. Tabla de diseño del experimento.	70
Tabla 22. Análisis de varianza para pérdida de sacarosa.	71
Tabla 23. Efectos y coeficientes estimados.	72
Tabla 24. Resultados de aplicar Ecuación 5.	74
Tabla 25. Pérdida económica por tiempo de permanencia en CAT.....	79
Tabla 26. Cálculo Meta año 2014.	80
Tabla 27. Resumen criterios para almacenar caña de azúcar en el patio de fábrica.	82
Tabla 28. Ingresos Económicos después de una mejora.	86
Tabla 29. Estimación de Ingresos Económicos.	87

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Pérdidas de sacarosa por permanencia en patio y lavado de caña.	13
Gráfico 2. Pérdidas de sacarosa por permanencia en patio y lavado de caña.	14
Gráfico 3. Pérdidas de sacarosa por almacenamiento de caña en patio de fábrica.	54
Gráfico 4. Caña molida en el segundo semestre del año 2012.	55
Gráfico 5. Histórico caña de azúcar molida por la compañía.	55
Gráfico 6. Diagrama de efectos principales.	75
Gráfico 7. Pérdida de Sacarosa por almacenamiento de caña en patio de fábrica.	83
Gráfico 8. Pérdida económica por hora de almacenamiento de caña en patio fábrica. ...	84
Gráfico 9. Pérdida económica mensual y anual.	85

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Principales productos agrícolas mundiales según su volumen producido	6
Figura 2. Esquema de las pérdidas de sacarosa en el proceso de elaboración de azúcar	11
Figura 3. Estructura de la Sacarosa.....	28
Figura 4. Estructura de la Glucosa.....	29
Figura 5. Estructura de la Fructosa.	29
Figura 6. Proceso interactivo de la experimentación.	32
Figura 7. Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento..	34
Figura 8. Etapas de la metodología DMAIC	41
Figura 9. Mapa de alto nivel del proceso objeto de estudio.	48
Figura 10. Diagrama de flujo de almacenamiento de caña en patio de fábrica.	50
Figura 11. Mapa de alto nivel de proceso bajo estudio.	52
Figura 12. Indicadores mapa de alto nivel de proceso bajo estudio.	53
Figura 13. Diagrama de Ishikawa.	58
Figura 14. Zonas dedicadas para almacenamiento de caña en patio de fábrica.	59
Figura 15. Diagrama de Pareto de Variedades de caña de azúcar a Cosechar.	62
Figura 16. Agrupación para las distancias de los sectores-suerte.....	65
Figura 17. Diseño anidado y cruzado de los factores del experimento.	66
Figura 18. Óptimo propuesto por el software.	77
Figura 19. Óptimo ajustado al proceso real.	78
Figura 20. Pérdidas de sacarosa por permanencia en CAT.	79
Figura 21. Formato del plan de acción.	81

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Resumen datos analizados.	98
Anexo 2. Formato de la hoja para recolección de datos para el DOE.	99
Anexo 3. Método determinación de Pol.	100
Anexo 4. Equipos utilizados en patio de fábrica.	101
Anexo 5. Prueba de Normalidad y Varianza.	102
Anexo 6. PLAN DE ACCIÓN.....	103
Anexo 6. PLAN DE ACCIÓN (Continuación).	104
Anexo 7. Cronograma de los ensayos experimentales.	105

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se muestra los resultados de aplicar la metodología DMAIC para formular un plan de acción que contribuirá en la mejora del proceso de almacenamiento de caña de azúcar en vagones en el patio de fábrica de un ingenio azucarero del Valle del Cauca, con ayuda de la herramienta estadística Diseño de Experimento, empleando el modelo factorial 2^k . Determinando los factores que tienen un impacto significativo sobre la degradación de la caña y así establecer los criterios de almacenamiento para reducir las pérdidas de sacarosa en la caña en dicho proceso. Con la investigación se evidenció que la permanencia en patio y la permanencia entre campo y báscula, son factores que influyen de manera significativa sobre la pérdida de sacarosa en la caña, por lo anterior, los criterios para almacenar la caña en patio de fábrica son: caña de azúcar quemada, que provenga de campos que se encuentren dentro un radio de 15 kilómetros de la ubicación del ingenio y se almacene alrededor de cinco horas en vagones.

Palabras claves: DMAIC, CAT, Diseño de Experimento, Diseño Factorial, Análisis de varianza, Factores, Variable de respuesta, Efectos, Caña de Azúcar, Sacarosa.

ABSTRACT

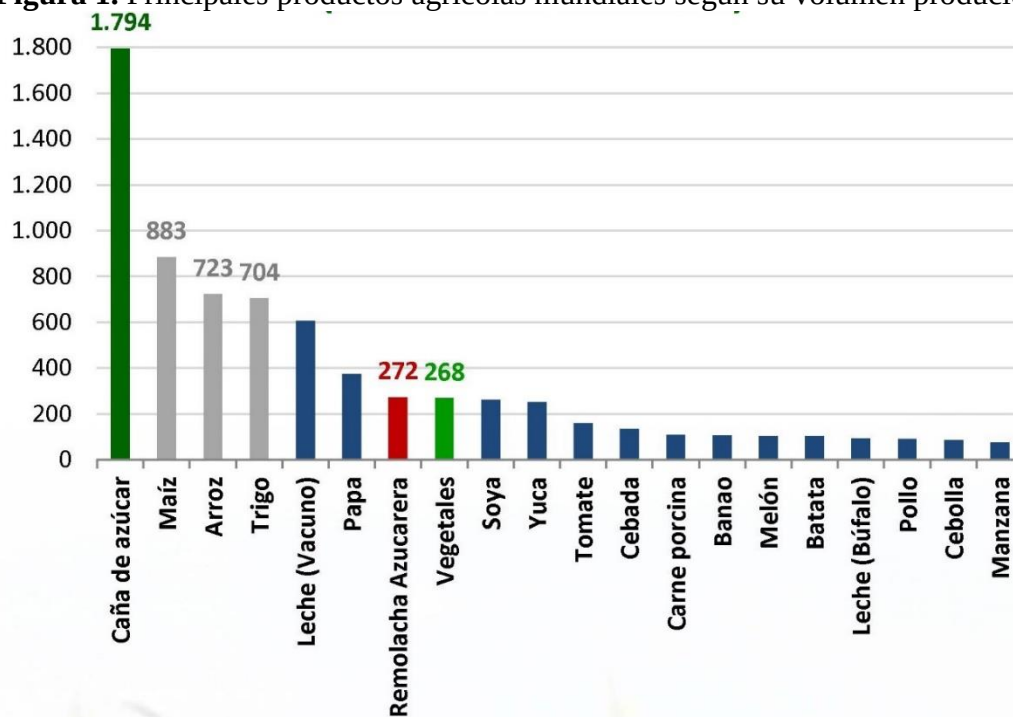
In the present investigation shown the results of applying the DMAIC methodology to formulate a plan of action that will contribute in improving the process of storage sugar cane trailers in the yard of factory a sugar mill in Valle del Cauca, with the help of statistical Design of Experiment tool, using the 2^k factorial model. Determining the factors that have a significant impact on the degradation of the cane and establish standard to reduce storage losses of sucrose in the cane in the process. With the investigation evidenced that permanence in yard and permanence between camp and scales, are factors that influence so significantly about the loss of sucrose in the cane, from the above, standard appropriate to store the cane factory yard are: burnt sugar cane, coming from camps to find things to do within 15 miles of the location of the mill and stored about five hours on trailers.

Keywords: DMAIC, CAT, Design of Experiment, Factorial Design, Analysis of Variance, Factors, Variable Response, Effects, Sugar Cane, Sucrose.

INTRODUCCIÓN

El azúcar es un producto básico de la canasta familiar derivado de la caña de azúcar y la remolacha, donde las tres cuartas parte se producen de la caña que se cultiva en la mayoría de los países más densamente poblados del mundo, entre ellos Colombia. En la Figura 1 se presenta como la caña de azúcar es el principal producto agrícola mundial según su volumen producido (Asocaña, 2012, p18).

Figura 1. Principales productos agrícolas mundiales según su volumen producido



Fuente: ASOCAÑA, Informe 2011-2012.

El proceso de fabricación de azúcar ocupa uno de los sectores económicos de mayor importancia en Colombia. El sector azucarero Colombiano juega un papel importante en el mercado mundial. Según los datos de la Organización Internacional del Azúcar (OIA), la evaluación del impacto socioeconómico del sector azucarero a nivel nacional se realizó mediante la cuantificación de la contribución de la operación de este sector a la actividad económica del país, considerando tanto los efectos generados directamente por la producción de los ingenios, como los efectos generados de manera indirecta a través de los encadenamientos con otros sectores de la economía, en la siguiente tabla se presenta el

Balance azucarero de los principales países en el mercado de azúcar entre el año 2001 y 2011 (Asocaña, 2012). Al mismo tiempo se observa a Colombia¹ en la onceava posición en producción mundial de azúcar, con una participación del 1.60% y séptimo en exportación, con una participación del 1.96%.

Tabla 1. Balance azucarero de países en el mercado de azúcar (Millones de tmvc²)

	Balance						Participación en el Balance Mundial					
	Producción		Consumo		Importaciones		Exportaciones		Producción %	Consumo %	Importaciones %	Exportaciones %
Australia	4,80	8	1,07		0,02		3,80	3	3,16	0,71	0,04	7,90
Brasil	30,33	1	11,78	4	0,00		19,03	1	20,00	7,75	0,00	39,49
China	11,44	4	12,56	3	1,42	7	0,15		7,54	8,27	2,97	0,30
Colombia	2,43	11	1,56		0,09		0,94	7	1,60	1,02	0,20	1,96
Egipto	1,70		2,65	10	1,00		0,08		1,12	1,75	2,09	0,16
UE	17,65	3	17,02	2	2,75	2	3,89	2	11,64	11,20	5,78	8,07
Guatemala la	2,12		0,64		0,00		1,43	5	1,39	0,42	0,01	2,96
India	21,18	2	20,75	1	0,93	10	1,55	8	13,96	13,65	1,93	3,21
Indonesia	2,41		4,46	8	1,95	4	0,00		1,59	2,93	4,07	0,00
Irán	1,09		2,18		1,23	8	0,09		0,72	1,44	2,57	0,18
Rep. Corea	0,00		1,13		1,58	5	0,32		0,00	0,74	3,30	0,67
Malasia	0,06		1,25		1,48	6	0,28		0,04	0,82	3,10	0,58
México	5,43	7	4,94	7	0,17		0,47	10	3,58	3,25	0,36	0,98
Pakistán	3,87	9	4,17	9	0,44		0,10		2,55	2,74	0,92	0,21
Rusia	3,03	10	6,30	6	3,37	1	0,15		2,00	4,14	7,05	0,31
Sudáfrica	2,35		1,67		0,30		0,96	6	1,55	1,10	0,63	2,00
Tailandia	6,99	6	2,34		0,00		4,62	4	4,61	1,54	0,01	9,58
EE. UU.	7,30	5	9,42	5	2,17	3	0,19		4,81	6,20	4,55	0,40
Emiratos Árabes	0,00		0,15		1,60	9	1,37	9	0,00	0,10	3,35	2,84
Muestra	124,19		106,03		20,52		39,42		81,87	70,00	42,93	81,84
Resto	27,51		45,95		27,28		8,77		18,13	30,00	57,07	18,20
TOTAL	151,59		151,98		47,81		48,18		100,00	100,00	100,00	100,00

Fuente: Adaptado de Asocaña, Informe 2011-2012.

Para la producción de azúcar en los ingenios azucareros, en los cuales la caña de azúcar cosechada en los campos es recibida para su procesamiento y transformación en azúcar y otros subproductos. A lo largo de dicho proceso se producen pérdidas de sacarosa,

¹ Colombia está ubicada en la cuarta posición de la Tabla 1.

² tmvc: toneladas métricas en su equivalente a volumen de azúcar crudo.

disacárido del cual se obtiene el azúcar. Éstas pérdidas de sacarosa pueden tener su origen en diversos factores tales como microbiológicos y operacionales; las pérdidas de sacarosa por factores microbiológicos son debidas a la acción de microorganismos que bajo ciertas condiciones reducen el contenido de sacarosa en la caña y durante el proceso de extracción del jugo de la misma, mientras que las pérdidas por factores operacionales son exclusivamente por inadecuadas prácticas operativas durante el corte, alce y transporte de la caña de azúcar a los patios de fábrica, como el proceso de producción del azúcar en la fábrica (Peter, 2012).

Las principales pérdidas de sacarosa en las fábricas se registran como: Pérdidas en el bagazo, en cachaza, en miel final y como indeterminadas, constituyendo las pérdidas en la miel final, el mayor porcentaje de las pérdidas totales, adicional a estas se presenta las pérdidas en patio de fábrica o de caña.

Los proyectos sobre las pérdidas de sacarosa, apoyados por Cenicaña y varios ingenios, han permitido establecer rangos de pérdidas de sacarosa que ocurren como consecuencia de la quema previa al corte y por el efecto del tiempo de permanencia de la caña en el campo después del corte y los patios de fábrica ya sea en equipos de transporte o caña apilada en piso, en la siguiente tabla se observa la pérdida de sacarosa por apilamiento de la caña en patio en el ingenio Mayagüez (Larrahondo, 2001), uno de los estudios base para la presente investigación.

Tabla 2. Pérdidas de sacarosa en patio por apilamiento.

Horas (no.)	Variedad CC 85-92						Variedad MZC 74-275					
	Sac. (% en caña)		Pureza (%)		Sac. (% pérdida)		Sac. (% en caña)		Pureza (%)		Sac. (% pérdida)	
	Q	SQ	Q	SQ	Q	SQ	Q	SQ	Q	SQ	Q	SQ
AC	14,6	14,1	90	90	0	0	17,1	16	91	91,4	0	0
0	14,2a	14,1a	89,5a	89,0a	3	0	16,6a	16,0a	91,0a	91,4a	3	0
6	13,7ab	13,4a	88,9a	88,5a	6,5	4,9	15,9ab	15,0b	90,4a	91,4a	7,2	6,2
12	13,7ab	13,3a	88,3ab	87,9a	6,5	5,7	15,6ab	14,4b	90,0a	89,6a	9	10
18	13,6ab	13,4a	89,0ab	88,0a	7,2	4,9	15,6ab	14,8b	90,0a	90,4a	9	7,5
24	13,0b	12,9a	88,7b	88,7a	11,4	8,5	15,2b	14,8b	88,8a	90,9a	11,4	7,5
AC, Datos de sacarosa y pureza de la caña en el campo antes de la cosecha												
Q, caña quemada. Letras iguales indican diferencias no significativas a un nivel de confianza del 95%												
SQ, caña sin quemar. Letras iguales equivalen a diferencias no significativas a un nivel de confianza del 95%												

Fuente: Adaptado Carta trimestral No.1 Cenicaña año 2001.

Con base en lo anterior, la presente investigación surge de la necesidad de identificar los factores que generan mayor impacto negativo dentro del proceso de almacenamiento de caña en patio de fábrica, en un ingenio azucarero del Valle del Cauca, con el fin de minimizar la concentración de sacarosa que se pierde en dicho proceso, el proyecto de investigación se apoyados en la metodología DMAIC³ que es un proceso sistemático, científico, basado en hechos y datos. DMAIC es un procedimiento estructurado para la resolución de problemas ampliamente utilizado en calidad y mejora de procesos. A menudo se asocia con las actividades de Six Sigma, y casi todas las implementaciones de Six Sigma emplean el proceso DMAIC para la gestión de proyectos y finalización. Sin embargo, DMAIC no está necesariamente vinculado formalmente a Six Sigma, y se puede utilizar independientemente del uso de Six Sigma en una organización. Es un procedimiento muy general (Montgomery, 2009, p 46).

El Diseño de Experimentos (DOE) es una metodología para la aplicación sistemática de la estadística en la experimentación, y consiste en una serie de pruebas en las que se realizan los cambios intencionales a las variables de entrada (factores) de un producto o proceso, de modo que se pueda observar e identificar las razones de estos cambios en la respuesta de salida (variable de respuesta). El DOE puede proporcionar un método rápido y económico para comprender y optimizar productos y procesos (Tanco, et al. 2007).

El Diseño de Experimentos es una de las herramientas utilizadas en las etapas de Analizar y Mejorar de los proyectos que se desarrollan bajo la metodología Six Sigma o la DMAIC, en este orden de ideas, la aplicación de DOE en la presente investigación contribuirá en la determinación de factores influyentes en las pérdidas de sacarosa por almacenamiento de caña en patio de Fábrica, y proponer así un plan de acción que contribuya en la mejora dicho proceso.

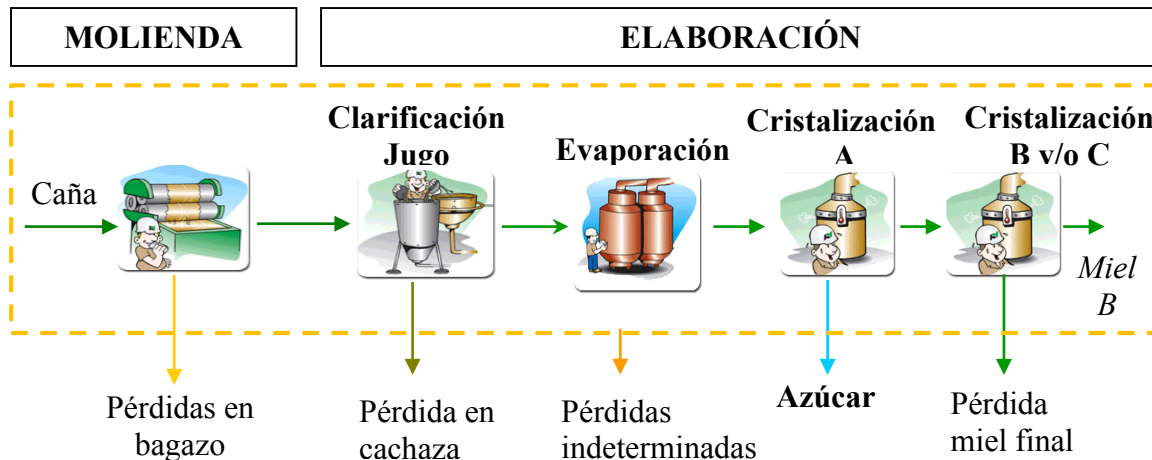
³ El acrónimo DMAIC se refiere a las etapas de: Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar; las cuales se detallarán en la propuesta metodológica del presente trabajo de investigación.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de fabricación de azúcar ocupa uno de los sectores económicos de mayor importancia en Colombia para el año 2011; según el informe Cenicaña el sector azucarero en el país aportó aproximadamente el 1% del PIB total, el 3.02% del PIB Industrial y el 3.91% del PIB Agrícola, generando impactos positivos a la economía del país. El *Cluster* del azúcar en Colombia se encuentra constituido por 13 ingenios de los cuales 12 son cogeneradores de energía, cinco destilerías de alcohol carburante, un productor de papel, una empresa sucroquímica, más de 40 empresas de alimentos, más de 50 proveedores especializados, tres empresas de gaseosas y conforman una área sembrada de aproximadamente 223.903 hectáreas en el año 2011 de las cuales el 75% son de proveedores y el 25% de propiedad de los ingenios (Asocaña, 2012).

El proceso de elaboración de azúcar se inicia en el campo y se consolida en la fábrica, debido que la caña de azúcar concentra su fotosíntesis en la producción de alimento transformando la energía de sol en sacarosa (azúcar). Una vez la planta ha alcanzado lo que para los agrónomos se conoce como su punto de madurez, significa que ha logrado su máximo potencial de sacarosa posible bajo las condiciones en que fue sembrada, abonada, regada y madurada. A partir de ese momento el proceso industrial que se desarrolla entre cosecha y fábrica, tiene como objetivo principal, hacer que esa concentración de sacarosa se mantenga, es decir, que las pérdidas de sacarosa sean las mínimas posibles antes y durante la elaboración de azúcar (ver Figura 2), adicional a estas pérdidas existen otras que transcurren entre las actividades de quema o corte de la caña de azúcar hasta que se prepara la caña para la extracción de jugo en el tándem de molinos en la Fábrica, las cuales se abordaran con mayor detalle, a medida que se avance en el presente trabajo de investigación.

Figura 2. Esquema de las pérdidas de sacarosa en el proceso de elaboración de azúcar



Fuente: Adaptado estandarización de los sistemas de medición en los ingenios azucareros de Colombia, año 2012.

La Tabla 3 presenta las pérdidas que se nombraron en la figura anterior, para el ingenio objeto de estudio, los datos corresponde al año 2012.

Tabla 3. Porcentaje de pérdidas de sacarosa en el ingenio objeto de estudio

Pérdida en	% Caña ⁴	% Sac Caña ⁵
Miel F	0,871	6,468
Cachaza	0,104	1,032
Indeterminados	0,07	0,211
Bagazo	0,525	3,972
TOTAL	1,57	11,683

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó, adicional de las pérdidas de sacarosa que se ilustran en la Figura 2. También se presentan otras pérdidas, las cuales inician desde el momento en que se quema y/o corta la caña de azúcar en los campos hasta que se realiza la extracción de jugo de la caña, en el tándem de molinos; presentándose en las actividades de quema y/o corte, alce y transporte de caña al patio de fábrica, los cuales hacen parte del macroproceso

⁴ Las pérdidas % Caña son calculadas con base en las toneladas de caña molida en determinado periodo.

⁵ Las pérdidas % Sac Caña son calculadas con base en las toneladas de caña molida por el promedio de sacarosa de la caña de azúcar en determinado periodo.

de suministro de caña a fábrica, también en las actividades de almacenamiento de caña de azúcar en patio y en el lavado de la misma, las cuales hacen parte del proceso fabril.

En el suministro de caña de azúcar a fábrica se presentan una serie de condiciones que aceleran la degradación de la caña aumentando las pérdidas de sacarosa, este macroproceso consiste el corte y/o quema de la caña, el alce y transporte de la misma en equipos de transporte o vagones, que puede variar de dos a ocho vagones unidos, dependiendo del tipo de vía a transitar y de la normatividad del ministerio de transporte, son tirados por un vehículo (tracto-mula o tractor), desde el campo hasta el área de patio, para su ingreso a descargue en las mesas y se proceda a preparar la caña para la molienda, de ser necesario se dejan almacenada en equipos de transporte (vagones) o se apila la caña en piso para cumplir con las políticas de stock del ingenio o liberar equipo para seguir suministrando la caña a fábrica (disponibilidad de maquinaria). La configuración más utilizada para suministro de caña larga⁶ por el ingenio objeto de estudio se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Configuración más utilizada en suministro de caña a Fábrica.

Vagón	Capacidad (m ³)	Diagrama
HD 1.200	44,0	
HD 1.700	60,0	

Fuente: Elaboración propia.

Para efectuar el descargue en las mesas se tiene en cuenta el tipo de corte, es decir, si es caña trozada⁷ tiene prioridad y sigue una política FIFO (first in, first out), la rotación de stock de caña larga se debe hacer cada seis horas si está en equipo y cada cuatro horas si está apilada en piso (lo cual no se cumple y pueden transcurrir hasta 48 horas la caña almacenada en el patio de fábrica)⁸.

⁶ Caña larga, caña de azúcar que ha sido cosechada de forma manual, el corte lo realiza un trabajador (cortero).

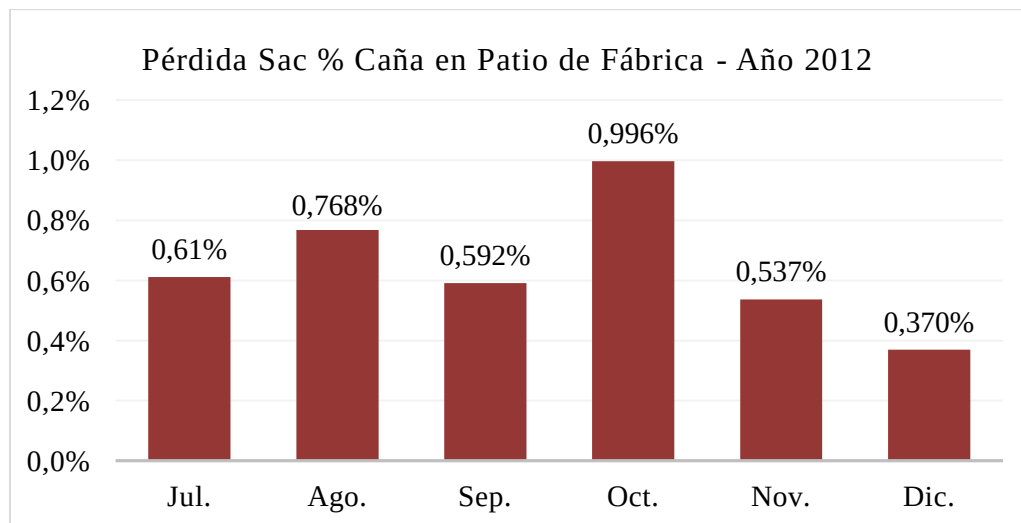
⁷ Caña trozada, se refiere a la caña de azúcar cosechada por máquinas especiales (cosechadoras).

⁸ Información proporcionada por el área de Control Procesos del ingenio objeto de estudio.

Los puntos críticos de la pérdida de concentración de sacarosa en la caña de azúcar que se van abordar en el trabajo de investigación, están ubicados específicamente en la parte operacional del proceso de transición entre el macroproceso de suministro de caña de azúcar y el macroproceso productivo. Por consiguiente, la presente investigación se concentra en el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica. A continuación se presentan las pérdidas en patio de caña en el periodo Julio – Diciembre del año 2012, periodo en el cual la compañía inicia el cálculo y seguimiento del indicador pérdida por permanencia en patio y lavado de caña. (Ver Gráfico 1 y Gráfico 2).

En los Gráficos 1 y 2 se representan las pérdidas de sacarosa por tiempo de permanencia en patio y lavado de la caña de azúcar en el ingenio objeto de estudio, pérdida de tipo % Caña (ver Gráfico 1) y % Sac Caña (ver Gráfico 2), para tener una perspectiva más clara de la magnitud de dichas pérdidas.

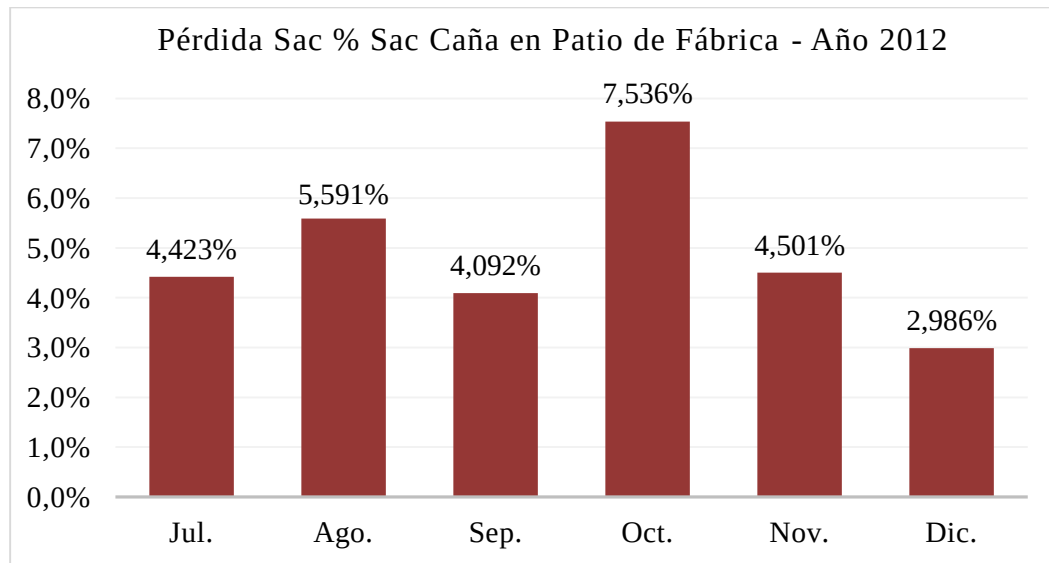
Gráfico 1. Pérdidas de sacarosa por permanencia en patio y lavado de caña.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presentan las pérdidas % Sacarosa Caña ó % Sac Caña, para el periodo Julio – Diciembre del año 2012, periodo en el cual, el ingenio objeto de estudio inicia con el calculo del indicador pérdida por permanencia en patio y lavado de caña.

Gráfico 2. Pérdidas de sacarosa por permanencia en patio y lavado de caña.



Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas de sacarosa que se presentan en el proceso descrito anteriormente genera a su vez pérdidas de tipo económico e incluso esta situación puede generar impacto en el nivel de servicio de la compañía; debido a que la proporción de sacarosa que se pierde en el proceso puede traer como consecuencia un incumplimiento en los requerimientos de producción establecidos en el programa maestro, en este sentido, existe un riesgo de que el programa de producción no pueda responder a las necesidades de los clientes.

En este orden de ideas, la presente investigación busca formular un plan de acción que contribuya en la minimización de las pérdidas de sacarosa en el proceso objeto de estudio.

2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación consiste en determinar los factores que más influyen en el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica, y cuales adquieren un impacto significativo en esta pérdida de sacarosa; para posteriormente proponer un plan de acción que contribuya en el mejoramiento de las etapas de almacenamiento de caña, en ese sentido, contribuir en la minimización de las pérdidas de sacarosa en este proceso y a su vez en la disminución de las pérdidas totales de la compañía.

La importancia de este proyecto se fundamenta en lo económico, conociendo la dimensión y causas del problema se pueden implementar los medios para minimizar la degradación de la caña de azúcar, así la recuperación de esta sacarosa representa una suma importante que asciende alrededor de \$7.000⁹ millones de pesos (Colombianos) al año que se dejan de ingresar al balance financiero, la recuperación de esta cifra facilitará la inversión en nuevas tecnologías y mayor cantidad de equipos de transporte disponibles para las operaciones agrícolas, haciendo los procesos más eficientes y competitivos en el mercado nacional e internacional¹⁰. La implementación de nuevas prácticas y metodologías de seguimiento y control mediante estándares predeterminados para la operación, facilitan las condiciones para que los miembros del equipo de la estación de almacenamiento de caña (Breakeros, operarios de cargadores, operarios de grúas de descargue y supervisores), puedan mantener bajo control la operación del proceso que ejecutan; por otro lado se pretende reducir la carga contaminante vertida a los afluentes, los cuales son utilizados por la compañía en el proceso de fabricación y por la población del ingenio como fuente de abastecimiento de agua.

Con base en este método analítico se podrá cuantificar estas pérdidas de sacarosa por almacenamiento de caña en patio con mayor precisión, mediante una revisión de cada una de las etapas que concierne al apronte de caña, así generar un plan de acción que contribuya a minimizar estas pérdidas de sacarosa y su impacto económico.

⁹ La pérdida económica en mención solo involucra el cálculo de los quintales de azúcar que se deja de producir, debido a la pérdida por permanencia en patio y lavado de caña.

¹⁰ Información proporcionada por el área de Control Procesos del ingenio objeto de estudio.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Aplicar un Diseño de Experimento que contribuya a minimizar las pérdidas de sacarosa en el proceso almacenamiento de caña de azúcar en patio de un ingenio azucarero del Valle del Cauca.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en el área de patio para la empresa objeto de estudio.
- Determinar los factores que más influyen en la pérdida de sacarosa en patio de caña mediante un diseño de experimentos.
- Realizar un plan de acción que contribuya a minimizar el impacto que generan los factores determinantes en la pérdida de sacarosa en el proceso de almacenamiento de la caña de azúcar.

4. MARCO DE REFERENCIA

La bibliografía existente sobre diseños de experimentos aplicados para la mejora de procesos es basto en ambientes de manufactura, pero, en ambientes con las características que presentan los ingenios azucareros, la información que existe es bastante limitada, sin embargo continuación se presenta una revisión bibliográfica orientada a este sector poco explorado en la literatura.

4.1. ESTADO DEL ARTE

El acelerado proceso de globalización de la economía mundial ha transformado el escenario competitivo para todos los sectores productivos de bienes transables. En particular, la situación para los productores agropecuarios en el mundo se ha modificado debido a este fenómeno, lo cual, ha conllevado a que las organizaciones formulen y fortalezcan las políticas y estrategias que mejoren su productividad y competitividad en el mercado.

En particular, el sector azucarero colombiano, en los últimos años ha experimentado una evolución de su proceso fabril¹¹, en busca de una transformación sostenible en todo su proceso, aprovechando al máximo todos sus recursos y mejorando sus procesos, en ese sentido, los estudios que se presentan a continuación presentan un panorama donde se realizó o se propuso la mejora de un proceso con la metodología experimental o el diseño de experimento.

Larrahondo & Briceño (2004) estudian los parámetros básicos que contribuyen con el deterioro de la caña de azúcar (pérdida de sacarosa) en los procesos comprendidos entre cosecha y molienda. Además se exponen los resultados de las experimentaciones realizadas en varios ingenios azucareros del Valle del Cauca, donde se estudiaron factores como: variedades de caña, sistemas de cosecha (corte manual o mecanizado), tiempos de permanencia y niveles de materia extraña para estimar el impacto de estas variables sobre

¹¹ Informe anual 2012-2013 de Asocaña.

la calidad de la caña, incluyendo la concentración de sacarosa en diferentes momentos desde que se corta la caña en los campos hasta que llega a los patios de Fabrica.

También utilizan una aproximación matemática, con una ecuación cinética de primer orden para estimar los rangos de pérdidas de sacarosa debidas a la quema de la caña antes del corte y los tiempos de permanencia entre corte y molienda. Además se analizan los efectos de la materia extraña mineral y vegetal sobre el porcentaje de azúcar recuperable estimado y las variaciones que pueden ocurrir debido a las condiciones meteorológicas reinantes al momento de la cosecha y durante el tiempo que transcurra hasta que llegue la caña al tándem de molinos.

Se utilizaron tecnologías de análisis como la cromatografía líquida de alta precisión (HPLC) y la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR). El análisis estadístico se desarrolló con modelos proporcionados por Cenicaña y se establece una ecuación general que integra los rangos de pérdidas de sacarosa entre cosecha y molienda atribuidas a los tiempos de permanencia de la caña en el campo o en equipos de transporte y los niveles de materia extraña. La validación comercial de los resultados fueron realizados en varios ingenios azucareros, donde expone la importancia de eliminar la práctica de apilar grandes cantidades de caña en los patios de las fábricas o reducir al mínimo los tiempos de permanencia de la caña en las condiciones estudiadas.

En el artículo de Medina et al (2006) se propone mejorar la extracción de jugo de caña de azúcar de un ingenio azucarero bajo la metodología experimental, realizando un diseño de experimento factorial 2^{5-1} , donde los factores son velocidad de picadora I, velocidad de picadora II, ajuste de salida de las masas del molino, presión hidráulica y tipo de corte de la caña como factor de ruido. Los resultados obtenidos permitieron determinar que la interacción entre la velocidad de la picadora I y la presión hidráulica tienen mayor incidencia en la extracción del primer molino. Lo que se evidencia con la mejora de la extracción global del tándem a un 96.1%, proporcionando ganancias adicionales por aproximadamente US\$ 490.000 durante el periodo que se realizó el estudio.

El estudio realizado por Larrahondo & Briceño (2004), no poseía una estructura bien definida de diseño de experimentos, pero sigue una metodología experimental y en la

cual se determinó la importancia de eliminar el apilamiento de grandes cantidades de caña en los patios de fábrica o reducir los tiempos de permanencia de la misma en las condiciones que se realizó el estudio, con el fin de disminuir el deterioro de la caña; conclusión muy general a diferencia del estudio desarrollado por Medina et al (2006) con su Diseño de Experimento factorial 2^{5-1} , los resultados del DOE especifican de manera explícita los factores a modificar para mejorar el proceso en estudio, es esta caso la extracción de jugo de caña de azúcar en un tándem de molinos de un ingenio.

Salomon (2009) se estudia el deterioro biológico asociado con las demoras excesivas entre la cosecha y la molienda de caña de azúcar y agravada por varios factores intrínsecos y extrínsecos que causan enorme disminución en el tonelaje de caña (pérdida de peso), mediante experimentos. Además de los retrasos entre cosecha y molinos, los factores tales como la temperatura ambiente, la humedad, la variedad de caña, el período de almacenamiento, estado de madurez de la caña, entre otros. Se han tenido en cuenta y encontrados como responsables de la disminución de la sacarosa en la caña. Además el efecto adverso que generan en el proceso de elaboración de azúcar en fábrica. También se estudian los métodos físico-químicos como la pulverización de agua, agua electrolizada, la solución bactericida, uso de anti-inversión y formulaciones anti-bacterianas y foliar antes de la cosecha y aplicación de zinc en el suelo y compuestos mangnous para reducir el deterioro de la caña en el campo y el patio de la fábrica. Los resultados de la investigación proporcionaron algunos de los métodos más útiles y actuales para la industria azucarera, que son empleados para reducir al mínimo posible las pérdidas de calidad de la caña después de la cosecha en el campo hasta el tándem de molienda.

En el artículo “Studies on minimizing quality and quantity losses in stale cane” Srivastava R.P., et al (2009) estudian por medio de experimentos los métodos físicos y químicos para minimizar las pérdidas de sacarosa en tallos almacenados de tres variedades de caña de azúcar. En el método físico, se incluyeron cinco tratamientos, Caña almacenada bajo sombra, agua pulverizada, cañas cubierta de basura y la caña cubierta de basura + agua pulverizada. Cada tratamiento demostró su eficacia en la reducción de las pérdidas de sacarosa y de peso de la caña viajas, siendo mayor las pérdidas en la caña cubierta con basura + agua pulverizada. Para el método químico, se analizaron cinco sustancias

químicas cloruro mercuríco, ácido salicílico, Bifluoruro de amonio, sulfato de zinc y ácido de sodio se aplicaron (1% concentración) en cañas cosechadas. Entre estos productos químicos, se encontró que el ácido de sodio es relativamente más eficaz en minimizar las pérdidas de sacarosa en la caña de azúcar viejas en comparación con otros tratamientos.

El estudio realizado por Srivastava et al (2009) se puede sugerir a los agricultores y las fábricas de azucareras, que para reducir la pérdidas de la calidad de la caña por el tiempo de permanencia que se da entre cosecha y molienda, la caña cosechada y cubierta de basura debe ser rociada con una solución acuosa de los productos químicos eficaces (ácido de sodio) para reducir al mínimo las pérdidas de peso y calidad de la caña.

En artículo de investigación desarrollado en el sector azucarero, Ruiz (2010) estudia el uso de diseño de experimentos y la manera de evaluar la eficiencia del diseño, introduciendo el indicador que refleje la calidad del experimento a través del cálculo del coeficiente de variación. La metodología consistió en analizar la información de 12 experimentos de fertilización en el cultivo de caña de azúcar con el diseño de bloques al azar. Con los resultados del análisis de varianza se calculó la eficiencia relativa para evaluar la eficiencia del diseño de bloques al azar con respecto al diseño completamente al azar. Con el coeficiente de variación se valoró la calidad de los experimentos. Los resultados obtenidos fue que en el 58% de dichos experimentos, el diseño experimental fue el apropiado. Respecto a la calidad de los mismos, el 25% no tuvo la calidad esperada, por lo que se recomienda identificar los factores que influyeron en estos resultados. En consecuencia, es posible que algunos experimentos utilicen el diseño experimental erróneo, generando resultados no confiables y pérdidas económicas importantes por haber sido realizados en varias localidades y ciclos agrícolas, ya que a menudo los experimentos se realizan y repiten en espacio y tiempo para generalizar resultados confiables para un área determinada.

Kornecki et al. (2010) estudian las pequeñas zanjales perpendiculares a las filas de caña de azúcar, responsables de la transferencia del agua a los canales y tienen que ser reacondicionadas para ser eficaces. Con el tiempo, las lluvias provocan desprendimientos de tierra, las quemadas por cosecha, producen sedimentos que se acumulan en las principales zanjales y disminuyen la capacidad de estas estructuras, por lo que requieren frecuentemente

una limpieza de sedimentos costosa. Una alternativa a la quema caña, es dejar el residuo de la caña de azúcar en la superficie después de la cosecha, lo que mejoría la calidad del suelo en términos de aumento de carbono orgánico del suelo, y disminución en costos por dejar la realizar limpieza de las zanjás. Para evaluar estos beneficios, se llevó a cabo un experimento para estudiar los efectos de los residuos después de la cosecha de la caña de azúcar y de que se aplicará poliacrilamida o PAM (es una enmienda de origen industrial que modifica las propiedades hidrofísicas del suelo) directamente en las zanjás. Doce parcelas (0,1 ha cada una) se plantaron con caña de azúcar. Para el tratamiento de residuos, el residuo se dejó en el lugar después de la cosecha. La comparación se hizo con cuartos de desagües similares en seis parcelas en las que los residuos se eliminaron por combustión. Los tratamientos fueron: (1) los residuos quedan en el campo, (2) no se deja residuos, (3) los residuos + PAM aplicado, y (4) ningún residuo + PAM aplicado. Se obtuvo mediciones de las profundidades por erosión / sedimentación (después de cuatro eventos de lluvia). Los residuos de caña de azúcar en el campo redujo significativamente la degradación del suelo en un 28% en comparación con el resto, donde el residuo fue eliminado mediante quema. Los resultados también muestran que, además de residuo dejado en el campo, la aplicación de una solución acuosa de PAM a cuatro desagües redujo aún más la degradación del suelo en un 34%, sin embargo, no se encontró ninguna diferencia significativa en la degradación del suelo entre el residuo sólo y residuo + tratamientos PAM. Dejando residuos de caña de azúcar en el campo después de la cosecha en lugar de la quema podría reducir la pérdida de suelo para siembra y drenajes superficiales en 4,2 toneladas por año. Este tipo de gestión de residuos también puede aportar beneficios económicos por \$106/ha, debido a la reducción en la frecuencia de reacondicionamiento de la superficie de las zanjás de drenaje dentro del campo.

Saxena et al (2010) estudian la caña de azúcar, donde una vez separada de tierra pierde su propiedades para sintetizar sacarosa. Así, un cultivo cosechado bien madurado puede perder su azúcar dentro de unos pocos días, lo que tiende a aumentar aún más debido a la alta temperatura ambiente. Se diseñó un experimento para examinar el efecto de almacenamiento en horas, en tres edades de maduración analizando los cambios bioquímicos ocurridos en jugo de caña dejada de 0 h - 96 h. La temperatura ambiente osciló entre 40 y 42 C. total de sólidos solubles, sacarosa, coeficiente de pureza, dextranas, las

proteínas, el contenido de aminoácidos libres, las tasas de inversión de ácidos y neutros fueron analizadas. El contenido en sacarosa se deterioró rápidamente después de 24 h almacenamiento. El contenido de azúcar invertido y dextranas incrementó rápidamente después de 48 h. contenido de aminoácidos libres se incrementaron rápidamente hasta 72 h. Contenido de aminoácidos libres fueron mayores en el grupo de edades tempranas que los grupos de edades mediadas y tardías. Los resultados obtenidos para los grupos fue que el deterioró de sacarosa aumento después de 24 h. la formación de dextranas aumento rápidamente a las 48 h en los grupos con edades tempranas debido a una mayor concentración de sacarosa con ello el total de solidos solubles aumentó durante los períodos almacenamiento. Los grupos de maduración mediana y tardía mostraron valores inferiores de dextranas, contenido de aminoácidos libres, proteínas y actividades inversión. También se ha observado que grupos de edades medianas y tardías tienen un contenido de sacarosa inferior que el grupo de edades tempranas, las cuales se deterioraron menos durante almacenamiento. Al final del almacenamiento en el jugo de la caña de las variedades de maduración temprana, los valores de sacarosa y brix fueron superiores a los de las edades medianas y tardías, debido a las actividades de inversión (hidrólisis), contenido de aminoácidos libres y proteínas, posiblemente por la mayor infestación microbiana (dextranas) que afecta la caña de azúcar de edad avanzada.

Por otra parte la investigación realizada por Medina et al. (2010) comparan los diseños de experimentos, Taguchi y Shainin, para definir qué metodología propone el mayor porcentaje de extracción del primer molino en un ingenio azucarero, mejorando la extracción global del tándems de molinos. Para la comparación se analiza los modelos obtenidos a través de la aplicación de cada uno de los diseños, con el fin de observar el mejoramiento propuesto por cada una de ellos con respecto al porcentaje de extracción del primer molino y extrapolando este mejoramiento se puede obtener una estimación del aumento en la eficiencia global del tándem de molienda y de esta manera establecer el impacto económico de cada solución. Los resultados obtenidos con el diseño de Taguchi, el molino analizado alcanzo una eficiencia del 63.9%, lo que se refleja en aumento en la extracción global a un 95.2%, con ganancias adicionales a la empresa de US\$27.000 y el diseño de Shainin, el molino analizado alcanzo una eficiencia del 64.5%, lo que se refleja en aumento en la extracción global a un 95.3 % con ganancias adicionales de US\$28.000.

Mediante la comparación se pudo observar como el diseño de Shainin se adaptó mejor a las características del proceso en estudio, lo que se refleja en un nivel de extracción del 95.3% mayor al nivel de extracción de Taguchi que fue del 95.2%.

Con base en los diseños de experimentos de Taguchi y Shainin que se aplicaron anteriormente para la mejora del proceso de extracción del jugo de la caña de azúcar, se obtuvo una extracción de los molinos analizados de 63.9% y 64.5%, mejorando la extracción global en un 95.2% y 95.3% respectivamente, con el diseño de experimento factorial 2^{5-1} implementado por Medina et al. (2006), se estima que el molino analizado podría alcanzar una eficiencia del 71%, mejorando la extracción global a un 96.1%, debido a que las condiciones en las que se realizaron los dos trabajos influyen en los resultados finales, es evidente que el diseño factorial 2^{5-1} proporciona una mejor extracción global del tándem de molinos, lo que conlleva a que podamos decir que este diseño factorial 2^{5-1} se ajusta mejor al proceso en estudio y tiene un mayor potencial de mejora que los diseños de Taguchi y Shainin.

Arango et al (2009) aunque no es un estudio relacionado con la industria azucarera, es una investigación que se basa en la metodología experimental y el uso de cromatografía para medir la variable de interés. La investigación pretende mejorar el proceso de extracción del aceite esencial de las hojas de laurel de cera mediante la técnica de arrastre con vapor y su efecto sobre la composición de los metabolitos secundarios volátiles presentes en dicho aceite. Los factores estudiados en el proceso de extracción fueron el tamaño de partícula y el tiempo de extracción y las variables de respuesta consideradas fueron el área total del cromatograma (cuentas) como parámetro indicador de la concentración del aceite y el porcentaje relativo del componente mayoritario. Por medio del análisis de varianza se determinó que tanto el tiempo como la interacción tiempo–tamaño de partícula tienen un efecto significativo sobre la concentración del aceite esencial de *Morella pubescens* medida como área total del cromatograma, mientras que la variable tamaño de partícula por sí sola no mostró un efecto estadísticamente significativo.

También se determinó que, en la técnica de arrastre con vapor, al incrementar el tiempo de extracción de 60 a 180 minutos se logra un incremento significativo en la concentración de trans-Cariofileno como componente mayoritario del aceite esencial de

Morella pubescens, mientras que la variación en el tamaño de partícula no ejerció efecto significativo sobre dicho componente.

Cruz et al (2012) abordan los inconvenientes y desventajas que se crean al utilizar el diseño de experimentos de Taguchi y en especial la razón señal-ruido, las cuales pueden hacer dispendioso un diseño experimental. Se considera que mucho de los diseños que sugiere Taguchi, tanto para el arreglo interno como para el arreglo externo, son diseños factoriales altamente fraccionados, lo cual no permite obtener estimaciones de la interacción de los factores controlables. La metodología consiste en una revisión bibliográfica de críticas a la metodología de Taguchi en la razones señal-ruido. Los resultados de estas discusiones han dado lugar a valiosos aportes, desde nuevos planes experimentales hasta métodos de identificación de factores, algunos de estos aportes adecuan métodos estadísticos ya existentes, como los diseños en parcelas divididas o split-plot, la metodología de superficie de respuestas y los planes experimentales óptimos. Este trabajo no mejora un proceso fabril como los expuestos anteriormente, pero si expone a interesados en la herramienta estadística DOE, que existen otros Diseños de Experimentos de mayor facilidad en su aplicación y más cuando se está explorando por primera vez esta herramienta estadística.

Verma et al (2012) en el documento “Influence of postharvest storage temperature, time, and invertase enzyme activity on sucrose and weight loss in sugarcane” demuestra el impacto que tiene las condiciones ambientales, el tiempo de almacenamiento y la madurez de la caña de azúcar en el desdoblamiento de la sacarosa y la pérdida de peso de la caña. La metodología consiste en que los cultivadores de caña de azúcar de dos grupos de maduración, que se denominan tempranas y tardías, se recolectaba la caña durante determinados meses; se determinó un mínimo y máximo de temperatura para cada mes, la caña recolectada se almacenó durante 24, 48, 72, 96 y 120 horas; estudiando la degradación de la sacarosa en el jugo de caña y la pérdida de peso de la caña de azúcar. Manifestando que el porcentaje extraíble de sacarosa en el jugo se redujo significativamente con el aumento de los períodos de almacenamiento y la temperatura, el desdoblamiento de la sacarosa se aumentó durante 0-120 horas de almacenamiento y la disminución de peso de la caña de azúcar aumentó en los meses con mayor precipitación y humedad relativa (Mayo

y Junio). El desarrollo de híbridos resistente a las condiciones ambientales al tiempo de permanencia puede ser una alternativa posible para disminuir las pérdidas de sacarosa. Sin embargo, la combinación de todas estas características en un solo híbrido, sin afectar el rendimiento y la calidad de la caña, requerirá más recursos que la mayoría de programas de mejoramiento de la caña de azúcar puedan afrontar.

La metodología es experimental igual al desarrollado por Larrahondo & Briceño (2004) donde se estudian factores y condiciones similares que afectan la concentración de sacarosa, pero adicional, se estudia la disminución de peso en la caña de azúcar que afecta la cantidad de jugo que se puede extraer en los tandems de molinos de un ingenio.

Para finalizar en el artículo “Manufacturing Industries Need Design of Experiments (DoE)” Tanco, et al (2007) exponen la necesidad de una técnica eficaz y práctica para la experimentación en la industria, en ese sentido, se pretende estimular a la comunidad de ingeniería para aplicar de manera eficaz el Diseño de Experimentos (DoE), y así poder hacer frente a los problemas de calidad en los procesos clave de las organizaciones. Por lo anterior, presentan una metodología basada en el proceso DMAIC y proponen las herramientas que se pueden utilizar en cada una de las etapas. Este estudio es relevante para la presente investigación, debido a que proporciona una guía de las herramientas a utilizar para el análisis de la información y así cumplir con los objetivos propuestos.

Durante la recopilación de los estudios se observa que la metodología experimental es muy utilizada en la mayoría de investigaciones, obteniendo resultados muy concretos sobre el tema de interés, lo que conlleva a que la situación problemática presente sea abordada de una forma estructurada con la herramienta Diseño de Experimento, la cual permite identificar y cuantificar aquellos factores que influyen de manera significativa en el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica y posteriormente formular un plan de acción que contribuya en mejorar el proceso objeto de estudio, por lo anterior, se pretende abordar la problemática descrita previamente con la metodología DMAIC¹², tomando como referencia los requerimientos y necesidades de los clientes (internos), apoyándose en una metodología de herramientas y pensamiento estadístico, a

¹² Siglas en inglés de la metodología con los pasos Define, Measure, Analyze, Improve, Control, (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar.)

partir de tres áreas de acción prioritarias: satisfacción del cliente, reducción del tiempo de ciclo y disminución de los defectos (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

Montgomery (2009) afirma “Una de las razones por las que DMAIC es exitosa se debe a que se enfoca en el uso efectivo de un conjunto relativamente pequeño de herramientas” (p 46). (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Herramientas generales de DMAIC.

Tool	Define	Measure	Analyze	Improve	Control
Project charter					
Procces maps & flow charts					
Cause-effect					
Procces capability analysis					
Hypothesis tests, Confidence intervals					
Regression analysis, other multivariate					
Gauge R&R					
Failure mode & effects analysis					
Designed experiments					
SPC and process control plans					

Fuente: Adaptado de Introduction to statititcal, quality control, año 2009.

Con base en la Tabla 5 de las herramientas sugeridas por Montgomery (2009, p49) cuando se explota la metodología DMAIC, para el caso del presente trabajo de investigación se utilizó: Mapa de Procesos, Diagramas de Flujo, Diagrama de Ishikawa (causa-efecto), Análisis de Regresión y Diseño de Experimento; además de herramientas de la calidad como Diagrama de Pareto, Diagrama de Afinidad, Diagrama de Dispersión y 5W+ 2H, con un desarrollo enfocado en mejora continua a través del ciclo PHVA.

4.2. MARCO TEÓRICO

A continuación se presenta información relevante sobre la caña de azúcar y conceptos importantes para el desarrollo de la presente investigación.

4.2.1. La caña de azúcar.

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L), es una gramínea tropical, un pasto gigante, cuyo tallo está compuesto por una parte sólida (fibra) y una parte líquida (jugo), el jugo contiene agua y sacarosa. La fibra es la parte insoluble en agua y está formada principalmente por celulosa. El contenido porcentual de sólidos solubles en agua se denominan comúnmente Brix. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades muy pequeñas, donde la proporción varía de acuerdo con factores como: la variedad de la caña, edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo, abonos, riegos, entre otros (Cenicaña, 1995, p340). A continuación se presentan los constituyentes de la caña.

Tabla 6. Constituyentes de la caña de azúcar.

Promedio de la composición química de los tallos y de los jugos de la caña de azúcar.	
Constituyente químico	Porcentaje*
En los tallos:	
Agua	73 – 76
Sólidos	24 – 27
-sólidos solubles (brix)	10 – 16
-fibra (seca)	11 – 16
En el jugo:	
Azúcares	75 – 92
-sacarosa	70 – 88
-glucosa	2 – 4
-fructosa	2 – 4
Sales	3,0 – 3,4
-inorgánicas	1,5 – 4,5
-orgánicas	1 – 3
Ácidos orgánicos	1,5 – 5,5
Aminoácidos	1,5 – 2,5
Otros no azúcares	
-proteína	0,5 – 0,6
-almidones	0,001 – 0,050
-gomas	0,3 – 0,6
-ceras, grasas, etc.	0,15 – 0,50
-compuestos fenólicos	0,10 – 0,80

*En los tallos, el porcentaje se refiere a la planta de caña y en el jugo a sólidos solubles.

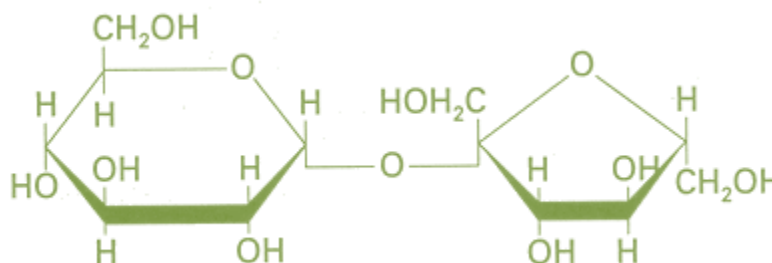
Fuente: Adaptado, Calidad de la caña de azúcar, Cenicaña año 1995.

La razón porcentual entre la sacarosa en el jugo y el Brix se conoce como pureza del jugo. El contenido aparente de sacarosa, expresado como porcentaje en peso y determinado mediante un método polarímetro, se denomina "Pol". Los sólidos solubles diferentes de la sacarosa, que incluyen los azúcares reductores como los no-azúcares, los cuales porcentualmente resultan de la diferencia entre el Brix y la sacarosa.

A continuación se describen los constituyentes a tener en cuenta para la presente investigación, los cuales son la Sacarosa, Glucosa y Fructosa materiales críticos en el proceso de fabril de azúcar y derivados:

- **Sacarosa**

Figura 3. Estructura de la Sacarosa.

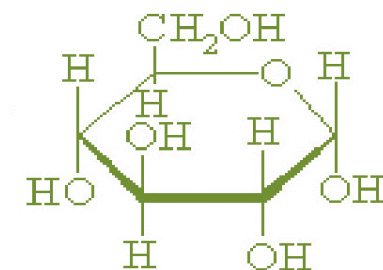


Fuente: Adaptado de Herrera, 2011.

La sacarosa es un disacárido producido por la condensación de la glucosa y la fructosa y tiene la fórmula empírica $C_{12}H_{22}O_{11}$ (peso molecular 342.30 g/mol), la estructura y configuración estereoquímica es la de α -D-Glucopiranosil- β -D-fructofuranósido. La sacarosa cristaliza en solución acuosa como compuesto anhídrido, en forma de prismas transparentes del sistema monocíclico que tienen una densidad de 1.5879 a 15 °C y muestran actividad óptica a lo largo de dos de sus tres ejes. La sacarosa pura se funde a 188°C. En solución este azúcar es dextrógiro con una rotación específica de $[\alpha]_D^{20} +66.53^\circ$ a una concentración de 26 gramos en 100 mililitros de agua. Es muy soluble en agua, como lo son casi todos los azúcares; una solución saturada contiene el 67.09% en peso. La Sacarosa es sólo ligeramente soluble en metanol e insoluble en éter o cloroformo. Cuando se hidroliza, la sacarosa produce cantidades equimolares de glucosa y fructosa, y la mezcla se conoce como azúcar invertida (Herrera, 2011, p12).

- **Glucosa**

Figura 4. Estructura de la Glucosa.

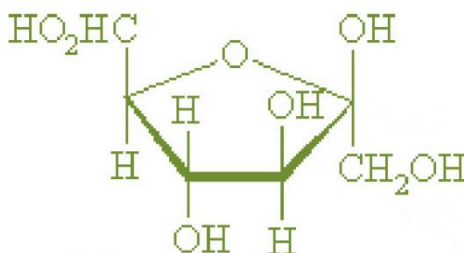


Fuente: Adaptado de Herrera, 2011.

La glucosa es un monosacárido, tiene la fórmula $C_6H_{12}O_6$ (peso molecular 180.16 g/mol), Es una aldohexosa y su estructura recibe el nombre de D-glucopiranososa porque al ciclarse forma un anillo de seis átomos uno de ellos de oxígeno, puede cristalizar en el agua tanto en la configuración α , como en la β y estas dos formas están en equilibrio en solución a temperaturas inferiores a $50^\circ C$, siendo la α -D-glucopiranososa la forma más estable.

- **Fructosa**

Figura 5. Estructura de la Fructosa.



Fuente: Adaptado de Herrera, 2011.

La fórmula empírica de la fructosa es igual a la de la glucosa $C_6H_{12}O_6$ (peso molecular 180.16g/mol) los cristales ortorrómbicos de la fructosa tiene una densidad de 1.598 y una solución al 26% en peso tiene una densidad de 1.1088. Los cristales funden a $105^\circ C$. La fructosa es muy soluble en agua y ligeramente soluble en etanol. Al igual que la glucosa la fructosa es un azúcar reductor, pero posee un grupo cetona en lugar de aldehído con el oxígeno fijado en el carbono dos en lugar de estar en el carbono uno (Herrera, 2011, p14).

4.2.2. Sistemas de almacenamiento

En la mayoría de fábricas de azúcar, la caña no se entrega continuamente 24 horas al día y se requiere almacenar cierta cantidad de caña para la molienda durante la noche. La cantidad de caña almacenada debe ser tan pequeña como sea posible para reducir la tardanza global entre corte y molienda (Peter, 2012).

Varios métodos de almacenamiento de caña son utilizados, todos implicando doble manipulación y costos extra:

- La caña puede ser almacenada en atados y retomada a medida que se necesita.
- La caña puede ser almacenada sobre ruedas, es decir en los vehículos o remolques en los patios de fábrica, para luego descargarse a medida que se necesite.
- Si se utiliza un sistema de contenedores, la caña deberá almacenarse en contenedores.
- La caña puede ser descargada al piso y luego recogida con un cargador frontal o con la uña de un puente grúa. Esta es la opción menos deseable debido al daño causado a la caña.

4.2.3. Deterioro de la caña

El deterioro de la caña y la pérdida de sacarosa entre el corte y la molienda han sido objeto de varios estudios, se sabe que este deterioro empieza casi inmediatamente después del corte, siendo mayor a medida que aumenta el tiempo de permanencia en los patios del molino o en el campo. La tasa de deterioro depende de las condiciones ambientales, de la variedad y del sistema de manejo. Cuando el corte es mecánico, el deterioro es mayor, debido al incremento de las infecciones de origen bacteriano en los tallos. (Larrahondo, J.E., 1995)

En las fábricas por la inadecuada manipulación a la que es sometida la caña produce daños y sumando la acción microbiana, puede apresurar el deterioro y aumentar las pérdidas de sus propiedades, es decir, pérdida de la concentración de sacarosa.

4.2.4. Cromatografía de alta resolución, HPLC “High-Performance Liquid Chromatography”

La cromatografía es una técnica analítica basada en la separación de las moléculas debido a las diferencias en su estructura y/o composición. En general, la cromatografía consiste en mover una muestra por el sistema a través de una fase estacionaria. Las moléculas en la muestra tendrán diferentes afinidades y las interacciones con el soporte estacionario, lo que lleva a la separación de las moléculas. Los componentes de la muestra con interacciones más fuertes con la fase estacionaria se moverán más lentamente a través de la columna que los componentes con interacciones más débiles. Los diferentes compuestos se pueden separar el uno del otro a medida que avanzan a través de la columna. Las separaciones cromatográficas se pueden llevar a cabo utilizando una variedad de fases estacionarias, incluyendo sílice inmovilizado sobre placas de vidrio (cromatografía en capa fina), los gases volátiles (cromatografía de gases), papel (cromatografía en papel) y líquidos (cromatografía líquida) (KUPIEC, 2004).

La Cromatografía de Líquida de Alta Resolución (HPLC) es un tipo de cromatografía de líquidos y se utiliza para separar y cuantificar los compuestos que han sido disueltos en solución. Por lo tanto, el HPLC se utiliza para determinar la cantidad de un compuesto específico en una solución. Por ejemplo el HPLC se utiliza en el sector azucarero para determinar el porcentaje de sacarosa, glucosa y fructosa en el jugo de primera extracción, jugo diluido, miel final, entre otras sustancias.

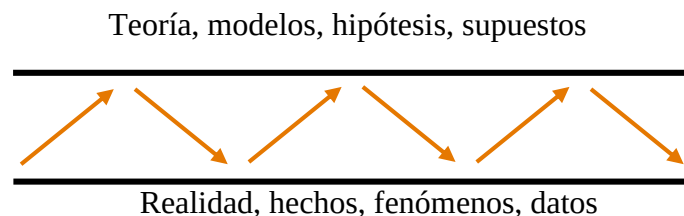
4.2.5. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)

4.2.5.1. *Antecedentes históricos del diseño de experimentos*

El diseño estadístico de experimentos, desde su introducción por Ronald A. Fisher en la primera mitad del siglo XX en Inglaterra, se ha utilizado para conseguir un aprendizaje acelerado. El trabajo de Fisher a través de su libro *The design of experiments* (1935) influyó de manera decisiva en la investigación agrícola, ya que aportó métodos para evaluar los resultados con muestras pequeñas. Los aportes de Fisher le permitieron inferir que las fallas generadas en la forma de realizar los experimentos obstaculizaban el análisis de los resultados del mismo (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Fisher también proporcionó métodos

para diseñar experimentos destinados a investigar la influencia simultánea de varios factores, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Proceso interactivo de la experimentación.



Fuente: Adoptado de Análisis y diseño de experimentos, año 2008.

Los desarrollos posteriores en diseños de experimentos fueron encabezados por George E. P. Box quien trabajó como estadístico durante ocho años en la industria química de Inglaterra y desarrolló la metodología de superficies de respuestas (Véase Box & Wilson, 1951), la cual incluye nuevas familias de diseños y una estrategia para la experimentación secuencial. Es posible afirmar que entre 1950 y 1980, el diseño de experimentos se convirtió en una herramienta de aplicación frecuente, pero solo en las áreas de investigación y desarrollo. Hasta 1970 la aplicación a nivel de planta o procesos de manufactura no estaba generalizada, debido a la falta de recursos computacionales y a que los ingenieros y especialistas en manufactura carecían de la formación en el área de estadística.

En la década de 1980 se dio un gran impulso al conocimiento y la aplicación del diseño de experimentos debido al éxito en calidad de la industria japonesa. El movimiento por la calidad, empezado por los gurús Deming e Ishikawa, promovió el uso de la estadística en la calidad, donde el diseño de experimentos demostró su utilidad tanto en resolver problemas de fondo como para diseñar mejor los productos y procesos. En Japón se destaca el trabajo de Genichi Taguchi cuyos conceptos sobre diseños robustos, también tuvieron un impacto significativo en la academia del mundo occidental. Como respuesta al movimiento por la calidad y la mejora de procesos, las industrias empezaron a entrenar a sus ingenieros en la aplicación de diseño de experimentos. En la actualidad las escuelas de ingeniería han determinado como materia obligatoria en la formación de nuevos ingenieros (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

4.2.5.2. Conceptos básicos en el Diseño de Experimentos

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso de interés, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permite entender mejor situaciones complejas de relación causa- efecto (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

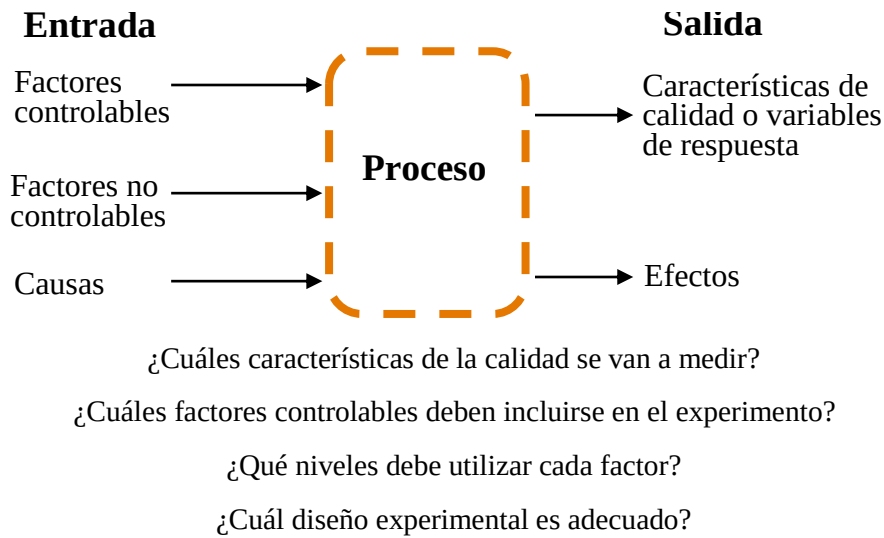
Experimento: un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o procesos, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultados. Asimismo, el experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema.

Unidad Experimental: la unidad experimental es la pieza(s) o muestra(s) que se utiliza para generar un valor que sea representativo del resultado del experimento o prueba. En cada diseño de experimentos es importante definir de manera cuidadosa la unidad experimental, ya que esta puede ser una pieza o muestra de una sustancia o un conjunto de piezas producidas, dependiendo del proceso que se estudia.

Variables, Factores y Niveles: en todo proceso intervienen distintos tipos de variables o factores (controlables, no controlables o de ruido, causas, entre otros.) como los que se muestran en la Figura 7, además de algunos interrogantes al planear un diseño de experimentos.

Variables de respuesta: a través de esta variable se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental, por lo que puede ser una característica de la calidad de un producto una variable que mide el desempeño de un proceso. El objetivo de muchos estudios experimentales es encontrar la forma de mejorar la variable de respuesta. Por lo general esta variable se denota por la letra Y.

Figura 7. Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento.



Fuente: Adaptado de Análisis y diseño de experimentos, año 2008.

Factores Controlables: son variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado. Algunos de estos son los que usualmente se controlan durante la operación normal del proceso (ver Figura 7), y se diferencian porque, para cada uno de ellos, existe la manera o el mecanismo para hacer cambiar el nivel de operación. Algunos factores que normalmente se controlan son: temperatura, tiempo de residencia, cantidad de cierto reactivo, tipo de reactivo, método de operación, velocidad, presión, etc. A los factores controlables también se les llama variables de entrada, condiciones de proceso, variables de diseño, parámetros del proceso, las x de un proceso, o simplemente los factores.

Factores no Controlables o de Ruido: son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso, por ejemplo, algunos factores que suelen ser no controlables son las variables ambientales (luz, humedad, temperatura, partículas, ruido, etc.), el ánimo de los operadores, la calidad del material que se recibe del proveedor.

Un factor que aparece ahora como no controlable, puede volverse controlable si se cuenta con la tecnología y el mecanismo para ello.

Factores Estudiados: son las variables que se investigan en el experimento, respecto de cómo influyen o afectan a la variable de respuesta. Los factores estudiados pueden ser controlables o no controlables, a estos últimos quizás fue posible y de interés controlarlos durante el experimento. Para que un factor pueda ser estudiado es necesario que durante el experimento se haya probado en al menos dos niveles o condiciones. En principio cualquier factor, sea controlable o no, puede tener alguna influencia en la variable de respuesta que se refleja en su media o en su variabilidad. Para fines de un diseño de experimentos deben seleccionarse los factores que se considera, por conocimiento del objeto de estudio, que pueden tener efecto sobre la respuesta de interés. Obviamente si se decide o interesa estudiar el efecto de un factor no controlable, parte de la problemática a superar durante el diseño es ver la manera en que se controlara durante el experimento tal factor.

Niveles y tratamientos: los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental se llaman niveles. Una combinación de niveles de todos los factores estudiados se denomina tratamiento o punto de diseño. Es necesario probar cada tratamiento y obtener el correspondiente valor de Y . los niveles se pueden representar como (-1,1), (bajo-alto), (0-1); un ejemplo se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Puntos de diseño o tratamientos.

Tratamiento	Nivel del Factor A	Nivel del Factor B	Y
1	-1	-1	?
2	-1	1	
3	1	-1	
4	1	1	

Fuente: Adoptado de Análisis y diseño de experimentos, año 2008.

Error aleatorio y error experimental: siempre que se realice un estudio experimental, parte de la variabilidad observada en la respuesta no se podrá explicar por los factores estudiados. Esto es, siempre habrá un remanente de variabilidad que se debe a causas comunes o aleatorias, que generan la variabilidad natural del proceso. Esta variabilidad constituye el llamado error aleatorio. Por ejemplo, será parte de este error

aleatorio el pequeño efecto que tienen los factores que no se estudiaron, siempre y cuando se mantengan pequeños o despreciables, así como la variabilidad de las mediciones hechas bajo las mismas condiciones. Sin embargo, el error aleatorio también absorberá todos los errores que el experimentador comete durante los experimentos, y si estos son graves, más que error aleatorio hablaremos de error experimental. De predominar este, la detección de cuáles de los factores estudiados tienen un efecto real sobre la respuesta será difícil, si no es que imposible.

Cuando se corre un diseño experimental es importante que la variabilidad observada de la respuesta se deba principalmente a los factores estudiados y en menor medida al error aleatorio, y además que este error sea efectivamente aleatorio. Cuando la mayor parte de la variabilidad se debe a factores no estudiados o a un error no aleatorio, no se podrá distinguir cual es el verdadero efecto que tienen los factores estudiados, con lo que el experimento no alcanzara su objetivo principal, de aquí la importancia de no dejar variar libremente a ningún factor que pueda influir de manera significativa sobre el comportamiento de la respuesta (principio de bloqueo). (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

4.2.5.3. Principios básicos en el diseño de experimentos

Aleatorización: Consiste en hacer las corridas experimentales en orden aleatorio (al azar) y con material también seleccionado aleatoriamente. Este principio aumenta la probabilidad de que el supuesto de independencia de los errores se cumpla, lo cual es un requisito para la validez de las pruebas de estadística que se realizan.

Repetición: Es correr más de una vez un tratamiento o una combinación de factores. No se debe confundir con medir varias veces el mismo resultado experimental. Repetir es realizar nuevamente el tratamiento, pero no inmediatamente después de haber corrido el mismo tratamiento, sino cuando corresponda según la aleatorización que se realizó para el orden de corridas de los tratamientos.

Bloqueo: Consiste en incapacitar en forma adecuada los factores que puedan afectar la respuesta observada; Al bloquear, el subconjunto de datos que se obtengan dentro de cada bloque (nivel del factor bloqueado), debe de resultar más homogéneo que el

conjunto total de datos, es decir, se dividen las unidades experimentales en grupos llamados bloques de modo que las observaciones realizadas en cada bloque se realicen bajo condiciones experimentales lo más parecidas posibles. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

4.2.5.4. Clasificación y selección de los diseños de experimentos.

Existen muchos diseños experimentales para estudiar la gran diversidad de problemas o situaciones que ocurren en la práctica, no obstante, la selección del diseño del experimento es un paso importante en la investigación que se quiera realizar, existen cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño de experimento y son:

1. Objetivo del experimento.
2. El número de factores a estudiar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factor-respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

El objetivo del experimento se utiliza como criterio general de clasificación de los diseños experimentales. En ese sentido, de acuerdo con su objetivo los diseños se pueden clasificar como:

1. Diseños para comparar dos o más tratamientos.
2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre la(s) respuesta(s).
3. Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso.
4. Diseño para la optimización de una mezcla.
5. Diseños para hacer el producto o proceso insensible a factores no controlables.

A continuación se presenta la clasificación general de los diseños experimentales de acuerdo con su objetivo, también los diseños más representativos de cada rama (Gutiérrez & De la Vara, 2008). (Ver Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de los diseños experimentales.

1. Diseños para comparar dos o más tratamientos.	Diseño completamente al azar	
		Diseño de bloques completos al azar
		Diseño de cuadrados latino y grecolatino
2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre la(s) respuesta(s).		Diseños factoriales 2^k
		Diseños factoriales 3^k
		Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p}
3. Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso.	Diseño para el modelo de primer orden	Diseños factoriales 2^k y 2^{k-p}
		Diseño de Plakett-Burman
		Diseño Simplex
	Diseño para el modelo de segundo orden	Diseño de composición central
		Diseño de Box-Behnken
		Diseños factoriales 3^k y 3^{k-p}
4. Diseño para la optimización de una mezcla.		Diseño Simplex-reticular
		Diseño Simplex con centroide
		Diseño con restricciones
		Diseño axial
5. Diseños robustos		Arreglos ortogonales (diseños factoriales)
		Diseño con arreglos internos y externos

Fuente: Adoptado de Análisis y diseño de experimentos, año 2008

Análisis: En esta etapa no se deben perder de vista que los resultados son observaciones muestrales, no poblacionales. Por ello, se debe recurrir a métodos estadísticos inferenciales para ver si las diferencias o efectos muestrales son los suficientemente grandes para que garanticen diferencias poblacionales (o a nivel de proceso). La técnica estadística central en el análisis de experimentos es el llamado análisis de varianza (ANOVA).

4.2.5.5. Análisis de la varianza (ANOVA).

EL análisis de varianza (ANOVA) permite comparar medias en diferentes grupos de medidas, la idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento, variabilidad de los tratamientos y variabilidad del error. Para k muestras aleatorias independientes, de igual tamaño muestral n , extraída de una población normal, existen dos varianzas:

- La varianza intra grupos (sólo contribuye a ella la varianza **dentro** de cada grupo de muestras), o varianza de error, o cuadrados medios del error, y habitualmente representada por MSE (Mean Square Error) o MSW (Mean Square Within) que se calcula como la media de las k varianzas muestrales. MSE es un cociente, entre la suma de cuadrados del error (SSE) y los grados de libertad ($n-k$), por ser los términos independientes de la suma de cuadrados.
- La varianza entre grupos (sólo contribuye a ella la varianza **entre** los distintos grupos de muestras), o varianza de los tratamientos, o cuadrados medios de los tratamientos y representada por MSA o MSB (Mean Square Between). Se calcula a partir de la varianza de las medias muestrales y es un cociente, entre la suma de cuadrados de los tratamientos (SSA) y los grados de libertad ($k-1$).

La suma de cuadrados total (SST) con grados de libertad ($n-1$), F_0 estadístico de prueba, valor- p es la significancia observada. Los resultados de un ANOVA de un factor se representan en una tabla como la siguiente:

Tabla 9. Tabla de ANOVA.

Fuente de variación	GL	SS	MS	F_0	Valor-P
Tratamientos	$k-1$	SSA	$MSA=SSA/k-1$	MSA/MSE	$P(F_{(k-1, n-k)} > F_0)$
Error	$n-k$	SSE	$MSE=SSE/n-k$		
Total	$n-1$	SST			

Fuente: Adaptado de Análisis y diseño de experimentos, (2008).

4.2.5.6. *Regresión lineal simple*

EL análisis de regresión tiene como objetivo modelar en forma matemática el comportamiento de una variable de respuesta en función de una o más variables independientes (factores). En muchos problemas hay dos o más variables relacionadas, y el interés se centra en modelar y explorar esta relación para usarlo después como herramienta de predicción, optimización o control del proceso.

En general, si hay una sola variable dependiente o de respuesta y que depende de k variables independientes, por ejemplo, $X_1, X_2, \dots, X_k$. La relación que existe entre estas variables se caracteriza por un modelo matemático llamado modelo de regresión. Dicho modelo se ajusta a un conjunto de datos muestrales. En ocasiones se conoce la forma exacta de la verdadera relación funcional entre Y y $X_1, X_2, \dots, X_k$, por ejemplo $Y = \Phi(X_1, X_2, \dots, X_k)$. Sin embargo, en la mayoría de los casos no se conoce la verdadera relación funcional, y se elige una función apropiada para aproximar Φ . Los modelos polinomiales de orden inferior son de uso generalizado como funciones de aproximación (Montgomery, 2002).

Existe una fuerte relación recíproca entre el diseño de experimentos y el análisis de regresión. Es importante expresar cuantitativamente los resultados de un experimento, en términos del modelo empírico, a fin de facilitar su comprensión, interpretación e implementación. Los modelos de regresión constituyen la base para conseguirlo.

El modelo de regresión lineal simple, partiendo del supuesto de que la variable X es la variable regresora y Y la variable de respuesta, se quiere explicar el comportamiento de Y con base en los valores que toma X . Para esto, se mide el valor de Y sobre un conjunto de n valores de X , con lo que se obtiene n parejas de puntos $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2) \dots (X_n, Y_n)$. Si las variables X y Y están relacionadas linealmente, Y se puede expresar por el siguiente modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \mu \quad [1]$$

Donde β_0 y β_1 con los parámetros del modelo y son constantes desconocidas, μ es un error aleatorio con media cero y varianza σ^2 .

5. PROPUESTA METODOLÓGICA

El trabajo de investigación está basado en la metodología DMAIC¹³ que se utiliza en proyectos Six Sigma, sin embargo, es pertinente aclarar, que se puede utilizar de manera aislada, es decir, no es obligatorio que el proyecto se deba desarrollar bajo la filosofía Six Sigma para utilizar DMAIC, por consiguiente se va a generar un impacto positivo en cualquier proyecto donde se aplique de forma correcta, por los puntuales resultados que se pueden obtener. En este sentido, dicha metodología permitirá determinar con mayor confiabilidad los factores que más influyen en las pérdidas de sacarosa en el proceso intermedio (almacenamiento de caña de azúcar en el área de patio de fábrica) entre el macroproceso de suministro de caña a fábrica y el proceso fabril del ingenio objeto de estudio, simultáneamente para el cumplimiento de los objetivos específicos planteados con anterioridad, se abordan cuatro etapas de las cinco que conforman la metodología DMAIC, a continuación en la figura se resumen las cuatro etapas empleadas para el cumplimiento de los objetivos específicos del presente trabajo de investigación.

Figura 8. Etapas de la metodología DMAIC



Fuente: Elaboración propia.

La quinta etapa “*CONTROLAR*” que hace parte de la metodología DMAIC se puede utilizar para futuras investigaciones debido a su gran magnitud y tiempo necesario para un correcto desarrollo, por tal motivo no está dentro del alcance de la presente investigación; en este orden de ideas, las cuatro etapas (Definir, Medir, Analizar, y Mejorar) perfeccionadas para cumplimiento de los objetivos se describen a continuación. (Ver Tabla 10 y Tabla 11).

¹³ Siglas en inglés de la metodología con los pasos Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. (Define, Measure, Analyze, Improve, Control)

Tabla 10. Metodología propuesta para el trabajo de investigación.

OBJETIVO ESPECÍFICO	ETAPA	ACTIVIDADES
Caracterizar el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en el área de patio para la empresa objeto de estudio.	DEFINIR	Con el fin de definir claramente el problema se responderán las siguientes preguntas: ¿por qué es necesario abordar esta problemática?, ¿Cuál es el proceso general (mapa de alto nivel) objeto de estudio?, ¿Qué se busca lograr en el proceso?, ¿Qué beneficios cuantificables se esperan alcanzar con el proyecto?, además, se utilizará herramienta SIPOC ¹⁴ mapa de alto nivel del proceso de almacenamiento de caña, identificando los proveedores, entradas, proceso, salidas y clientes. Con base en lo anterior, se formulará una meta general de reducción de pérdida de sacarosa especificando cantidad, lugar y plazo.
	MEDIR	Se emplearan las herramientas: lluvia de ideas, Diagramas de afinidad y Diagrama de Ishikawa ¹⁵ (o de causa-efecto), para reconocer las actividades críticas. Igualmente se comprobará la capacidad que posee el área de patio de fábrica para el almacenamiento de caña de azúcar en equipos.

Fuente: Elaboración propia.

¹⁴ SIPOC es un mapa de alto nivel, una representación gráfica de los pasos, eventos y operaciones que constituyen un proceso, de manera resumida.

¹⁵ El nombre de diagrama de Ishikawa es en honor al doctor Kaoru Ishikawa, quien fue uno de los principales impulsores de la calidad en Japón y en todo el mundo, y que además empezó a usar de manera sistemática el diagrama de causa-efecto.

Tabla 11. Continuación Metodología propuesta para el trabajo de investigación.

OBJETIVO ESPECÍFICO	ETAPA	ACTIVIDADES
Determinar los factores que más influyen en la pérdida de sacarosa en patio de caña mediante un diseño de experimentos.	ANALIZAR	Para el desarrollo de esta etapa se emplea la metodología PHVA, que se describe en la Tabla 12 y Tabla 13. 
Realizar un plan de acción que contribuya a minimizar el impacto que generan los factores determinantes en la pérdida de sacarosa en el proceso de almacenamiento de la caña de azúcar.	MEJORAR	Para proponer el plan de acción que se apoyará en herramienta 5W+2H¹⁶, que contribuya a establecer posibles contramedidas y seleccionar las más simples y de menor costo para la organización, con base en los resultados obtenidos en el Diseño de Experimentos.

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de especificar con mayor claridad la etapa **ANALIZAR**, que en resumen consiste en determinar de forma cuantitativa y cualitativa los posibles factores causales del problema¹⁷ e inmediatamente realizar el diseño del experimento (DOE) bajo la metodología de mejora continua propuesta por Humberto & Román, (2008). Se desarrolló un análisis y resumen (ver Tabla 12 y Tabla 13), para describir las actividades a realizar para el cumplimiento de dicha etapa.

¹⁶ 5W+2H es una herramienta que se utiliza para definir con claridad un proyecto, determinar las razones por las cuales se va a trabajar ese proyecto y no otro, definir la meta e identificar la mejora que se necesita. El nombre de la herramienta viene de las iniciales de las palabras en inglés: What ¿Qué?, Why ¿Por qué?, Who ¿Quién?, When ¿Cuándo?, Where ¿Dónde? y por How ¿Cómo?, How Much ¿Cuánto cuesta?

¹⁷ Pérdida de sacarosa en el proceso de almacenaje de caña de azúcar en patio de fábrica.

Tabla 12. Metodología propuesta para realizar DOE.

	P.H.V.A.	DISEÑO DE EXPERIMENTO
E T A P A A N A L I Z A R	PLAN	Identificación y exposición del problema. • Se asigna un nombre adecuado al DOE que muestre la importancia de aplicación de la herramienta. • Se recolecta información histórica que sirva como datos de entrada para el DOE. • Exponer los resultados deseados, que se quiere determinar con el DOE.
		Identificación de factores potenciales. Con base en la información proporciona en las etapas Definir y Medir se identificarán los siguientes elementos: • Las posibles causas o factores a tener en cuenta en la experimentación. • Hacer una lista de todas causas o factores que influyen en la problemática.
		Selección de factores, niveles y rangos. • Decidir los factores a estudiar, con base en el impacto que tienen sobre las variables de respuesta. • Elegir niveles de prueba para cada factor, con base en los datos recolectados. Elegir variables de respuesta. • Se realiza un listado de las variables de salida. • Seleccionar por fácil medición, impacto las variables. • Revisar consistencia de lo anterior.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Continuación Metodología propuesta para realizar DOE.

E T A P A A N A L I Z A R	P.H.V.A.	DISEÑO DE EXPERIMENTO
	PLAN	Seleccionar el diseño experimental - Decidir en qué consiste cada prueba. - Investigar si hay factores de ruido. - Decidir el diseño y orden de las pruebas. - Hoja de trabajo, donde se especifique de manera clara cada prueba. orden y forma de medir. - Definir los responsables. - Detallar los días, horas, materiales y equipos necesarios para el desarrollo del DOE.
	HACER	Realizar el experimento Esta etapa consiste en aplicar el plan de trabajo que se formuló en la etapa PLAN.
	VERIFICAR	Analizar Estudiar detalladamente los resultados del DOE para verificar que no hayan errores de digitación, observando tendencias, prueba de hipótesis, realización de pruebas analíticas para obtener el mejor ANOVA, modelo lineal generalizado, entre otros aspectos.
	ACTUAR	Interpretar: Detallar los factores que más influyeron en las variables de salida y contrastar las conjeturas asumidas del DOE y obtener las más importantes: Hallar el tratamiento que propone DOE y verificar los supuestos (de normalidad, varianza constante e independencia de los residuos), para determinar cuál es la respuesta esperada en el mejor tratamiento.

Fuente: Elaboración propia.

6. CASO DE ESTUDIO

El ingenio azucarero objeto de estudio posee experiencia en el mercado nacional e internacional en la producción y comercialización de azúcar, miel y alcohol; lo cual contribuyó a ser el actual líder en la producción de azúcar en Colombia con el 23.3% de participación; la compañía tiene gran impacto en el sector económico de la comunidad adyacente, debido a que genera más de 6.300 empleos directos, además busca generar valor social compartido mediante la ejecución de procesos dirigidos a fortalecer el capital humano, la promoción y el desarrollo económico y el capital social e institucional de las comunidades del área de influencia de la compañía (Informe de sostenibilidad, 2011).

La empresa pertenece al sector de alimentos dedicada al procesamiento de la caña, para transformarla en azúcar blanca, morena, refino, alcohol y miel; desarrollo de actividades agropecuarias y agroindustriales, producción y generación de energía. Dentro de su cadena de valor se tienen los procesos de suministro de caña, fabricación de azúcar, comercialización del azúcar y sus derivados y los procesos de apoyo y direccionamiento: definición de la gestión estratégica del negocio, gestión de la evaluación y control, administración de recursos financieros, administración del recurso humano, suministro de maquinaria y la adquisición de bienes, obras y servicios. Actualmente atiende segmentos de mercado en exportación (en forma directa o a través de comercializadores internacionales) y nacional (industriales de alimentos, bebidas y farmacéuticos y consumo en hogares). La mitad de su producción se exporta.

La estructura se ha ido adecuando en los últimos dos años para poder soportar la ejecución estratégica. Hoy se tienen Vicepresidencias para las operaciones del Valle del río Cauca y Proyectos como principales artífices de la ejecución estratégica, soportadas por las áreas corporativas de apoyo.

Los resultados de los últimos años muestran una empresa consolidada y en crecimiento. Establecido como el primer productor de azúcar del país, su crecimiento

económico en 2011 fue de 14%, un valor superior al crecimiento consolidado del país¹⁸. La siguiente tabla muestra el resumen de su desempeño económico en los últimos años:

Tabla 14. Desempeño económico de la compañía.

		2012	2011
Participación de la compañía en la producción de azúcar nacional		23,3%	21,8%
Ventas por mercados	Nacional	53%	48%
	Exportación	47%	52%
Ventas Nacionales por Segmentos	Industrial	52%	51%
	Consumo masivo	30%	33%
	Mayoristas	8%	16%

Fuente: Adoptado del informe de sostenibilidad, 2011

En la cadena de valor del negocio se encuentran los procesos de “suministrar caña” que inicia con las labores de adecuación, preparación, siembra y levante del cultivo, hasta la entrega en la fábrica después del corte, alce y transporte. El proceso de “fabricar azúcar y derivados” tiene un alcance desde la molienda y producción de jugos que luego pasan al proceso de elaboración donde se limpia, cristaliza el azúcar y empaca. El proceso de “comercialización azúcar y derivados” cubre además del almacenamiento, venta, despacho y entrega de productos, el subproceso que concierne al desarrollo de mercados. La cadena productiva obedece a las directrices, políticas y manejo administrativo de los procesos que conciernen a la “definición de la gestión estratégica del negocio”, la “gestión de evaluación, control y la administración de recursos financieros” soportados en los procesos de “administración del recurso humano”, el “suministro de la maquinaria” y la “adquisición de bienes, obras y servicios” que se requieran para su operación.

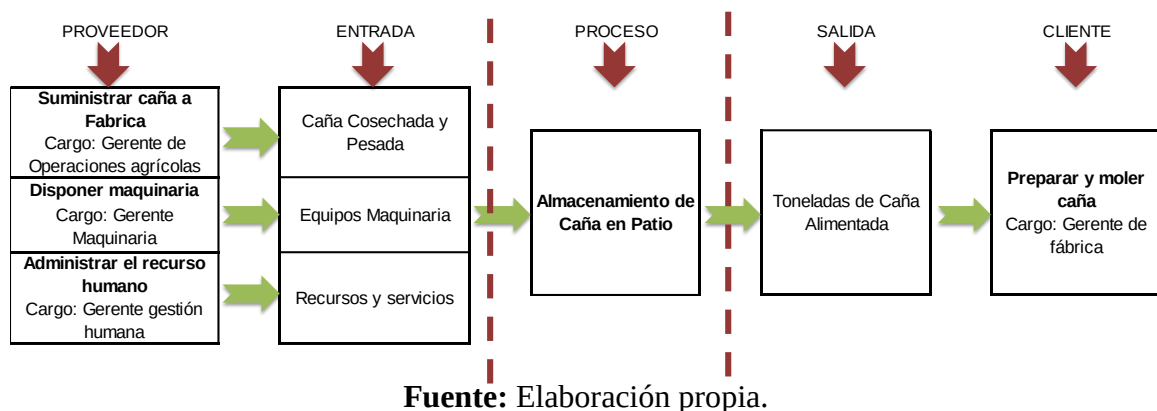
Pasando al proceso productivo, la elaboración de azúcar se inicia en el campo y se consolida en la fábrica. Una vez la planta ha logrado lo que para los agrónomos se conoce como su punto de madurez, significa que ha alcanzado su máximo potencial de azúcar posible bajo las condiciones en que fue sembrada, abonada, regada y madurada; a partir de

¹⁸ Informe de Sostenibilidad 2011.

ese momento el proceso industrial que se desarrolla entre las áreas de cosecha y fábrica tiene como objetivo primordial hacer que ese contenido de azúcar se mantenga, es decir, que las pérdidas de azúcar sean las mínimas posibles durante estos procesos.

El proceso seleccionado consiste en el Almacenamiento de caña en patio porque es la etapa final del macroproceso denominado Suministro de Caña y la etapa inicial del macroproceso Fabricación de azúcar y derivados, por lo tanto es considerado por la organización como un proceso crítico. A continuación se observa un mapa SIPOC¹⁹ del proceso objeto de estudio.

Figura 9. Mapa de alto nivel del proceso objeto de estudio.



El mapa de alto nivel se puede evidenciar como el proceso de almacenamiento se encuentra en el medio de dos grandes macroprocesos (suministro de caña a fábrica y producción de azúcar), no obstante, adquiere un papel transcendental dentro de todo el proceso fabril de azúcar y derivados, permitiendo la continuidad de molienda de caña para el ingenio objeto de estudio; como antes no se tenía en cuenta la criticidad del mismo y además a la alta competencia en la que se encuentra el sector azucarero en el valle del cauca, la compañía objeto de estudio, realizó un **benchmarking** con sector azucarero del Brasil, concluyendo que las operaciones en patio de fábrica se podían mejorar, para reducir las pérdidas que se presentan en dicho proceso.

¹⁹ Mapa donde se describe los Proveedores, Entradas, Proceso, Salidas y Clientes, para tener una perspectiva de alto nivel del proceso bajo estudio.

7. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentará el desarrollo de la propuesta metodológica para el cumplimiento de los objetivos específicos del presente trabajo de investigación.

7.1. Caracterización del proceso de almacenamiento de caña en patio de fábrica.

Para la caracterización del proceso bajo estudio, se procedió a dar respuesta a los siguientes interrogantes, con base en lo planteado en la propuesta metodológica. (Ver Tabla 10 y 11).

1. ¿Por qué es necesario abordar esta problemática?
2. ¿Cuál es el proceso general objeto de estudio?
3. ¿Qué se busca lograr en el proceso?
4. ¿Qué beneficios cuantificables se esperan alcanzar con el proyecto?

- ¿Por qué es necesario abordar esta problemática?

Las operaciones que se realizan en el patio de caña (patio de fábrica) requieren un mejoramiento, debido a que su desarrollo es muy empírico, es decir, están basadas en la experiencia de los operarios. Para ser más competitivos frente a los rivales directos (otros ingenios) es necesario que las actividades que influyen de manera directa en la producción de azúcar, no solo se basen por la experiencia de los empleados, sino que además se adopten filosofías que promuevan la mejora continua de procesos basados en hechos y datos, no obstante, con el fin de reducir las pérdidas de sacarosa en el proceso de almacenamiento de caña en el patio de fábrica, se utiliza la metodología DAMIC para identificar los factores que influyen de manera significativa en la pérdida de las propiedades (pérdida de sacarosa) de la caña de azúcar cuando se almacena en los equipos (vagones) por tiempo determinado.

- ¿Cuál es el proceso general objeto de estudio?

Para responder el interrogante es necesario reconocer la herramienta a utilizar en la representación gráfica del proceso, el diagrama de flujo es la forma tradicional para entender la dinámica de un proceso; el cual utiliza una serie de símbolos con significados

especiales para la representación de las operaciones en patio. (Falconi, 2011). A continuación se hace una descripción general de los símbolos:

Flecha: Indica el sentido y trayectoria del proceso de información o tarea.

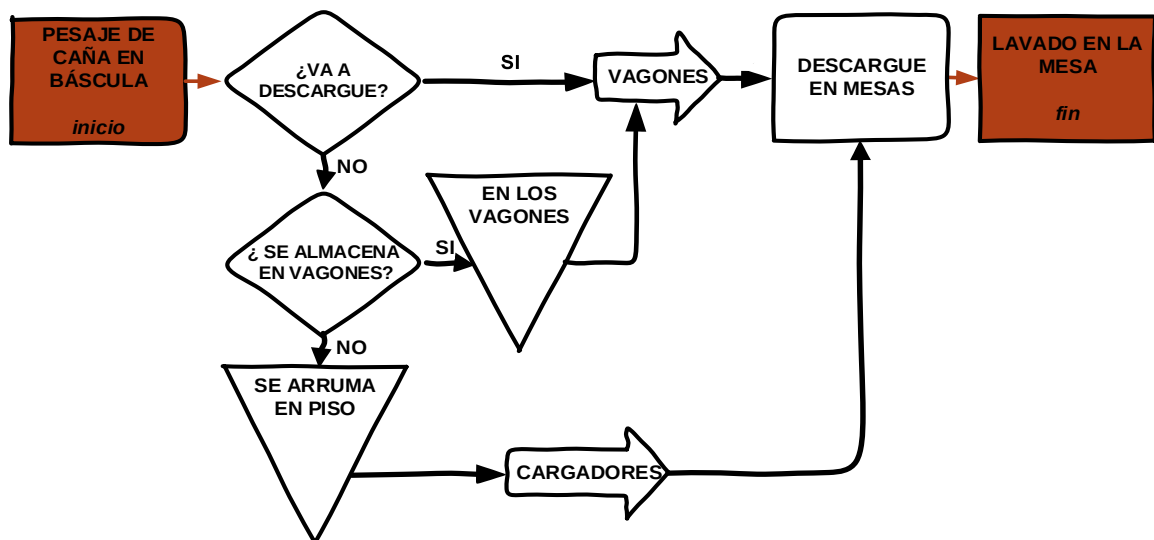
Rectángulo: Se usa para representar un evento o proceso determinado.

Rombo: Se utiliza para representar una condición.

Triángulo: Almacenamiento de materias primas, materiales, componentes o productos.

Para desarrollar el mapa de procesos se definieron los límites de inicio y fin del mismo, se realizó un análisis visual, para observar y documentar los pasos del proceso, clasificando las entradas y salidas del mismo a partir de una visita al área bajo estudio para identificar las actividades relevantes asociados al almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica, permitiendo conocer información básica referente en: la cantidad de operarios, insumos, máquinas involucradas en el proceso, criterios para stock de caña en patio, entre otros aspectos relevantes, además delimitar el alcance de las operaciones en patio (almacenamiento de caña). A continuación se presenta el diagrama de flujo de las operaciones en patio de caña. (Ver Figura 10).

Figura 10. Diagrama de flujo de almacenamiento de caña en patio de fábrica.



Fuente: Elaboración propia.

Las operaciones de transición entre el suministro de caña de azúcar y la producción de azúcar y derivados, se desarrollan en el patio de fábrica, las cuales inician cuando el área de Cosecha entrega la caña en báscula, donde se pesan los vehículos (tracto-mula o tractor) que halan los equipos de transporte (vagones) con caña de azúcar proveniente de los campos, después de realizar el proceso de pesaje, los equipos entran a descargue en las mesas para preparar y moler la caña o se decide almacenar la caña ya sea en vagones o en el piso; para la toma de la decisión, en que acción realizar se tiene en cuenta la velocidad de molienda, el stock a mantener en patio de caña definido por fábrica, la disponibilidad de maquinaria, la continuidad y regularidad del suministro de caña por el área de Cosecha, entre otros.

Si la caña debe ser almacenada en arrumes en el patio de fábrica, para cumplir con disponibilidad de maquinaria, es decir, liberar equipos para continuar con el suministro caña, se apila la caña en el piso con una maquinaria especial llamada cargadores para su almacenamiento durante el tiempo determinado, después de que se cumpla el tiempo, los cargadores depositan la caña en las mesas. Sin embargo, la caña también se puede almacenar en los equipos, por lo tanto existen zonas habilitadas en el patio (ver Figura 14); después de determinado tiempo (estipulado por quien este encargado de fábrica) y con ayuda de tractores y personal (enganchadores) se acoplan los vagones al tractor para transportarlos a la mesa y con ayuda de grúas hilo efectuar el descargue.

Cuando la caña está en las mesas se efectúa el lavado para eliminar la mayor cantidad de materia extraña (materia mineral y vegetal) que sea posible, inmediatamente se prepara la caña y continúa hacia el tándem de molinos para la extracción de jugo. En la Tabla 15 se observa un resumen de los equipos (ver Anexo 4) utilizados y personal que lo manipula en el proceso descrito anteriormente.

Tabla 15. Operarios y equipos utilizados en patio de fábrica.

Equipo utilizado	Cantidad	Nombre del cargo	Total de Operarios	Operarios por turno	Asignación
Grúa hilo	2	Operario de grúa hilo	6	2	Un operario por grúa
Tractores	3	Tractorista	6	2	Uno por tractor
		Enganchadores	6	2	Dos por turno
Cameco (cargadores)	2	Operario de alzacora	6	2	Un operario por cargador
Mesa	1	Operario de mesa	3	1	Un operario por cargador
Core Sampler	1	Operario Core Sampler	6	2	Dos por turno

Fuente: Elaboración propia.

Para continuar con la caracterización del proceso, se utilizó la herramienta SIPOC para lograr una comprensión de alto nivel (gerencial) del alcance del proceso (Almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica). (Ver Figura 11).

Figura 11. Mapa de alto nivel de proceso bajo estudio.

C		I	P	O	C
Suppliers		Inputs	Process	Outputs	Customers
Suministrar caña para la fábrica	Caña cosechada y pesada	Planeación de la logística de almacenamiento Alimentación directa a mesas Arrume en piso y alimentación con cargador	Objetivo: Garantizar continuidad entre la cosecha y la alimentación de caña a fábrica evitando pérdidas de sacarosa por tiempos de almacenamiento. Alcance: Inicia después del pesaje en báscula y termina con la entrega en el conductor de tablillas, para la preparación de caña.	Toneladas de caña alimentada en conductor de tablillas	Preparar y moler caña
Disponer Maquinaria	Equipos de maquinaria	Almacenamiento en vagones Operación de las mesas de caña			
Administrar el Recurso Humano	Recursos y servicios	Verificar las toneladas de caña entrada, molida y peso promedio de vagones			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Indicadores mapa de alto nivel de proceso bajo estudio.

NOMBRE DEL INDICADOR	FÓRMULA	FRECUENCIA	RESPONSABLE	FUENTE
Pérdida de sacarosa por patio y lavado	% de sacarosa caña en bascula – % sacarosa caña en banda	Diario	Gerente de Fabrica	Control procesos
Toneladas de caña alimentadas	Ton de caña entrada +/- inventario caña patio	Diario	Gerente de Operaciones Agrícolas	Control procesos
Tiempo de permanencia en patio	Horas transcurridas entre peso en bascula y alimentación a las mesas	Diario	Gerente de Fabrica	Torre de control cosecha

Fuente: Elaboración propia.

- ¿Qué se busca lograr en el proceso?

La presente investigación identifica y cuantifica el efecto de diversos factores sobre la disminución en la concentración de sacarosa de la caña de azúcar en un determinado tiempo, representando el comportamiento de estas variables en un modelo de regresión lineal, y a su vez contribuya a definir el plan de acción mejorar el proceso de almacenamiento.

Una vez realizado el análisis del proceso, se procedió a recolectar los datos de pérdidas de sacarosa en patio, por fuentes primarias basados en datos históricos, con el objetivo de identificar el comportamiento de la misma, estimar y analizar las pérdidas económicas.

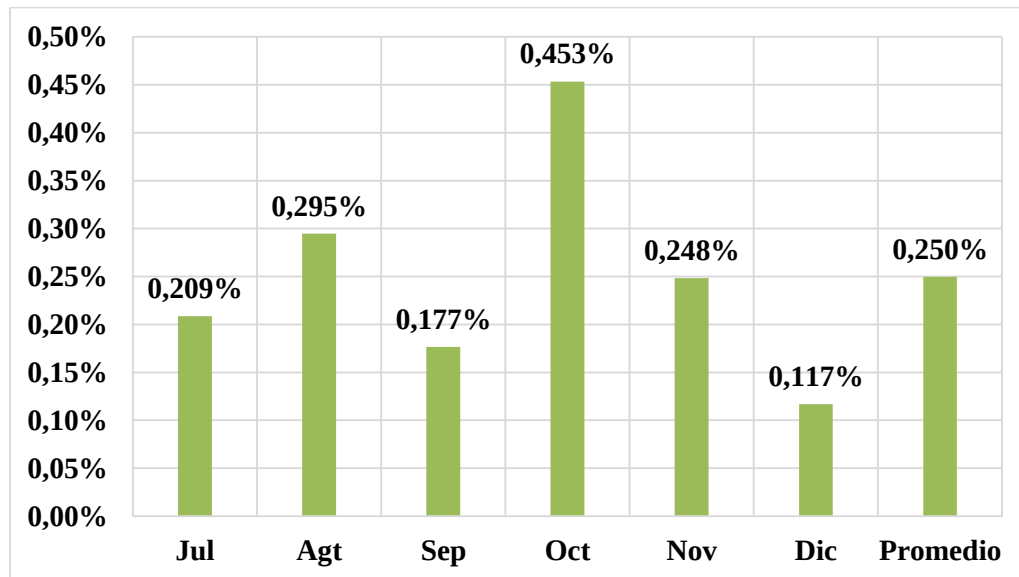
- ¿Qué beneficios cuantificables se esperan alcanzar con el proyecto?

Con base en la información histórica proporcionada por la compañía del porcentaje de pérdida de sacarosa mensual % Caña (ver Gráfico 3 y la caña molida por el ingenio (ver Gráfico 4), se determinan los quintales de azúcar que se dejan de producir por las pérdidas en el proceso de almacenamiento de caña azúcar en patio de fábrica para el segundo semestre del año 2012, el año 2012 y estimación para el año 2013, así mismo, evaluar los ingresos económicos que deja de percibir la compañía para dichos periodos (ver Tabla 16).

A continuación se presenta la información necesaria para el cálculo de los ingresos para el segundo semestre del año 2012, para todo el año 2012 y 2013 que la compañía dejó de percibir por las inadecuadas operaciones en el almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica.

La información histórica proporcionada por el ingenio bajo estudio fue: la sacarosa en báscula, sacarosa en banda y pérdida de sacarosa por lavado, posteriormente se cuantificaron las pérdidas de sacarosa por el almacenamiento de caña en patio para el segundo semestre del año 2012 (ver Gráfico 3).

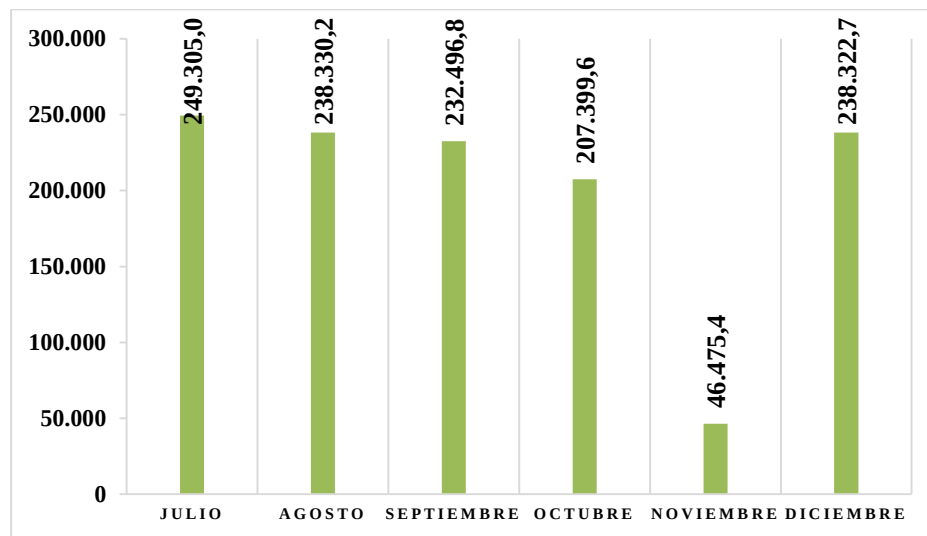
Gráfico 3. Pérdidas de sacarosa por almacenamiento de caña en patio de fábrica.



Fuente: Elaboración propia, año 2012.

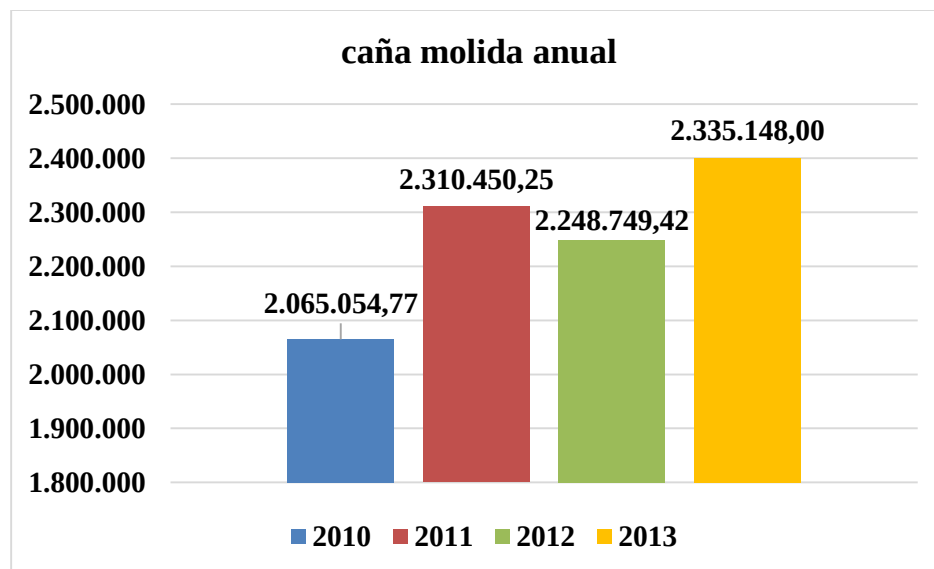
De igual forma los históricos de caña molida (toneladas) del periodo Jul-Dic del 2012 (ver Gráfico 4) y la caña molida anual para los años 2010, 2011 y 2012 que permitieron establecer a la compañía la meta de caña a moler para el año 2013 (ver Gráfico 5), lo que permite estimar las pérdidas económicas promedio para dicho año.

Gráfico 4. Caña molida en el segundo semestre del año 2012.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 5. Histórico caña de azúcar molida por la compañía.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se describe la ecuación utilizada para el cálculo de los quintales de azúcar que se dejan de producir por efecto de las pérdidas de sacarosa por almacenamiento de caña de azúcar en patio fábrica y por consiguiente los ingresos potenciales que deja de percibir la compañía.

$$QQ = RTO \times \text{Pérdida de Sacarosa} \times \text{Caña molida} \times \frac{1000 \text{ kilogramos}}{1 \text{ Tonelada}} \times \frac{1 \text{ Quintal}}{50 \text{ kilogramos}} \quad [2]$$

QQ = Quintales de Azúcar²⁰

RTO = Factor de recobrado²¹

Caña Molida = Toneladas de caña de azúcar molidas en determinado período

Pérdida de Sacarosa = Pérdida por almacenamiento de caña en patio de fábrica.

A continuación se especifica los ingresos económicos que dejó de percibir la compañía por los quintales de azúcar no producidos, debido a la pérdida de sacarosa en patio de fábrica, para el segundo semestre del año 2012, periodo en el cual se empezó aplicar este indicador en patio, además se estimó la pérdida para todo el año 2012 y 2013 con base en la información presentada en los Gráficos 3, 4 y 5.

Tabla 16. Estimación de las Pérdidas económicas.

Periodo	Precio de venta²² \$/Quintal	Quintales	Pérdida económica
Jul-Dic. 2012	\$ 64.038	98.886,968	\$ 6.332.523.625,79
Ene-Dic. 2012	\$ 64.038	183.425,359	\$ 11.746.193.160,67
Ene-Dic. 2013	\$ 64.038	190.472,694	\$ 12.197.490.401,91

Fuente: Elaboración propia.

Después de la caracterización del proceso se realizó una sesión de lluvia de ideas (Brainstorming) con los operarios del área de patio de caña, para iniciar con la identificación de las actividades y factores que se consideran influyentes en la pérdida de sacarosa por el almacenamiento de caña en patio de fábrica.

Con el fin de direccionar a las personas que participaron en la sesión de lluvia de ideas, se planteó el siguiente interrogante:

²⁰ Los datos para el cálculo de la pérdida económica yacen en un archivo de Excel® adjunto a este documento ([Calculo-Pérdida-Economica.xlsx](#))

²¹ Factor de Recobrado en Fábrica confidencial proporcionado por el ingenio objeto de estudio.

²² Datos del informe de sostenibilidad 2012.

¿Cuáles son las posibles causas asociadas a la pérdida de sacarosa en patio de fábrica?

La sesión se realizó el día 3 de mayo de 2013, con la participación de empleados de las áreas de Elaboración, Preparación y molienda de caña, Patio de caña y Cosecha, en total asistieron 9 personas generando 55 ideas, la sesión consistió en que el personal escribiera las posibles causas (factores) que tienen un impacto significativo en la pérdida de sacarosa en patio de caña, las ideas se revisaron con el fin de descartar repetidas y luego agruparlas por afinidad (ver Tabla 17), identificando las posibles causas de las pérdidas de sacarosa en las operaciones que se realizan en almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica.

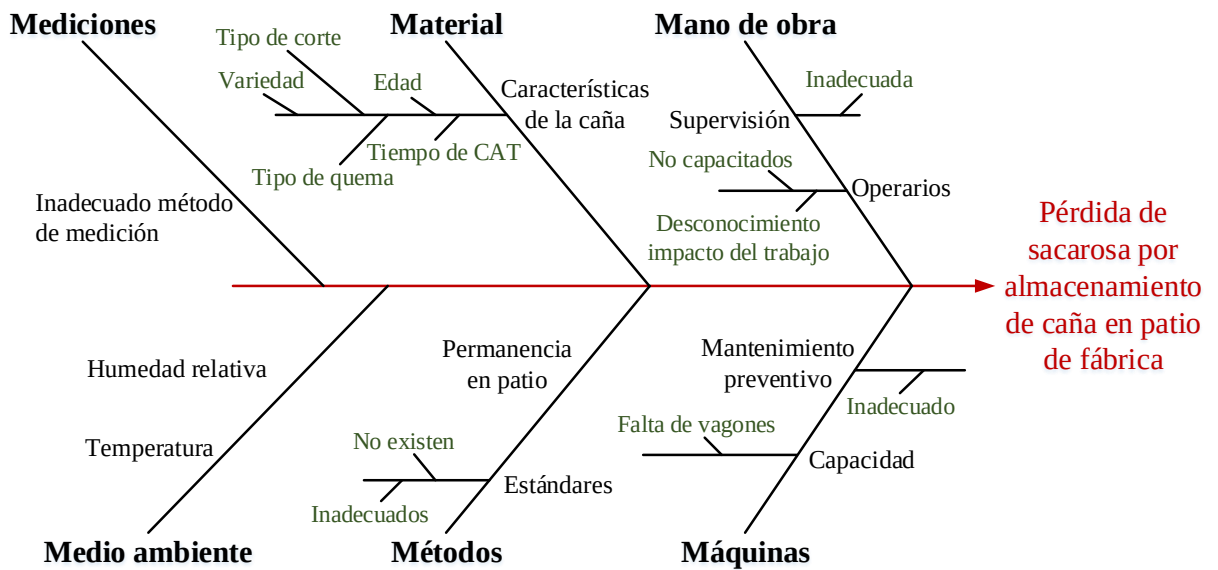
Tabla 17. Diagrama de Afinidad.

Afinidad	Causa primaria
Lavado	Calidad del agua de lavado
	Falta de criterios para un correcto lavado.
Condiciones del piso en patio de fabrica	Humedad constante en el patio deteriora la caña que cae al piso y se lleva de nuevo a la mesa
	Caña cae debajo de la mesa
Manejo de Inventarios y coordinación entre áreas involucradas	Baja rotación de los inventarios de caña
	Mucho tiempo de permanencia de los vagones en el patio
	No hay criterios bien definidos para el almacenamiento de la caña
	Falta de comunicación eficaz entre las áreas de cosecha y Fábrica.
	Vagones en espera al cambiar de cabezotes (tractor o tracto-nula)
Disponibilidad de equipos de transporte	No hay disponibilidad de Dolly's para ingresar los equipos almacenados al descargue
	No hay suficientes vagones para mantener stock cero en el patio de caña
	No hay suficientes tractores para ingresar los equipos al descargue
	El cargador pisa la caña que cae de las tenazas del cargador.
Prácticas de operación	Al recoger con cargadores se realiza mucha presión con las tenazas extrayendo buen cantidad de jugo
	Desconocimiento del impacto de almacenar la caña en el patio de fábrica y su degradación.
	No hay criterios bien definidos para el almacenamiento de caña (edad, permanencia en CAT, entre otros)
	Alto tiempo de permanencia entre campo y báscula
Condiciones previas de Cosecha	Cantidad de caña excesiva en vagones (no cumple con el estándar)
	Edad de la caña que entra a molienda
	Tipo de corte de la caña de azúcar
	% de Materia Extraña en el viaje de caña que entra a patio

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta el Diagrama de Ishikawa para el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en el patio de fábrica, que se elaboró con base en el Diagrama de flujo del proceso y el Diagrama de afinidad resultado de la sesión de lluvia de ideas con el personal involucrado de dicho proceso.

Figura 13. Diagrama de Ishikawa.

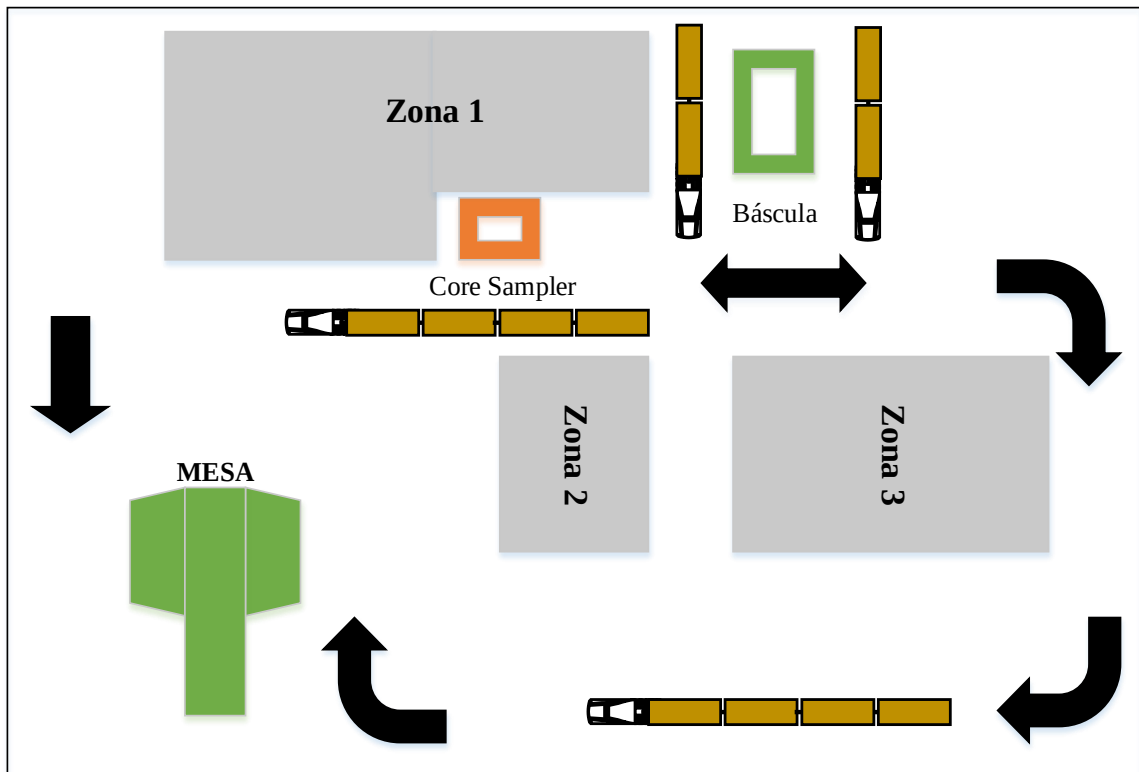


Fuente: Elaboración propia.

El Diagrama de Ishikawa se realizó con el fin de iniciar con la identificación de las posibles actividades y causas potenciales que influyan en la pérdida de sacarosa por el almacenamiento de caña de azúcar en equipo en el patio de fábrica, de tal forma que sirva como información de entrada para el diseño del experimento.

Actualmente el espacio disponible con el que cuenta el área de patio de caña es aproximadamente 32.000 m² (metros cuadrados), pero el que se utiliza para almacenar los equipos con caña de azúcar es de aproximadamente 10.000 m², que se dividen en tres zonas, donde la Zona 1 posee alrededor de 5.000 m², lo que quiere decir, que se puede almacenar 21 filas con equipos (máximo 8 vagones enganchados), Zona 2 cuenta con 2.000 m² y puede almacenar 7 filas con vagones y la Zona 3 tiene 3.000 m², donde se puede almacenar 12 filas con equipos. Las flechas indican el sentido que toman los viajes de caña una vez ha terminado el proceso de pesaje en báscula. (Ver Figura 14).

Figura 14. Zonas dedicadas para almacenamiento de caña en patio de fábrica.



Fuente: Elaboración propia.

El espacio total que conforma el patio de fábrica es de 32.000 m² y se utiliza aproximadamente 10.000 m² lo que genera un porcentaje de utilización alrededor del 31% del área total para almacenamiento de caña en equipos, lo que conlleva a poder almacenar al mismo tiempo entre 30 y 40 viajes de caña de azúcar²³, donde cada viaje está compuesto según la configuración presentada en la Tabla 4, lo que a su vez representa entre 1.000 y 1.200 toneladas de caña de azúcar almacenadas en equipos de transporte en el patio de fábrica.

²³ Cada viaje de caña de azúcar se comprende por una serie de vagones que oscila entre cuatro a cinco enganchados entre sí, donde estas dos configuraciones son las que más se emplean suministro de caña larga al ingenio objeto de estudio.

7.2. Determinar los factores que más influyen en la pérdida de sacarosa en patio de caña mediante un diseño de experimentos.

Con base en la metodología propuesta (ver Tabla 10 y Tabla 11) a continuación se describen las etapas desarrolladas para el cumplimiento del segundo objetivo específico. El Diseño del Experimento se divide en cuatro etapas denominadas como Planear, Hacer, Verificar y Actuar, con base en el ciclo PHVA de mejora continua propuesto (Tabla 12 y Tabla 13). En este orden de ideas, se describe la etapa de Planificación del experimento que se divide en:

- Identificación y exposición del problema.
 - Identificación de factores potenciales.
 - Selección de factores, niveles y rangos.
 - Elección de variables de respuesta.
 - Selección del diseño experimental.
- **Identificación y exposición del problema:** se inició con la asignación del nombre para el DOE, con el fin de expresar de manera clara lo que se pretende hacer con el mismo, en ese sentido, el nombre que se asignó fue: “Análisis y cuantificación de los factores que influyen en la pérdida de sacarosa en el almacenamiento de caña en los vagones”.

La carencia de unos criterios bien definidos para el correcto almacenamiento de la caña de azúcar en equipo, hace que las pérdidas de sacarosa por almacenamiento genere un impacto económico negativo para la compañía (ver Tabla 16). Con el experimento se cuantifica el efecto de los factores potenciales que inciden en la pérdida de sacarosa de la caña de azúcar, cuando se tiene almacenada la caña en el patio de fábrica del ingenio objeto de estudio.

Con base en el Benchmarking realizado por el ingenio objeto de estudio con los ingenios de Brasil y por política del ingenio, se estableció una meta de reducción de pérdida de sacarosa en patio de fábrica a 0.400 % Caña para el año 2014.

- **Identificación de factores potenciales:** Se recolectó de fuentes primarias (datos de la compañía) información de interés, referente a la programación de operaciones del

área de Cosecha para el año 2013, para agrupar y posteriormente ser analizada; comprendida por las variedades, edades y cantidades²⁴ (áreas sembrada) de la caña de azúcar a cosechar²⁵. El análisis consistió en utilizar el principio de Pareto, conocido como “ley del 80-20”, un Diagrama de Pareto es un “Gráfico de barras que ayuda a identificar prioridades y causas, ya que se ordenan por orden de importancia a los diferentes problemas que se presentan en un proceso” (Gutiérrez & De la Vara, 2009, p.140). Este principio se adaptó para identificar cuáles de las variedades que se tenían programadas a Cosechar en el periodo de Enero a Octubre del año 2013 representaban aproximadamente el 80% del área total a cosechar, es decir, cual o cuales de las variedades de caña de azúcar a cosechar representan alrededor del 80% del total de caña a moler en ese periodo por el ingenio caso estudio. A continuación se presenta un resumen de la información mencionada (ver Tabla 18 y Figura 15).

Tabla 18. Variedad de Caña de Azúcar a Cosechar para el periodo Ene-Oct. 2013

Variedad de caña de azúcar	Total área a cosechar (ha²⁶)	Porcentaje de participación
CC 85-92	13993,45	70,68%
CC 84-75	1727,8	8,73%
CC 93-4418	1572,56	7,94%
CC 93-3826	903,87	4,57%
VARIAS	429,94	2,17%
CC 01-1940	356,76	1,80%
CC 92-2198	254,92	1,29%
V 71-51	228	1,15%
CC 93-3895	210,26	1,06%
MZC 74-275	45,72	0,23%
PR 61-632	18,26	0,09%
CO 421	14,82	0,07%
CC 93-4223	9,83	0,05%
CC 97-7170	9,03	0,05%
CC 84-56	8,74	0,04%
CC 92-2804	7,5	0,04%
MEX 64-148	7	0,04%
TOTAL	19798,5	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

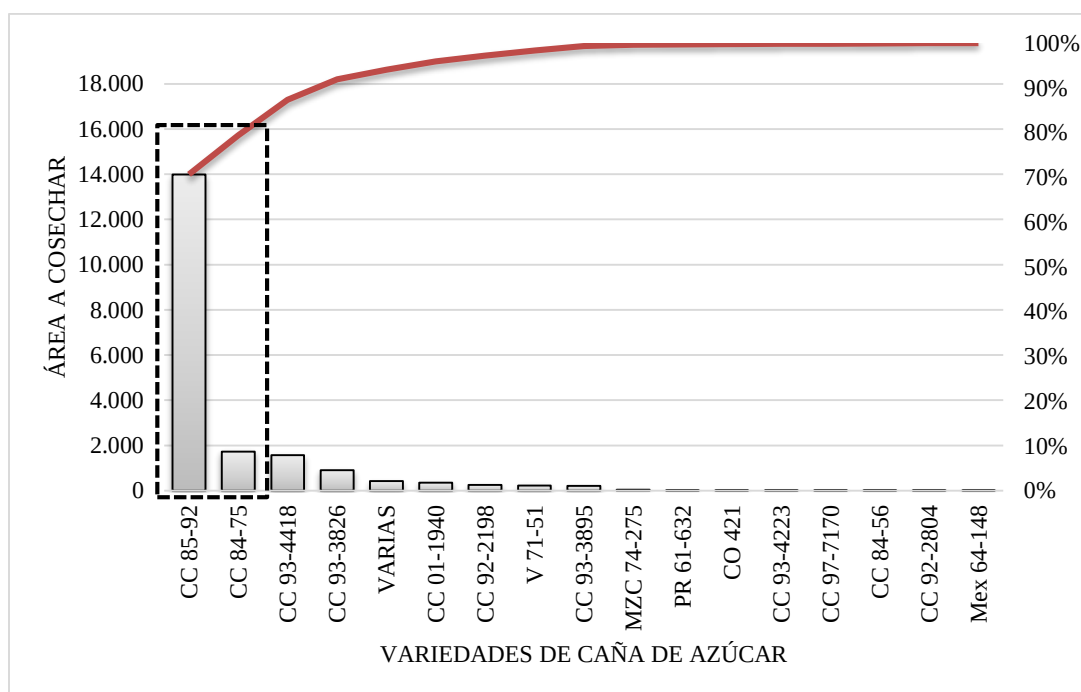
²⁴ La información empleada en la identificación de los factores potenciales para el experimento yacen en un archivo Excel® adjunto a este documento ([ANEXOS-trabajo de investigacion.xlsx](#))

²⁵ Desde este en adelante cuando en el documento se mencione **cosechar**, se entenderá como transportar la caña desde los campos donde está sembrada hasta el patio de caña.

²⁶ Hectáreas sembradas con caña de azúcar.

En la Tabla 18 se observan las variedades de caña de azúcar que se tienen programadas para la molienda en el periodo de Enero – Octubre del año 2013, y como las variedades CC 85-92 y CC 84-75 con 13.993,45 y 1.727,8 kilómetros cuadrados respectivamente, representa el 79.41% del total de área sembrada con caña de azúcar y programada a cosechar por el ingenio objeto de estudio. A continuación se presenta el Diagrama de Pareto.

Figura 15. Diagrama de Pareto de Variedades de caña de azúcar a Cosechar.



Fuente: Elaboración propia.

Con base en este análisis se determina que la variedad de caña relevante es la CC 85-92²⁷, ya que representa el 70,68% del área total programada para cosechar en el año 2013. También, con la información recolectada para la descripción de proceso objeto de estudio (ver Figura 10) se determina que los posibles factores del experimento son:

- Tipo de corte manual y mecanizado
- Caña quemada o sin quemar (cruda)

²⁷ El Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA) en 1985 seleccionó el clon de la variedad Cenicaña Colombia (CC) 85-92 y a partir de 1999 pasó a ser la primera variedad comercial en área sembrada por la industria azucarera de Colombia en el Valle del río Cauca (Victoria, 2003).

- Edad de la caña de azúcar
 - Porcentaje de Materia Extraña (%M.E.)
 - Permanencia en patio de fábrica
 - Permanencia en CAT (Corte, Alce y Transporte)
 - Condiciones ambientales invierno y verano
- **Selección de factores, niveles y rangos:** Debido a la naturaleza del proceso objeto de estudio y después de realizar cuatro ensayos de prueba, con la finalidad de determinar cómo medir los posibles factores y selección de los mismos, tomando como criterio aquellos que son controlables, por lo anterior se define que los factores a evaluar mediante la experimentación son los siguientes:

- **Edad de la caña de azúcar (Edad)**
- **Permanencia en CAT (Perm CAT)**
- **Permanencia en Patio (Perm Patio)**

Los niveles para el factor Edad se determinó con base la información suministrada por la compañía (ver Tabla 19), se empleó como factor de bloqueo, para nulificar de forma adecuada el efecto de dicho factor sobre la variable de respuesta, ya que la edad de la caña de azúcar que el ingenio objeto de estudio planea emplear para su producción de azúcar es muy variable, en el periodo en el cual se está realizando el trabajo de investigación, entorpeciendo la posibilidad de asignar un valor fijo para dicho factor en el Diseño del Experimento (ver Tabla 21), ya que se pueden sesgar los resultados del análisis del DOE y a su vez cuantificar erróneamente el impacto que poseen los factores Permanencia en Patio y Permanencia en CAT sobre la variable de respuesta, en este orden de ideas, se determina experimentar con dos grupos de edades de caña de azúcar, denominados joven y madura, donde el grupo de caña joven se encuentra entre el rango de diez punto cinco a once punto ocho (10,5 a 11,8) meses de edad y para el grupo de caña madura se establece en el rango de doce punto cinco a trece punto ocho (12,5 a 13,8) meses de edad. (Ver Tabla 19)

Tabla 19. Edades de caña de azúcar a cosechar Ene-Oct de 2013.

Variedad CC 85-92			
Mes	Promedio	Mín.	Máx.
Enero	12,59	9,95	18,66
Febrero	12,21	11,76	13,01
Marzo	12,44	11,63	13,90
Abril	12,46	11,76	13,77
Mayo	12,82	11,47	16,43
Junio	12,65	11,47	15,90
Julio	12,17	11,56	17,05
Agosto	12,17	11,24	16,76
Septiembre	12,27	11,70	13,44
Octubre	12,15	11,66	14,09
Promedio	12,39	11,42	15,30

Fuente: Tomado del departamento Agrícola del ingenio objeto de estudio.

Igualmente, con base en la información proporcionada por la compañía se determinó los rangos de distancias²⁸ (en kilómetros) a los que deben estar los Sectores-suerte (fincas) del ingenio objeto de estudio, para evaluar aquellos sectores que se encuentren a determinada distancia de la ubicación del ingenio, dicha distancia se traduce en un tiempo de permanencia por CAT²⁹, los sectores a estudiar son los que se encuentren a una distancia menor a 15 y mayor a 30 kilómetros de distancia del ingenio caso de estudio, ya que en estos dos datos es donde más se agrupa la información de las distancias entre el ingenio objeto de estudio y los sectores- suerte programados para cosechar en el periodo de Enero a Octubre de 2013, los datos se presenta en la Figura 16.

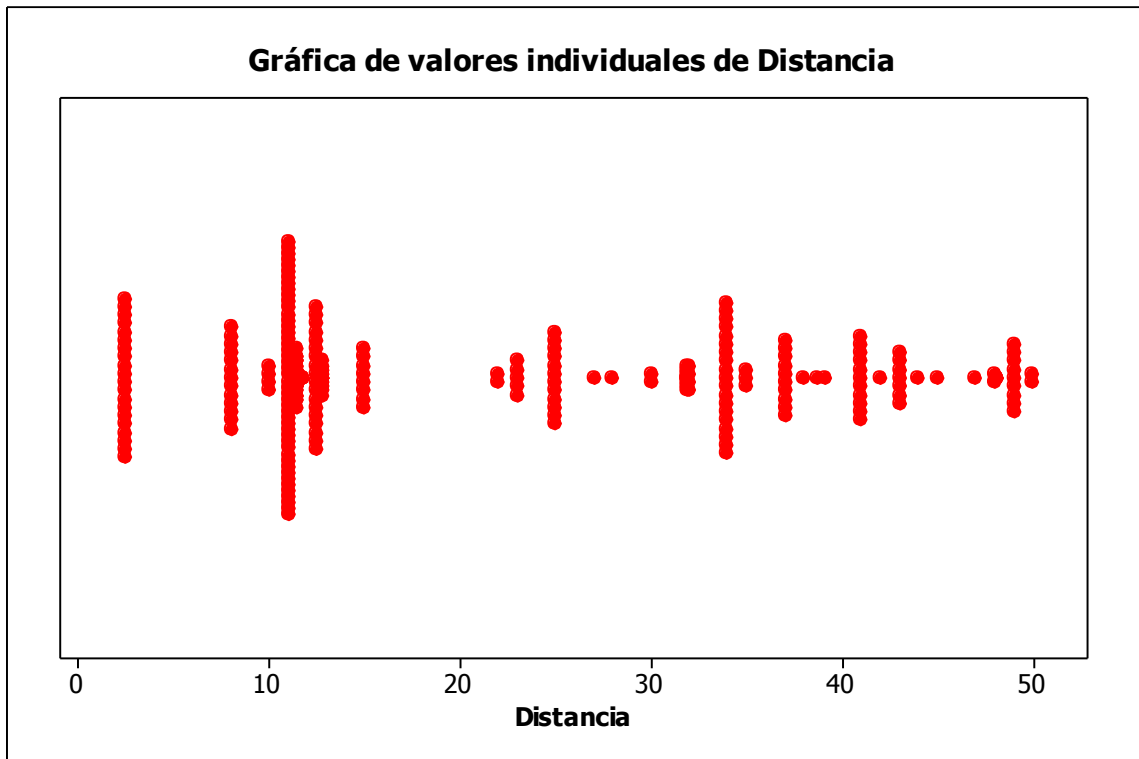
El factor Permanencia en CAT es un factor aleatorio. A continuación se presenta el grafico de la concentración de las distancias de los sectores-suerte que estaban asignados a las Órdenes de Trabajo³⁰ del ingenio para el año 2012-2013, con las cuales se va a realizar el Diseño del Experimento.

²⁸ Los datos para determinar el rango de distancias de los sectores-suerte yacen en un archivo de Minitab Statistical® que se adjunta con este documento (RANGOS-CAT.MPJ).

²⁹ CAT: acrónimo de Corte, Alce y Transporte de la caña de azúcar, actividades representativas que realiza el área de Cosecha para el suministro de caña a fábrica que inician en los campos donde está sembrada la caña y finalizan al llegar a la báscula, donde se realiza el respectivo pesaje de los vagones con caña.

³⁰ Secuencia de números que se asignan a un sector-suerte para identificarlo en el sistema.

Figura 16. Agrupación para las distancias de los sectores-suerte.

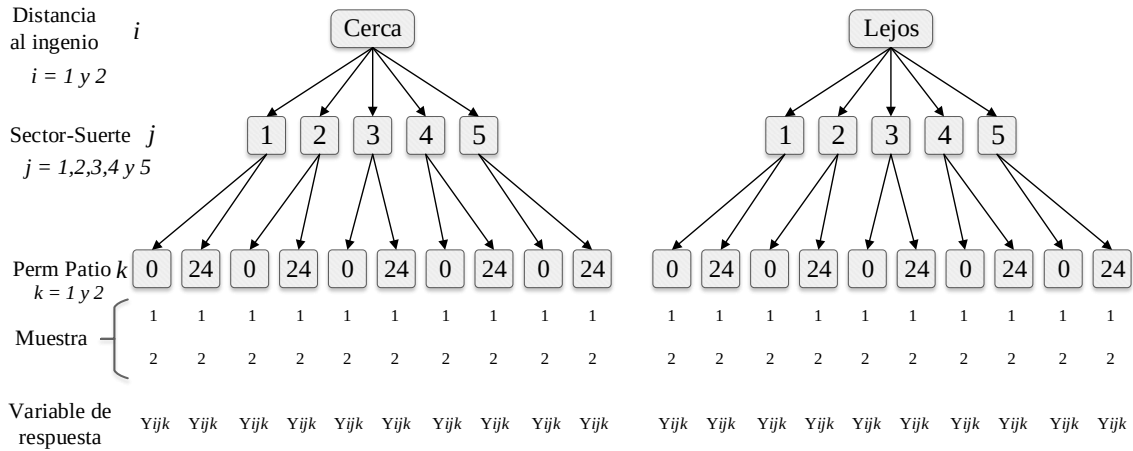


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16 se observa como las distancias entre el ingenio y los sectores-suerte se encuentran agrupadas en dos grupos el primero se encuentra entre los 10 a 18 kilómetros y el segundo entre los 30 a 40 kilómetros aproximadamente, por lo que se determina que los valores a tomar de este factor no pueden exceder los 15 kilómetros y tampoco tomar valores inferiores a 30 kilómetros, permitiendo identificar el impacto sobre la variable de respuesta.

Para el factor Permanencia en Patio (Perm Patio), después de cuatro ensayos experimentales realizados en el patio de caña y con base en lo permitido por el ingenio pertinente a el almacenamiento de caña en equipos, se determinó que el nivel bajo y alto del factor fijo “Perm Patio” es de 0 y 24 horas respectivamente, para identificar un cambio significativo en la concentración de sacarosa por almacenamiento de caña en equipos en el patio de fábrica. A continuación se presenta el diseño anidado y cruzado de los factores del experimento.

Figura 17. Diseño anidado y cruzado de los factores del experimento.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 presenta la configuración anidado y cruzado para los factores a evaluar mediante la experimentación; El factor cruzado se presenta entre los factores Perm CAT (distancia i) y Perm Patio, debido a que pueden interactuar todos los niveles de dichos factores y la distribución anidada se genera entre el Sector-Suerte j y la Perm CAT (distancia i), ya que el Sector-Suerte j no puede interactuar con la Perm CAT más de una vez, es decir, el Sector-Suerte 1 no va tener la Perm CAT Cerca (distancia 1) y luego la Perm CAT Lejos (distancia 2), por tal motivo son anidados.

Para determinar sectores-suerte con los que se van a realizar el DOE se realizó un muestreo estratificado, donde se seleccionan los sectores-suerte con sus respectivas ordenes de trabajo que se encuentran a una distancia i , estipulado previamente (Perm en CAT), se realiza una aleatorización de las ordenes de trabajo asociada a los sectores-suerte j que cumplen con lo anterior, se aplica la permanencia en patio k y seguidamente se realiza el muestro en patio de fábrica, la variable de respuesta Y_{ijk} corresponde a un promedio de dos muestras para cada tratamiento que conforma el diseño del experimento para su posterior análisis con software Minitab Statistical®.

- **Elección de la variable de respuesta:** Entre las variables de interés de un ingenio azucarero y relevantes en la presente investigación, que manifiestan información sobre las características de calidad del jugo caña de azúcar, se encuentran las siguientes:

- Brix
- Azúcares Reductores
- Sacarosa aparente
- Sacarosa real
- Dextranas (Leuconostoc mesenteróides)
- Humedad del bagazo

La variable de respuesta seleccionada para el diseño del experimento, es la sacarosa real en el jugo de caña de azúcar, que se cuantificará por medio de la Cromatografía líquida de alta precisión o HPLC por sus siglas en inglés.

- **Selección del diseño experimental:** los factores para el diseño de experimento son la edad de la caña como factor de bloqueo para homogenizar los datos y eliminar su efecto sobre la variable de respuesta (sacarosa real), un factor cuantitativo (Perm Patio) con dos niveles, los cuales son 0 y 24 horas de permanencia en patio y un factor categórico (Perm CAT) con un nivel denominado Cerca y otro como Lejos, adicionalmente se incluirán dos covariadas, la temperatura ambiente y la humedad relativa del día en que se realicen las experimentaciones, dos factores incontrolables que influyen en la variable de respuesta, según estudios realizados previamente por Larrahondo (2004).

Para la selección del diseño experimental, se tuvo en cuenta el objetivo principal del mismo, el cual es determinar si los factores en mención influyen de manera significativa en la variable de respuesta seleccionada (sacarosa real), por lo anterior y con base en la Tabla 8 se determinó que el diseño más adecuado para la investigación es un diseño factorial 2^2 , con el cual se puede estudiar el efecto de varios factores sobre la variable de respuesta (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

El experimento se va realizar solo con caña de azúcar quemada y de corte manual, además los supuestos considerados son; que los tipos de madurantes para abonar la caña y que el porcentaje de materia extraña en los viajes con caña no influyen de manera significativa en los resultados de la experimentación. A continuación se describe la información empleada para la selección de los sectores-suerte a muestrear, la metodología utilizada para la toma de las muestras, los análisis fisicoquímicos que se realizan y los responsables de hacerlos.

Con base en la Tabla 21 donde se encuentra la matriz del diseño factorial 2² y la información proporcionada por la compañía, se determinan los sectores-suerte a estudiar durante todo el experimento y utilizando información adicional correspondiente a la programación semanal y diaria de caña de azúcar a cosechar proporcionada por el área de Cosecha, se establece el viaje de caña para muestreo, dicha información contiene los sectores-suerte que se programan a diario para suministro de caña al ingenio, debido a que la compañía bajo estudio presenta una escasez de caña de azúcar por efecto de la temporada invernal a finales 2011 ha provocado la pérdida de caña sembrada y que estaba programada para cosechar en el año 2013, lo cual limita significativamente los días hábiles para desarrollar el experimento, las fechas de toma de muestras del Diseño del Experimento se presentan con mayor claridad en el Anexo 7.

El responsable³¹ por medio de una aleatorización de la información proporcionada por el área de Cosecha, se determina que viaje se selecciona para muestreo en cumplimiento de lo planificado, el cual tiene un periodo de retención de 24 horas.

Una vez identificado el viaje se toma inmediatamente la muestra (muestra hora cero), que consiste en muestrear un máximo de cuatro vagones de un mismo viaje, vagón por vagón, por medio del Core Sampler³². Una vez obtenida la muestra de cada vagón, se analiza la materia extraña por separado, luego se realiza un compuesto con cada una de las muestras de caña de azúcar se desfibra y seguidamente se desintegra el compuesto, para obtener un jugo de caña y realizar en el laboratorio análisis de: Brix, azúcares reductores, dextranas, polarimetría³³ (sacarosa aparente) y sacarosa por HPLC, consecutivamente se registran los resultados en la hoja de recolección de datos (Ver Anexo 2). A continuación se listan los equipos necesarios para los análisis fisicoquímicos en el laboratorio.

³¹ Braiam Serna Gonzalez, es él responsable de realizar el muestreo y análisis fisicoquímicos de las muestras, bajo supervisión de analistas del laboratorio del ingenio objeto de estudio.

³² Core Sampler maquina especialidad para obtener muestras de los viajes con caña de azúcar que ingresa a patio de fábrica y poder determinar el porcentaje de materia extraña del sector-suerte de donde proviene.

³³ Se utiliza ICUMSA, Método GS5/7-1 (1994), Determinación de la Pol, Brix y fibra en caña y bagazo por el método de desintegración húmeda ver Anexo 3.

Tabla 20. Equipos necesarios para el desarrollo del experimento.

Para obtener la muestra	Para analizar la muestra
Core Sampler	Refractómetro
Recipientes para depositar las muestras del Core sampler	Polarímetro
Báscula digital	HPLC
Bolsas plásticas	Espectrofotómetro
Desfibrador	Balanza analítica, Erlenmeyer, Beaker, Probetas, Balón Volumétrico, pipeta graduada y aforada, bureta, entre otros equipos de laboratorio.
Desintegrador	Elementos de seguridad personal
Elementos de seguridad personal	

Fuente: Elaboración propia.

En la etapa Hacer, donde se desarrollan las actividades planificadas que anteriormente se manifestaban y así continuar con la etapa de Verificar de la metodología de PHVA propuesta para el Diseño del Experimento (ver Tabla 12 y Tabla 13), a continuación se presenta dicha etapa, la cual comprende el análisis e interpretación de los datos recolectados por medio de la experimentación (ver Anexo 1), para el análisis se utilizó el software Minitab Statistical®.

Para la etapa Verificar se emplea el software Minitab Statistical®, para analizar la información obtenida con el DOE. El cual genera un resumen³⁴ con información relevante como los factores, corridas, bloques, réplicas, entre otra. En una tabla (ver Tabla 21) que se utiliza para desarrollar el experimento, recolectar los datos y realizar el análisis del diseño factorial 2². En la siguiente tabla presenta la matriz de diseño del experimento, donde las dos primeras columnas son de orden de corrida, la primera columna es un orden aleatorio y la segunda es secuencial, ambas generadas por Minitab, donde es recomendado el orden aleatorio para ejecutar los tratamientos, en la columna tres se encuentra los puntos centrales (PtCentral³⁵), la columna Bloques contiene el factor de bloqueo (Edad) para

³⁴ El resumen de características del Diseño del experimento y tablas generadas por Minitab Statistical® en el diseño y análisis del experimento factorial completo yacen en un archivo PDF adjunto a este documento ([Diseño-Factorial-Completo.pdf](#))

³⁵ Puntos centrales: representan corridas experimentales, en cuyo caso todos los niveles de factores se establecen en el punto medio entre los valores de configuración bajo y alto.

homogenizar los datos y nulificar el efecto de dicho factor sobre la variable de respuesta, en las columnas 5 y 6 se presentan los factores controlables con sus respectivos niveles con los que se experimentó, la columna Pérdida Sac es la variable de respuesta seleccionada y las dos últimas columnas son las covariadas como son la temperatura ambiente y la humedad relativa considerados factores no controlables en el DOE.

Tabla 21. Tabla de diseño del experimento.

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Perm Patio	Perm CAT	Pérdida Sac	Tem	Hdad
12	1	1	3	24	Lejos	4,2896575	24,3	75
9	2	1	3	0	Cerca	1,40339057	24,1	74
10	3	1	3	24	Cerca	1,58632484	21,3	86
11	4	1	3	0	Lejos	1,48022511	24,4	72
18	5	1	5	24	Cerca	1,61133836	23,5	78
19	6	1	5	0	Lejos	1,7917159	23,2	73
17	7	1	5	0	Cerca	1,45458684	24,3	73
20	8	1	5	24	Lejos	2,30940671	23,4	71
5	9	1	2	0	Cerca	0,0055000	24,3	74
7	10	1	2	0	Lejos	0,78996322	23,4	71
8	11	1	2	24	Lejos	1,31218281	23,6	70
6	12	1	2	24	Cerca	2,17760555	24,5	71
16	13	1	4	24	Lejos	3,32540514	21,3	86
14	14	1	4	24	Cerca	0,92488043	23,4	67
15	15	1	4	0	Lejos	2,54662476	24,1	74
13	16	1	4	0	Cerca	0,20568227	24,5	63
1	17	1	1	0	Cerca	0,65046959	23,4	69
3	18	1	1	0	Lejos	4,48137294	23,6	79
2	19	1	1	24	Cerca	1,4224712	24,2	64
4	20	1	1	24	Lejos	5,08752905	24,5	71

Fuente: Adaptado de Minitab Statistical ®.

Para determinar los efectos de los factores seleccionados (Perm Patio y Perm CAT) sobre la variable de respuesta (Pérdida de sacarosa) se formula la siguiente hipótesis de interés para dichos factores:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$$

$$H_A : \tau_i \neq 0 \text{ para algún } i, i = 1, 2, 3.$$

Donde τ_1 corresponde al efecto del factor *Perm Patio*, τ_2 al efecto del factor *Perm CAT* y τ_3 es la interacción entre τ_1 y τ_2 sobre la variable de respuesta, la interpretación para hipótesis nula (H_0) es, si τ_1 , τ_2 y τ_3 son iguales a cero ($\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$) no hay efecto de los factores sobre la variable de respuesta y para la hipótesis alternativa (H_A) es, si τ_1 o τ_2 o τ_3 es diferente de cero ($\tau_i \neq 0$ para algún i), al menos uno de los factores tiene un impacto significativo sobre la variable de respuesta. Utilizando el respectivo P-value del análisis ANOVA (ver Tabla 22) para rechazar o no la hipótesis nula, asumiendo un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Minitab Statistical® utiliza sus ecuaciones³⁶ para el análisis de diseños factoriales y presenta los resultados en una tabla, para el ANOVA, muestra la fuente de variación, sus grados de libertad (GL), la suma total de los cuadrados “SC” y la media de cuadrados “MC”. La tabla ANOVA también incluye estadística F y los valores P³⁷ (ver Tabla 22).

Tabla 22. Análisis de varianza para pérdida de sacarosa.

Fuente	GL	SC Sec	SC Ajust	MC Ajust	F	P
Covariadas	2	9,5289	8,7970	4,39850	12,14	0,002
Temperatura	1	0,0471	6,5683	6,56835	18,13	0,002
Humedad R	1	9,4818	8,2783	8,27827	22,84	0,001
Bloques	4	9,0382	8,5178	2,12945	5,88	0,011
Efectos principales	2	14,5677	14,5089	7,25444	20,02	0,000
Perm Patio	1	5,8370	5,9639	5,96390	16,46	0,002
Perm CAT	1	8,7307	8,7186	8,71859	24,06	0,001
2° orden (interacciones)	1	0,0260	0,0260	0,02598	0,07	0,794
Perm Patio*Perm CAT	1	0,0260	0,0260	0,02598	0,07	0,794
Error residual	10	3,6239	3,6239	0,36239		
Total	19	36,7846				

Fuente: Adaptado de Minitab Statistical ®.

De la Tabla 22 en la columna Fuente se muestra Temperatura que es una covariada, la cual tiene un grado de libertad (GL); 6,5683 corresponde a la suma ajustada de los cuadrados, la media de cuadrados ajustados tiene como valor 6,56835 ya que se emplea

³⁶ Las ecuaciones empleadas para el análisis del diseño de experimento factorial completo yacen en un archivo PDF adjunto a este documento ([Ecuaciones-DOE.pdf](#))

³⁷ P – Se utiliza para determinar si un factor es significativo o no, se compara con el valor alfa asumido de 0.05, el valor P de los factores y aquellos que sean menores a 0.05, con un 95 % de confianza se concluirá que el efecto del factor es significativo e influye en la variable de respuesta (Pérdida de sacarosa).

un GL de uno (1), el valor del estadístico F es de 18,13 y su P-value es de 0,002 menor que $\alpha = 0,05$, por tal motivo existe suficiente evidencia estadística para concluir que la covariada Temperatura si tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta. Los supuestos de Normalidad, Varianza e Independencia (ver Anexo 5) se cumplen, lo cual valida la información obtenida por medio del ANOVA y permite continuar con el análisis, en este orden de ideas, se rechaza la hipótesis nula (H_0), aceptando la hipótesis alterna (H_A), con un 95 % de confianza se puede concluir que todas las fuentes de variación incluyendo los factores Perm Patio y Perm CAT tienen un impacto significativo, debido a que el P-value de los efectos τ_1 y τ_2 son 0.002 y 0.001 respectivamente y menores que $\alpha = 0.05$, por tal motivo se puede afirmar que los efectos τ_1 y τ_2 influyen sobre la variable de respuesta, el efecto de la interacción de dichos factores no tiene un impacto significativo sobre la variable de respuesta, ya que el P-value es igual a 0.794 y mayor a $\alpha = 0.05$.

Continuando con el análisis de efectos y coeficientes estimados es importante comprender los valores que toman el $R^2 = 90.15\%$ que es el porcentaje de factores que explican la varianza de la pérdida de sacarosa y el R^2 (ajustado) = 81.28% que explica el número de factores en el modelo. Ambos valores indican que el modelo se ajusta bien a los datos, el valor de R^2 (pronosticado) = 63.12% es la capacidad para pronosticar con el modelo analizado. A continuación se presenta los resultados obtenidos del análisis de los efectos, coeficientes. (Ver Tabla 23).

Tabla 23. Efectos y coeficientes estimados.

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		-34,94	7,79025	-4,48	0,001
Temperatura		1,01	0,23643	4,26	0,002
Humedad R		0,18	0,03741	4,78	0,001
Bloque 1		1,12	0,27584	4,05	0,002
Bloque 2		-0,88	0,27347	-3,22	0,009
Bloque 3		-0,27	0,29355	-0,93	0,373
Bloque 4		0,25	0,28589	0,87	0,405
Perm Patio	1,15	0,58	0,14214	4,06	0,002
Perm CAT	1,36	0,68	0,13833	4,90	0,001
Perm Patio*Perm CAT	0,07	0,04	0,13572	0,27	0,794
S = 0,601989	PRESS=13,5666				
R-cuad. = 90,15 %	R-cuad.(pred.)=	63,12%	R-cuad.(ajustado) = 81,28%		

Fuente: Adaptado de Minitab Statistical ®.

De la Tabla anterior se puede concluir que los coeficientes de regresión de los términos Constante, Temperatura, Humedad R, Bloque 1 y 2, Perm Patio y Perm CAT tienen relación con la variable de respuesta (pérdida de sacarosa), debido a que su correspondiente P-valor es menor a 0.05. También de la Tabla 23 se deduce la siguiente ecuación compuesta por los coeficientes determinados para unidades codificadas³⁸ por el software para pronosticar la Pérdida de Sacarosa (Y), con base en los términos incluidos en el análisis, los que poseen un P-value es menor a 0.05.

$$Y = -34.94 + 1.01 \times T + 0.18 \times HR + 1.12 \times B_1 - 0.88 \times B_2 + 0.058 \times \text{PermP} + 0.68 \times \text{PermCAT} \quad [3]$$

T = Temperatura Ambiente

PermP = Permanencia en Patio

HR = Humedad Relativa

PermCAT = Permanencia desde los

Bloque_(1, 2) = Edad de la caña de azúcar

campas a báscula

Debido a que la ecuación anterior contempla las operaciones que se realizan antes de llegar a patio de fábrica y el R-cuad.³⁹ (pred.) es igual 63,12 %, se utiliza la ecuación [4] (Larrahondo, 2004, p10), con la finalidad de estimar el comportamiento de la concentración de sacarosa en determinado tiempo, para el proceso de almacenar la caña de azúcar en los vagones en el patio de fábrica.

$$S_t = S_0 \times e^{-kt} \quad [4]$$

Donde S_t y S_0 son las concentraciones de sacarosa a un tiempo (t, horas; 0, cero) y k es la constante de primer orden de la hidrólisis (rompimiento) de la molécula de sacarosa en una variedad de caña de azúcar determinada (CC-8592).

³⁸ Unidades codificadas: Elija esta opción para mostrar los puntos del diseño en unidades codificadas. Minitab establece el nivel bajo de todos los factores en -1, el nivel alto en +1 y los puntos centrales en 0.

³⁹ R-cuad. (pred.) o R^2 pronosticado: Se utiliza en el análisis de regresión para indicar en qué medida el modelo es capaz de predecir las respuestas de nuevas observaciones, en tanto que R^2 indica en qué medida el modelo se ajusta a sus datos. R^2 pronosticado puede evitar el sobreajuste del modelo y puede ser más útil que R^2 ajustado para comparar modelos, porque se calcula utilizando observaciones no incluidas en la estimación del modelo.

$$S_t = 14,26706 \times e^{-0,00228132t} \quad [5]$$

Donde S_t es la concentración de sacarosa a determinar y S_0 es igual a 14,26706 es la concentración promedio de sacarosa % Caña, para los datos recolectados en el diseño de experimento, e es la constante de Euler, k es 0,002281372 constante de hidrólisis de la variedad CC-8592 bajo las condiciones de la experimentación y t es el tiempo (horas) de almacenamiento de caña azúcar en patio de fábrica en los equipos de transporte o vagones.

Tabla 24. Resultados de aplicar Ecuación 5.

Tiempo t (horas)	Sacarosa en t Ecu. [5]	Pérdida de Sacarosa en t
0	14,26706	0.00000
1	14,22912	0,03794
2	14,19128	0,07578
3	14,15354	0,11352
4	14,11591	0,15115
5	14,07837	0,18869
6	14,04093	0,22613
7	14,00359	0,26347

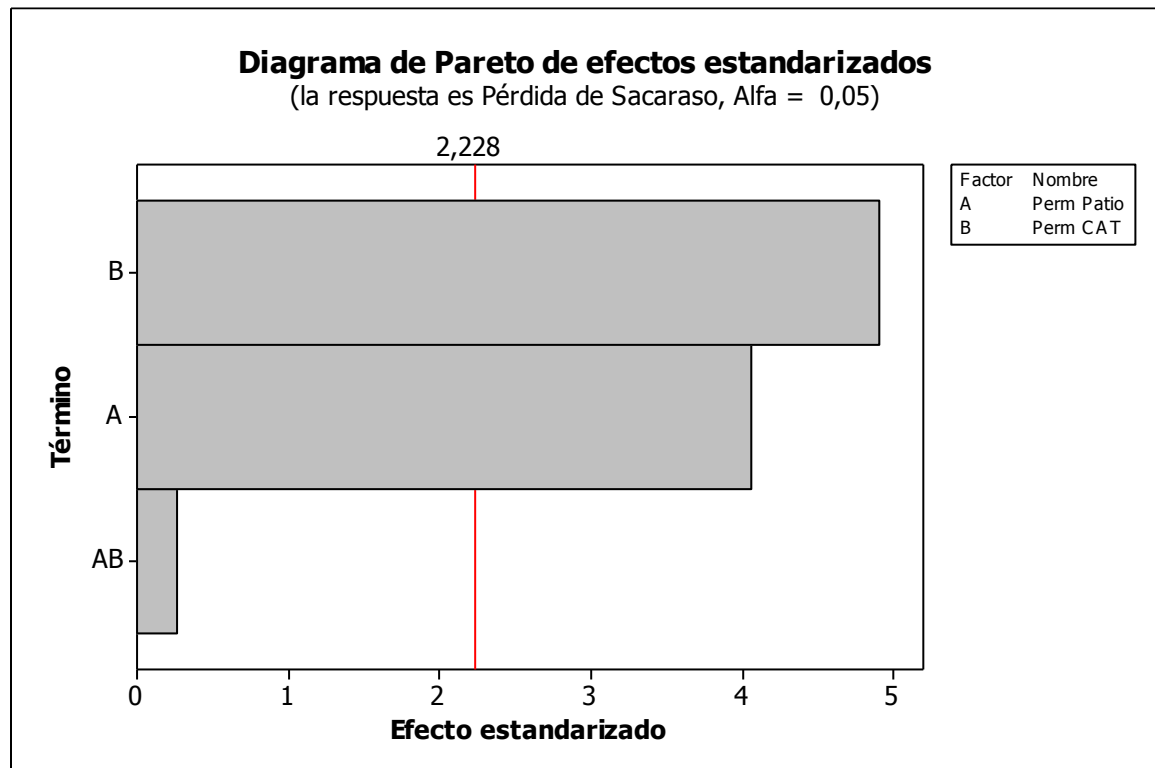
Fuente: Elaboración propia.

La concentración de sacarosa estimada en un tiempo t con la ecuación [3] tiene un desfase en el pronóstico, con respecto a la ecuación [5] donde se evidencia una diferencia de 30 minutos en el tiempo de permanencia en patio pronosticado con la ecuación [3], lo que se considera un error aceptable dentro del pronóstico, permitiendo hacer uso la ecuación [3] con el software Minitab Statistical®, empleando la herramienta denominada Optimizador de respuesta, para determinar el tiempo de almacenamiento de la caña de azúcar en patio de fábrica que vaya afín con las meta propuesta.

Consecutivamente en la etapa Actuar de la metodología propuesta para realizar el DOE (ver Tabla 12 y Tabla 13), se Interpretan los resultado del diseño factorial 2^2 ; en este orden de ideas, para visualizar de manera gráfica los factores que influyen en la variable

de respuesta, a continuación se presenta un diagrama de Pareto⁴⁰ (ver Gráfico 6) de los efectos principales donde muestra el valor absoluto de los efectos y traza una línea de referencia en la gráfica. Los efectos que se extienden más allá de esta línea de referencia son catalogados como potencialmente importantes.

Gráfico 6. Diagrama de efectos principales.



Fuente: Adaptado de Minitab Statistical ®.

Con base en lo anterior se puede afirmar que existe suficiente evidencia estadística de que los factores Perm Patio y Perm CAT tienen un impacto significativo sobre la Pérdida de sacarosa, sin embargo se muestra que la interacción de ellos no influye de manera significativa en la variable de respuesta, debido a que hay una anidación entre los factores Sector-suerte i y la permanencia en patio k , por lo que la interacción de dichos factores no es la suma de los efectos de los mismos, sino que es la multiplicación de ellos por lo tanto la interacción no presenta un impacto significativo, no obstante la interacción si posee un

⁴⁰ Se utiliza un diagrama de Pareto de los efectos para determinar la magnitud y la importancia de un efecto. El diagrama muestra el valor absoluto de los efectos y traza una línea de referencia en la gráfica. Cualquier efecto que se extienda más allá de esta línea de referencia es potencialmente importante.

impacto significativo sobre la variable de respuesta, ya que a mayor permanencia en patio y mayor permanencia en CAT mayores serán las pérdidas de sacarosa en la caña de azúcar.

Consecutivamente se utiliza la herramienta optimizador de respuesta del software Minitab Statistical ®, para identificar la combinación de valores de factores que en conjunto mejoran una respuesta individual o un conjunto de respuestas. El software calcula una solución óptima y dibuja una gráfica⁴¹ la cual permite realizar un análisis de sensibilidad y a su vez posibles mejoras de la solución inicial. La solución óptima sirve como punto de partida para la gráfica. La optimización conjunta debe satisfacer los requisitos de todas las respuestas del conjunto, lo cual se mide por la deseabilidad compuesta⁴².

El software proporciona un óptimo el cual sería **NO** almacenar la caña de azúcar en el patio de fábrica (ver Figura 18), pero por la naturaleza del proceso no se puede cumplir con este óptimo.

Por lo tanto se configura la herramienta “optimizador de respuesta⁴³” asignándole un valor objetivo de 0.94393% Caña⁴⁴ y el límite inferior y superior de 0.94 % y 0.95 % Caña respectivamente, para obtener un óptimo que se ajuste a las características del proceso, estos valores lo que permiten, es buscar el punto óptimo para reducir (objetivo) la pérdida de sacarosa por almacenamiento de caña en patio de fábrica hasta la meta propuesta, en este sentido, con la nueva configuración se identifica que se puede almacenar la caña de azúcar cuando se encuentren en una edad que oscile de 11 a 14 meses en equipos

⁴¹ La gráfica muestra el efecto de cada factor (columnas) en las respuestas o en la deseabilidad compuesta (filas). Las líneas rojas verticales en la gráfica representan la configuración de los factores actuales. Los números que se muestran en la parte superior de una columna muestran la configuración de los niveles de factores actuales (en rojo). Las líneas azules horizontales y los números representan las respuestas para el nivel del factor actual.

⁴² La deseabilidad individual y compuesta: Evalúa la efectividad con la que una combinación de variables de entrada satisface las metas que se hayan definido para las respuestas. La deseabilidad individual (d) evalúa cómo la configuración optimiza una respuesta individual; la deseabilidad compuesta (D) evalúa cómo la configuración optimiza un conjunto de respuestas en general. La deseabilidad tiene un rango de cero a uno. Uno representa la situación ideal; cero indica que una o más respuestas están fuera de los límites aceptables.

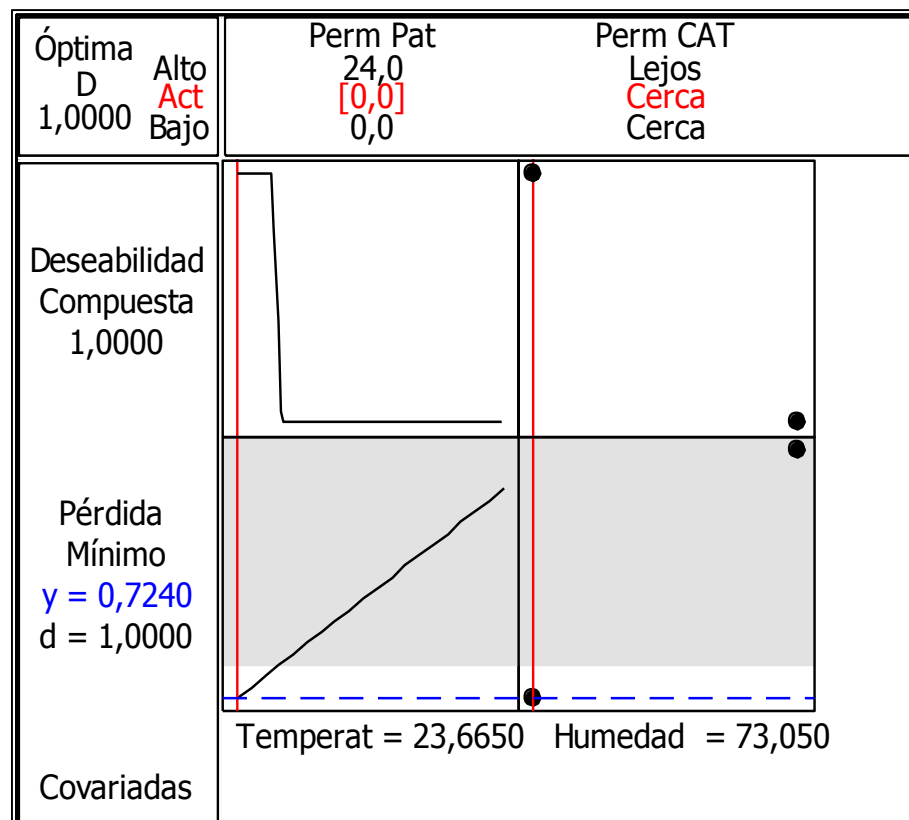
⁴³ El análisis del diseño de experimento factorial completo que contiene tablas, datos recolectados y gráficas yacen en un archivo de Minitab Statistical® adjunto a este documento (DOE-Factorial-Completo.MPJ)

⁴⁴ Para el cálculo del objetivo, se tiene cuenta la pérdida por CAT de los sectores-suerte cercanos al ingenio y en la hora cero de almacenamiento en patio la cual es de 0.74393 % Caña y se le adiciona 0.216 % Caña para cumplir con la meta propuesta de 0.400 % Caña, para el indicador que mide la compañía (Pérdida por permanencia en patio y lavado de caña)

en patio de fábrica y solo cuando esta provenga de sectores-suerte cercanos al ingenio, los cuales se encuentran dentro de un radio de 15 km de distancia del ingenio objeto de estudio y se puede almacenar durante un periodo de aproximadamente cinco horas a partir de su llegada a báscula. (Ver Figura 19).

Los resultados sugieren **NO** almacenar caña de azúcar que procedan de fincas (sector-suerte) que se encuentren a un radio mayor de 30 km de distancia de la ubicación del ingenio, debido a que no cumpliría con los valores planteados como objetivo para el optimizador de respuesta. A continuación se presentan las gráficas generadas por recurrir a la herramienta optimizador de respuesta del software Minitab Statistical®.

Figura 18. Óptimo propuesto por el software.

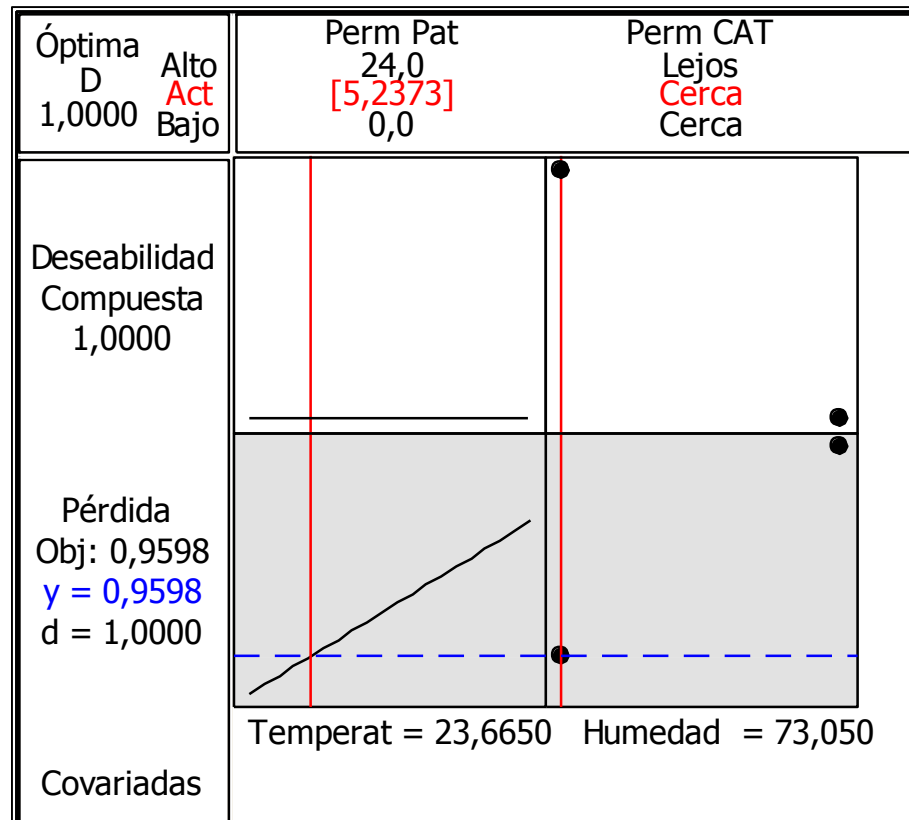


Fuente: Adaptado de Minitab Statistical ®.

Después de realizar la configuración del optimizador de respuesta que se planteó primitivamente, los nuevos resultados con los niveles más adecuados para los factores Perm Patio y Perm CAT que cumplen con la meta global (0.400 % Caña) propuesta para

la compañía objeto de estudio y que hacen parte de los criterios para almacenar caña en equipos de transporte en patio de fábrica, se muestran en la siguiente Figura.

Figura 19. Óptimo ajustado al proceso real.

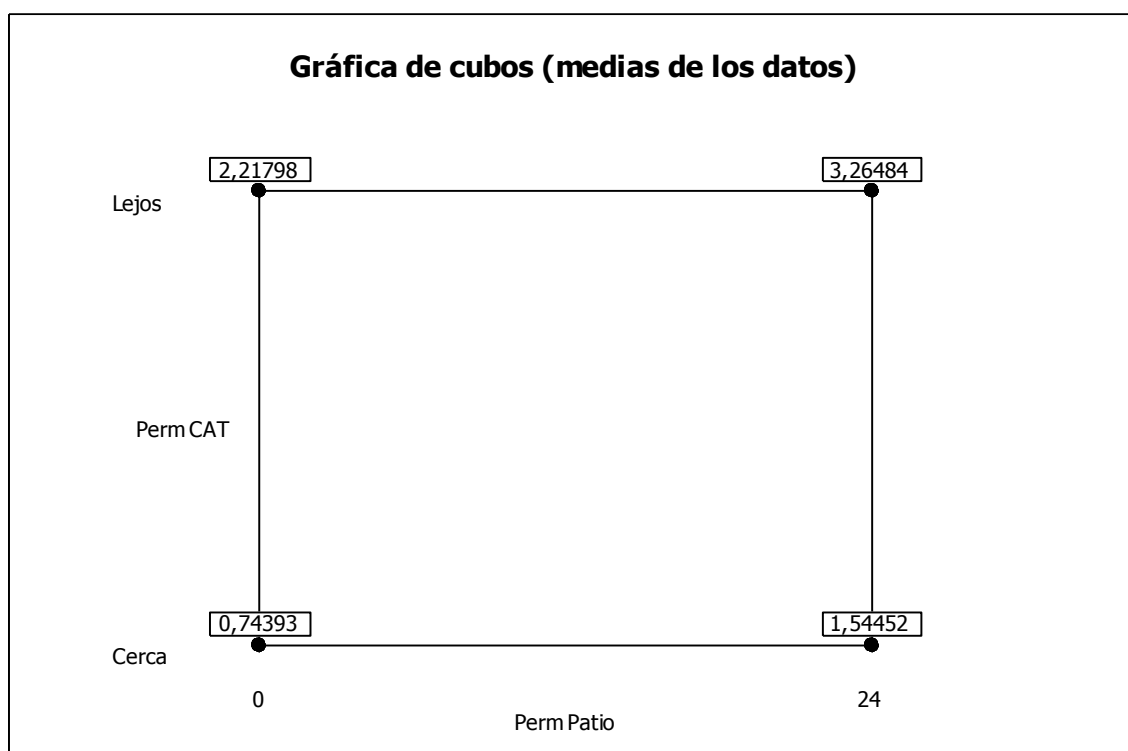


Fuente: Adaptado de Minitab Statistical ®.

En la figura anterior se observa la información que contribuirá en la definición de los criterios de almacenamiento de caña en patio de fábrica (ver Tabla 27).

A continuación se exponen las pérdidas de sacarosa por permanencia en CAT de los sectores-suerte cercanos (dentro de un radio de 15 km de distancia) se presentan en la Figura 20 y se encuentra en la parte inferior izquierda de la gráfica y las pérdidas de sacarosa por permanencia en CAT de los sectores-suerte lejanos (fuera de un radio de 30 km de distancia) se muestran en la parte superior izquierda y se estiman las ingresos económicas dejados de percibir por la compañía por dichas pérdidas. (Ver Tabla 25).

Figura 20. Pérdidas de sacarosa por permanencia en CAT.



Fuente: Adaptado de Minitab Statistical ®.

Con el análisis de los datos para el diseño del experimento se ha identificado y cuantificado los factores que influyen significativamente en la pérdida de sacarosa por almacenamiento de caña en patio de fábrica. También se calculó las pérdidas de sacarosa por la permanencia en CAT, la cual se divide en sectores-suerte cercanos y lejanos, cuyas pérdidas serían 0.744% y 2.218 % Caña respectivamente (ver Figura 20), lo cual proporciona como información de entrada para futuras investigaciones. A continuación se presentan los ingresos económicos totales dejados de percibir por la compañía, debido a las pérdidas por CAT.

Tabla 25. Pérdida económica por tiempo de permanencia en CAT.

Permanencia en CAT (kilómetros)	Permanencia en Patio (horas)	Pérdida Económica (millones de pesos)
0 - 15	0	\$ 18.619.185.074,892
> a 30	0	\$ 55.511.916.594,852

Fuente: Elaboración propia.

7.3. Realizar un plan de acción que contribuya a minimizar la pérdida de sacarosa en el proceso de almacenamiento de la caña de azúcar.

La etapa IMPLEMENTAR de la propuesta metodológica (Ver Tabla 10 y Tabla 11) contiene el tercer y último objetivo específico, donde se propone un plan de acción para minimizar las pérdidas de sacarosa por almacenamiento de caña en patio de fábrica utilizando la herramienta de 5W + 2H con una modificación, la cual consiste en adicionar una columna que se denomina “CAUSA”, donde se describe brevemente las actividades y situaciones que afectan el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica, provenientes del diagrama de Ishikawa (ver Figura 13).

Para determinar la meta del plan de acción, se debe fraccionar el indicador que determina la pérdida total de sacarosa que calcula la compañía, la cual se denomina como pérdida por permanencia en patio y lavado de caña, el cual se divide en pérdida por tiempo de almacenamiento de caña en patio de fábrica y por lavado de la caña de azúcar. Con base en lo anterior, se calcula el valor de la pérdida por almacenamiento de caña en patio de fábrica, que se deriva de la resta entre la pérdida total y el lavado de caña, donde ésta última se obtuvo de un estudio⁴⁵ realizado de forma paralela al presente y se concluyó que dicha pérdida es constate e igual al 1.37 % Sac Caña. En este sentido, se convierte dicha pérdida de % Sac Caña a % Caña y así poder generar una meta coherente con el indicador que lleva la compañía, que es pérdida por permanencia en patio y lavado de caña. (Ver Tabla 26).

Tabla 26. Cálculo Meta año 2014.

Tipo de Pérdida	Promedio
Pérdidas Permanencia en Patio y lavado % Caña	0,654
Pérdidas Permanencia en Patio y lavado % Sac Caña	4,842
Pérdidas por lavado %Sac Caña	1,370
Pérdidas por lavado %Caña	0,184
Pérdidas Almacenamiento en Patio % Sac Caña	3,472
Pérdidas Almacenamiento en Patio % Caña	0,469
Meta de reducción % caña para el año 2014	0,400
Meta de reducción % Sac caña	3.108

Fuente: Elaboración propia.

⁴⁵ Estudio realizado por el área de Control Procesos del ingenio objeto de estudio.

La pérdida por almacenamiento de caña en patio de fábrica es igual a 0.469 % Caña, la cual se debe minimizar a 0.216 % Caña, para cumplir con la meta global de 0.400 % Caña, es decir, la pérdida por permanencia en patio y lavado de caña. Por tal motivo, en la siguiente Figura 21 se presenta el formato y estructura del PLAN DE ACCIÓN⁴⁶ que se propuso para contribuir a minimizar de la pérdida de sacarosa en patio y como consecución del tercer y último objetivo específico del presente trabajo de investigación.

Figura 21. Formato del plan de acción.

OBJETIVO/META DEL PLAN DE ACCIÓN				RESPONSABLE DEL PLAN DE ACCIÓN		FECHA DE INICIO DEL PLAN DE ACCIÓN									
INDICADOR				BRAIAM SERNA GONZALEZ		FECHA DE TERMINACIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN									
CAUSA	QUÉ?	CÓMO?	QUIÉN?	CUÁNDO (Fecha de terminación)						DÓNDE? (Sitio)	POR QUÉ? (Justificación)	CUÁNTO VALE? \$MM	IMPACTO	STATUS	CONTINGENCIA
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN						

Fuente: Adaptado de Falconi, año 2011.

En la columna WHAT ó ¿QUÉ? Se describen las contramedidas formuladas para contrarrestar las causas de la problemática; para WHO ó ¿QUIÉN? Se expone el nombre o sigla, del responsable de la contramedida, debe ser una persona física; en el WHEN ó ¿DÓNDE? especifica el lugar o sitio donde se desarrollará la contramedida planteada; con el WHY ó ¿POR QUÉ? se justifica porque se va implementar dicha contramedida; HOW ó ¿CÓMO? manifiesta el procedimiento que se debe ejecutar para realizar determinada contramedida, por último el HOW MUCH ó ¿CUÁNTO CUESTA? se calcula el valor económico o costo en el que se incurre al desplegar todas y cada una de las contramedidas del PLAN DE ACCIÓN. (Ver Anexo 6).

Adicional al plan de acción propuesto se definieron tres criterios importantes para la toma de decisión de los viajes con caña de azúcar que se deben almacenar en patio de caña y el tiempo asignado. Los criterios edad y permanencia en CAT son importantes para minimizar la pérdidas de sacarosa, en ese sentido, la caña de azúcar que se encuentre entre

⁴⁶ El Plan de Acción propuesto para contrarrestar las causas de la pérdida por almacenamiento de caña en patio de fábrica del ingenio objeto de estudio, yacen en un archivo de Excel® adjunto a este documento ([PLAN-DE-ACCION.xlsx](#))

los 11 y 14 meses de edad, y de donde provienen (sector-suerte o finca) se encuentre dentro de un radio de 15 km de distancia de la ubicación del ingenio bajo estudio, y almacenar la caña de azúcar en el patio de fábrica por un máximo cinco horas, son los tres criterios principales para minimizar la pérdida de sacarosa por almacenamiento de caña en patio de fábrica.

Tabla 27. Resumen criterios para almacenar caña de azúcar en el patio de fábrica.

Edad de la caña (meses)	Permanencia en Patio (horas)	Permanencia en CAT (kilómetros)
11 – 14	0 – 5	0 - 15

Fuente: Elaboración propia.

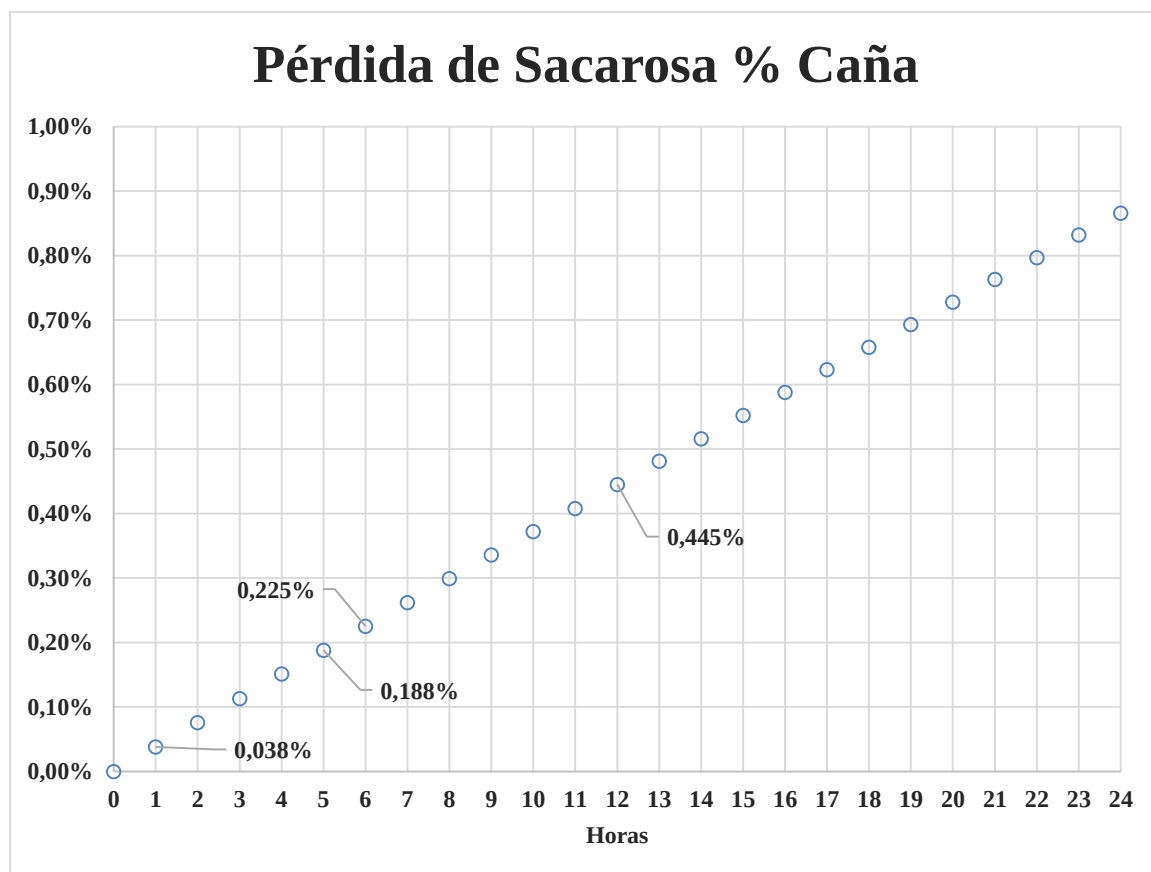
Adicional los criterios anteriores existen otras contramedidas que se deben implementar para hacer más eficiente el proceso de almacenamiento de caña en patio de fábrica, como capacitación de personal en software de ofimática, con el fin mejorar el desempeño del personal al manipular herramientas tecnológicas, comunicación más efectiva entre las áreas de Patio de caña y Fábrica, para un trabajo con mayor sinergia que beneficie la compañía, eliminar la práctica de almacenar la caña de azúcar en el piso del patio de fábrica, debido a que se acelera la degradación de la caña por las condiciones del suelo y la actividad de cargue de dicha caña a las mesas para alimentar molienda, entre otras. Las cuales se puede observar con mayor detalle en el archivo PLAN-DE-ACCIÓN en formato de hoja de cálculo adjunto con el presente trabajo.

A continuación se desarrolla un análisis de sensibilidad, que permite visualizar el comportamiento de la pérdida económica que se presenta en el ingenio objeto de estudio, debido las pérdidas de la concentración de sacarosa en la caña de azúcar por las inadecuadas operaciones realizadas en el proceso de almacenamiento de la caña en patio de fábrica.

8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para el análisis de sensibilidad se determina, las pérdidas de sacarosa en patio de caña por almacenamiento de la misma en quipos de transporte (ver Gráfico 7), durante un periodo de 24 horas, empleando la ecuación [5].

Gráfico 7. Pérdida de Sacarosa por almacenamiento de caña en patio de fábrica.

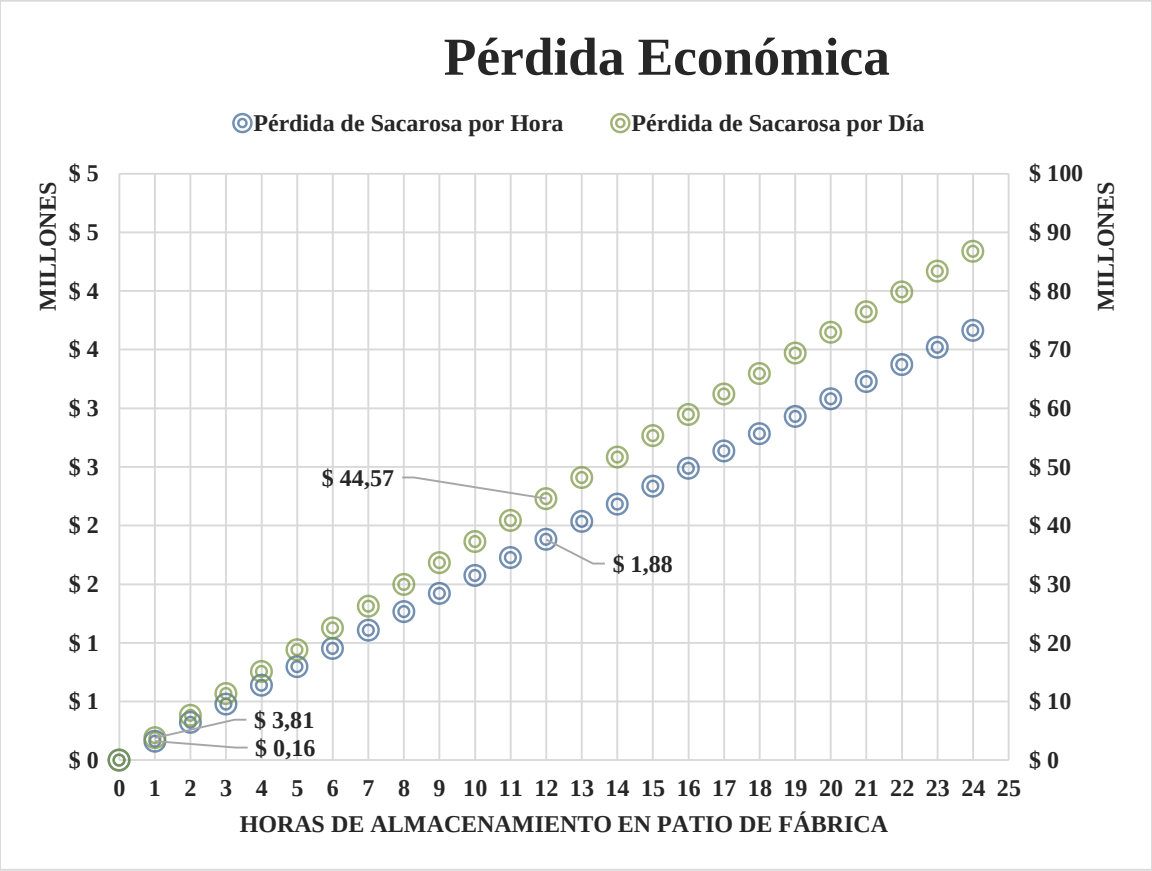


Fuente: Elaboración propia

De la Figura anterior se puede concluir que entre las 12 a 13 horas de almacenamiento de caña en patio, se encuentra la pérdida de sacarosa de 0.469 % Caña determinada en el proceso objeto de estudio (ver Tabla 26). Además, se estiman las pérdidas económicas para el ingenio objeto de estudio, utilizando la ecuación [2], con base en una molienda promedio de 380 toneladas por hora y 9.000 toneladas de caña por día, durante un periodo de 24 horas para la pérdida de sacarosa. Por consiguiente, se puede visualizar las pérdidas económicas (en miles de pesos) por cada hora que pasa la caña de

azúcar almacenada en el patio de fábrica. (Ver Gráfico 8). También se estudia para una molienda mensual promedio de 187395,785 y anual de 2.248.749,420 toneladas, durante un mismo periodo de 24 horas para la pérdida de sacarosa. (Ver Gráfico 9).

Gráfico 8. Pérdida económica por hora de almacenamiento de caña en patio fábrica.

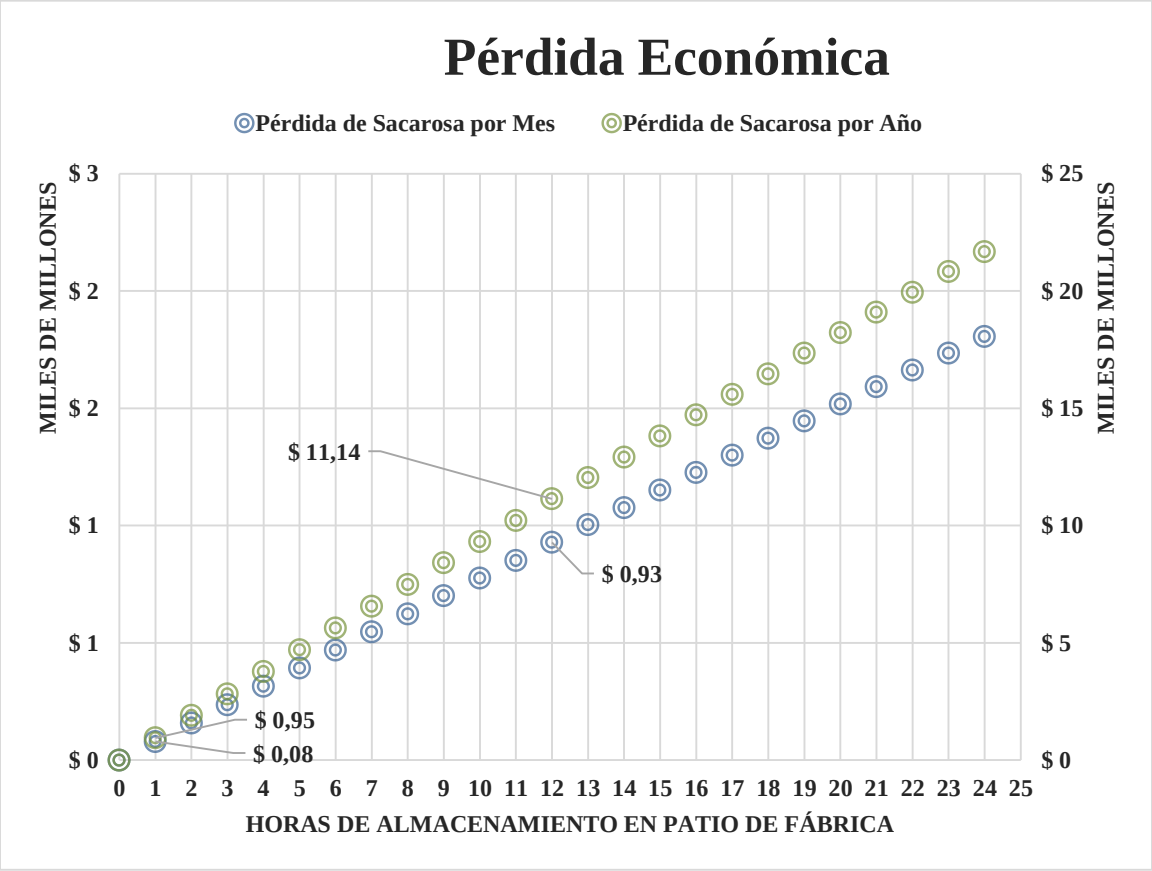


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior se puede observar las pérdidas económicas por hora y día de molienda, donde por una hora se pierde \$ 160.714,38 mil pesos colombianos; la misma analogía se puede hacer para la caña molida por día (9.000 toneladas), dejando de percibir ingresos por \$ 3.806.393,10 mil pesos respectivamente. También de continuar la pérdida de sacarosa en 0.469 % caña, la compañía seguirá perdiendo alrededor de 1.9 millones de pesos por hora o 44.6 millones pesos por día.

A continuación se presenta la Figura en análisis para los ingresos dejados de percibir mensual y anualmente por cada hora que se almacene la caña de azúcar en patio de fábrica en el ingenio objeto de estudio.

Gráfico 9. Pérdida económica mensual y anual.



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfico 9 se muestran las pérdidas económicas, mensual y anualmente, donde por cada hora de almacenamiento se pierde \$ 79.255.780,43 y 951.069.365,19 mil pesos colombianos mensual y anualmente respectivamente. Asimismo de continuar la pérdida de sacarosa en 0.469 % caña, la compañía seguirá perdiendo alrededor de \$ 930 millones de pesos por mes o \$ 11.200 mil millones pesos por año. Continuando con el análisis de sensibilidad se establecen los beneficios económicos para la compañía, si se minimiza la pérdida de sacarosa por almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica de 0.469 a 0.216 % Caña, los beneficios económicos percibidos al realizar esta minimización, facilitará la inversión en nuevas tecnologías, capacitación de personal y adquirir nuevos

equipos de transporte disponibles (vagones) para las operaciones agrícolas, haciendo que los procesos⁴⁷ sean más eficientes. A continuación se presenta la estimación de los ingresos que la compañía puede percibir mejorando el proceso de almacenamiento de caña en patio de fábrica. (Ver Tabla 28).

Tabla 28. Ingresos Económicos después de una mejora.

Toneladas de caña molida	Precio de venta ⁴⁸ \$/Quintal	Quintales	Ingresos
2.248.749,42	\$ 64.038,00	99.049,694	\$ 6.342.944.306,76

Fuente: Elaboración propia.

Dichos ingresos se pueden destinar en realizar inversiones en nuevas tecnologías que se empleen para mejorar el seguimiento de la permanencia de los viajes de caña de azúcar desde el momento en que se realiza la quema y/o corte hasta que llega el viaje de caña a Báscula en el área de patio de fábrica, obteniendo una mejora global, debido a que involucra el macroproceso de Suministro de caña de azúcar a Fábrica, en este sentido, permitir un seguimiento más meticuloso de los viajes de caña y lo que sucede con ellos en todo el transcurso de su viaje desde los campos (Sectores-suerte) hasta la preparación de la caña para la molienda en el tándem de molinos en Fábrica.

En la capacitación del personal involucrado en el proceso bajo estudio en herramientas de ofimática que le permitan mejorar su desempeño en las actividades que realiza en horas laborales y en herramientas de mejora de procesos, además capacitación en la importancia de su trabajo para que comprendan las diferentes actividades y situaciones críticas al momento de la realización de sus actividades y las desarrollen lo mejor posible.

También inversiones para adquirir nuevos equipos de transporte o vagones, con el fin de mejorar la disponibilidad de equipos y realizar el almacenamiento de la caña de

⁴⁷ Macroproceso de suministro de caña de azúcar a patio de fábrica por el área de Cosecha y Macroproceso de producción de azúcar por el área de Fábrica.

⁴⁸ Datos del informe de sostenibilidad 2012.

azúcar solo en equipos y poder eliminar por completo la práctica de arrumar la caña de azúcar en suelo del patio de fábrica.

A continuación se presentan los ingresos netos que obtendría la compañía al desarrollar el plan de acción y realizar las inversiones sugeridas previamente y especificadas en el Plan de Acción propuesto para el ingenio objeto de estudio.

Tabla 29. Estimación de Ingresos Económicos.

Ingresos	Inversiones Plan de Acción	Ingresos Netos
\$ 6.342.944.306,76	\$ 1.842.900.000,0	\$ 4.500.044.306,76

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 29 se observan los ingresos netos que entrarían al Balance General de la compañía objeto de estudio, después de realizar la inversión en las contramedidas sugeridas en el plan de acción, con la finalidad contribuir en la mejora del proceso de almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica, de igual manera apoyar con la minimización del indicador global Pérdida por permanencia en patio y lavado de caña, que mide el ingenio caso de estudio.

CONCLUSIONES

- Como resultado de la investigación se identificaron, seleccionaron y cuantificaron los factores que intervienen en el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica, lo que permite la comprensión del impacto negativo que tiene dicho en la producción de azúcar y derivados, posteriormente se presenta un plan de acción con las prácticas que se deben implementar para contribuir en la mejora del proceso objeto de estudio y minimizar su impacto negativo que genera la pérdida de sacarosa en patio de fábrica.
- Durante la caracterización del proceso almacenamiento de caña de azúcar en el patio de fábrica, se puede concluir que la mayoría de las actividades que se ejecutan en el mismo, son desarrolladas de manera empírica por parte del personal involucrado, careciendo de estándares de procedimientos desarrollados por personal calificado, que permita orientar el personal en sus actividades rutinarias mejorando su desempeño y así contribuir en la mejora del proceso de almacenamiento de caña de azúcar en el patio de fábrica.
- También en la caracterización del proceso de almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica se puede evidenciar la ausencia de conocimiento técnico por parte del personal, en la manipulación de herramientas de calidad y tecnológicas (ofimáticas) que permiten medir, controlar y mejorar las actividades rutinarias que realizan, lo que lleva a que en repetidas ocasiones no desempeñen sus actividades laborales de manera adecuada y por consiguiente se aumentan las pérdidas de sacarosa en el proceso objeto de estudio. También se puede afirmar que hay una minoría del personal que desconoce el impacto que generan al realizar su trabajo de una manera inadecuada.
- Con base en las inconsistencias encontradas en el análisis de los datos históricos proporcionados para el desarrollo del estudio, se recomienda que se mejore, los métodos de almacenamiento de información y comunicación entre las áreas de cosecha, control procesos y agronomía, para no generar diferencias entre la información que se manipula entre las áreas.

- Se puede concluir que la mayoría del personal involucrado en el proceso almacenamiento de caña de azúcar en el patio de fábrica posee el conocimiento que contribuyen en la mejora de dicho proceso, lo que se manifestó cuando se realizó la sesión de Brainstorming el día 23 de mayo de 2013, pero es necesario que la empresa capacite el personal en herramientas de calidad como: Diagrama de Ishikawa, Diagrama de Pareto, Hoja de Verificación, entre otras; además en herramientas de ofimática como Excel. De tal manera que puedan desempeñar con mayor eficiencia su trabajo cotidiano, minimizando tiempo y errores en sus labores, lo que contribuirá en reducir las causas de las pérdidas por almacenamiento de caña en patio de fábrica.
- Los ingresos económicos anuales dejados de percibir por la compañía, si las pérdidas totales por almacenamiento de caña en patio de fábrica se mantienen, serán alrededor de \$ 11.746 millones de pesos, la cual se pretende reducir con el plan de acción propuesto, pero existe otra pérdida, la cual corresponde al lavado de la caña de azúcar que representa una cifra de alrededor de \$ 4.617 mil millones de pesos, en este sentido, queda abierta la posibilidad de realizar un trabajo de investigación que contribuya minimizar las pérdidas de sacarosa por el lavado de la caña en el proceso de preparación caña para molienda en el tándem de molinos en la Fábrica.
- Se recomienda al ingenio objeto de estudio eliminar por completo la práctica de almacenar la caña de azúcar en arrumes en el patio de caña, con base en la experimentación y la investigación realizada por Larrahondo (2001) donde sugiere que es necesario descartar dicha práctica, debido a que la manipulación, condiciones del lugar y tiempo empleados en apilar la caña en el superficie del patio de fábrica, acelera la degradación de la caña de azúcar; si se almacena la caña por seis horas en arrumes en el patio de fábrica la pérdida de sacarosa en la caña es igual a 0.900 % caña (Tabla 2), lo cual no permite un tiempo de almacenamiento apropiado y como consecuencia el no cumplimiento de la meta global de la compañía denominada pérdida por permanencia en patio y lavado de caña en 0.400 % Caña.
- Con todas las actividades realizadas para el análisis de información proporcionada por la compañía y generada por la investigación en el diseño y análisis del experimento, se concluye que la Permanencia en Patio de caña es un factor clave para minimizar las

pérdidas de sacarosa en el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica, debido a que se determinó y comprobó que almacenar la caña en vagones la degradación de la caña es menor que almacenarla la caña en arrumes en el suelo del patio caña, obteniendo un máximo de cinco horas de permanencia en patio para cumplir con la meta global de la compañía de pérdida de sacarosa por permanencia en patio y lavado de caña de 0.400% Caña.

- La pérdida de sacarosa por almacenamiento de caña es proporcional al tiempo de almacenamiento que transcurre la caña de azúcar en los vagones, por tal motivo la permanencia en patio de fábrica debe ser la mínima posible aumentando la rotación de equipos de transporte en patio, una de las contramedidas es adquirir nuevos equipos de transporte, con el fin de mejorar la disponibilidad de equipos para el suministro de caña en patio.
- Con base en el análisis de varianza desarrollado en el análisis del experimento factorial completo (ver Tabla 22), de la cual se concluye que los efectos con mayor incidencia sobre la variable respuesta son, permanencia en patio (PermP) y permanencia en CAT (PermCAT), debido a que los valores de sus P-value son 0.002 y 0.001 respectivamente y menores a $\alpha = 0.05$. Criterio por el cual se acepta de los factores si tienen un impacto significativo sobre la pérdida de sacarosa (variable de respuesta).
- También se puede evidenciar que el efecto de la interacción de los factores permanencia en patio (PermP) y permanencia en CAT (PermCAT) no tiene un impacto significativo sobre la variable de respuesta (Pérdida de sacarosa), ya que su P-value es 0.794, mayor que el nivel de significancia asumido de $\alpha = 0.05$, pero es preciso aclarar que, puede ser consecuencia del diseño factorial del experimento, debido a que todos los factores no se encuentran cruzados y existe una anidación del componente sector-suerte j con respecto al factor Permanencia en CAT (ver Figura 17).
- Se determinó un modelo matemático [ecuación 3] que se puede emplear para pronosticar la pérdida de sacarosa desde que se corta la caña de azúcar en los campos hasta que se almacena la caña en patio de fábrica durante un periodo de 0 a 24 horas, dicho modelo involucra la permanencia en patio (PermP), permanencia en CAT (PermCAT),

bloques (B1, 2,). Donde los bloques corresponden al rango de 11 – 14 meses de edad de la caña de azúcar y dos factores no controlables (covariables) que son Temperatura ambiente y la Humedad relativa.

- Para minimizar indicador global de la compañía pérdida por Permanencia en patio y lavado da caña, las pérdidas de sacarosa por el proceso de almacenamiento de caña de azúcar en patio de fábrica, se debe almacenar caña de azúcar con una edad que oscile entre los 11 a 14 meses de edad, que provenga de fincas que se encuentren dentro de un radio de 15 kilómetros de distancia de la ubicación del ingenio objeto de estudio y por un periodo de tiempo en patio de fábrica de máximo cinco horas.
- Con la ecuación propuesta por Larrahondo en el artículo “Una aproximación a la reducción de las pérdidas de sacarosa entre cosecha y molienda en el sector azucarero Colombiano” (2004, p10), se realizó comprobación del tiempo máximo que debía estar almacenada la caña de azúcar en equipos de transporte en el patio de fábrica del ingenio objeto de estudio, corroborando que el tiempo máximo se encuentra entre cinco y seis horas de permanencia de la caña en vagones, para cumplir con la meta global de una pérdida de 0.400 % Caña.
- Se recomienda a la compañía el desarrollo de nuevas investigaciones que contribuyan a minimizar las pérdidas que transcurren desde que se corta la caña de azúcar en los campos hasta que llega a báscula, las cuales en promedio es de 0,744 % Caña para los sectores-suerte que se encuentran en un radio de 15 kilómetros del ingenio y de 2,218 % Caña para los sectores-suerte que se encuentran a un radio mayor a 30 kilómetros del ingenio objeto de estudio, debido a que la compañía está dejando de percibir por el total dichas pérdidas de sacarosa alrededor de \$ 18.619 y \$ 55.511 mil millones de pesos colombianos respectivamente.
- Con el desarrollo del trabajo de investigación se puede concluir que la aplicación de la metodología DMAIC proporciona información a ingenieros, gerentes de planta, estudiantes de ingeniería, entre otros; para que la empleen en la solución de problemas de la vida cotidiana. Es indudable que las organizaciones que adopten dichas metodologías como procedimientos estándar dentro de las mismas, logran disminuciones en sus costos

de manufactura, mejoras en la calidad de sus productos y/o servicios y reducirán el tiempo para la introducción de nuevos productos o procesos, mejorando sus estrategias y ventaja competitiva.

- Finalmente, se puede se puede determinar con base en el trabajo de investigación que el Diseño de Experimentos es una herramienta eficaz para identificar, determinar y cuantificar las causas potenciales (factores) que se incluyen en un estudio experimental, para determinar y cuantificar la influencia en una o varias variables de respuesta seleccionadas, según la investigación que se esté desarrollando, convirtiéndose así en una herramienta poderosa para el mejoramiento de procesos productivos.

BIBLIOGRAFÍA

- ASOCAÑA. Informe anual 2011-2012, El dulce sabor del azúcar de Colombia es progreso, Cali, mayo de 2012, 128 p.
- CENICAÑA, Estandarización de los sistemas de medición en los ingenios azucareros de Colombia, San Antonio de los Caballeros, 2012. 86 p.
- CRUZ, E. A., MEDINA, P. D., & SILVA, C. A. Una revisión crítica de la razón señal ruido usada por Taguchi. *Scientia et Technica* Año XVII, No 50, Abril de 2012. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, pp. 52-56.
- CORREA, A. A., MEDINA, P. D., & JARAMILLO, S. V. Mejoramiento del proceso de manufactura de poleas para hornos rotatorios: un enfoque desde el diseño experimental. *Scientia et Technica* Año XVI, No 48, Agosto de 2011. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, pp. 35-40.
- DIXON, D., EATOCK, J., MEENAN B.J., & MORGAN, M. Application of Design of Experiment (DOE) Techniques to Process Validation in Medical Device Manufacture. *Journal of Validation Technology*, February 2006 Volume. 12, Number 2, 9 p.
- EGGLESTON, G., Deterioration of cane juice sources and indicators, *Food Chemistry* 78 (2002) 95-103.
- ENGLISH, Teresa G. Application of experimental design for efficient wind tunnel testing: the tandem wing mav case. Trabajo de grado master of science. Estado de Florida, E.E.U.U. The Florida State University. Famu-Fsu College Of Engineering, 2007. 155 p.
- FERNÁNDEZ, E. G., FERNÁNDEZ, M., Pérez I., MORÓN, Y., GARCÍA, V., PERDOMO I., & PÉREZ, N. Diseños de experimentos en tecnología y control de los medicamentos. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, Vol. 39, Núm. 2, abril-junio, 2008, pp. 28-40.

- FEDERICO ZERTUCHE L., VALENCIA, A. R., & RODRÍGUEZ R. B. Aplicación del Diseño de Experimentos utilizando Análisis de Varianza Multivariado para la disminución de rechazo en un proceso del ramo automotriz. México, AcademiaJuornals.com, volumen 5,2011, 12 p.
- FALCONI CAMPOS, Vicente. Gestión de la Rutina del Trabajo Cotidiano. Brasil. Instituto de Desarrollo Gerencial, INDG. Bello Horizonte. 2011, 266 p.
- GORE, D. W., & LANGSTON, D. R. University and industry collaboration to solve welding quality problem using design of experiments (DOE). 2006 CIEC Conference, 5 p.
- GÓMEZ, R. A., & CORREA, A. A. Análisis de implementación de sistemas de bandas transportadoras en patios de almacenamiento en empresas de minería de carbón con simulación discreta y diseño de experimentos, Boletín de Ciencias de la Tierra, núm. 29, julio, 2011, pp. 55-72.
- GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto., & DE LA VARA SALAZAR, Román. Control Estadístico De Calidad y Seis Sigma. Guanajuato, 2ª edición Mc Graw Hill, 2009.
- GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto. Calidad Total y Productividad. México, 2ª edición Mc Graw Hill interamericana, 2005. 420 p.
- GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto., & DE LA VARA SALAZAR, Román. Diseño y Análisis de Experimentos. Guanajuato, 2ª edición Mc Graw Hill, 2008.
- HERRERA ZAMBRANO, Ana Cecilia. Estudio comparativo de métodos para la determinación de sacarosa y azúcares reductores en miel virgen de caña utilizados en el ingenio Pichichí S.A. Trabajo de grado Tecnología química. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. 2011. 131p.
- KLEIJEN, JACK P.C. (2008). Design of experiments: overview. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 10 p.

- LARRAHONDO AGUILAR, J. E., BRICEÑO C.O. Carta trimestral No.1, Cali, Cenicaña 2001, Vol 23.
- LARRAHONDO AGUILAR, J.E., & BRICEÑO BELTRÁN, C.O. Una aproximación a la reducción de las pérdidas de sacarosa entre cosecha y molienda en el sector azucarero colombiano. Cali, Cenicaña, 2004. 22 p.
- LE GAL, P. Y., LYNE P.W., MEYER, E., SOLER, L. G. Impact of sugarcane supply scheduling on mill sugar production: A South African case study, ScienceDirect, Agricultural Systems 96 (2008) 64-74.
- MEDINA, P. D., CRUZ, E. A., & RESTREPO, J. H. Aplicación de un modelo factorial de experimentación en un ingenio azucarero del valle del cauca. Scientia et Technica Año XII, No 32, Diciembre de 2006. UTP. ISSN 0122-1701. 313-317 p.
- MEDINA, P. D., CRUZ, E. A., & URQUIJO, C. Z. Comparación de las metodologías Shainin y Taguchi del diseño experimental en un ingenio azucarero del valle del cauca, Scientia et Technica Año XVI, No 45, Agosto de 2010. Universidad Tecnológica de Pereira, pp. 245-250.
- MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos. México D.F. 2ª edición Limusa S.A. 2004. 692 p. ISBN 968-18-6156-6.
- MEADE, George P. Manual del Azúcar de Caña: para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados. 9 Ed. Barcelona: Montaner y Simon S.A. 1967.
- ORDÓÑEZ VILLEGAS, Sandra Carolina. Modelo de Diagnóstico para la Evaluación de la Productividad de un Proceso Agroindustrial Azucarero. Trabajo de grado Ingeniera Química. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, 2004. 126 p.
- PÉREZ, G., ARANGO, M. D., & AGUDELO, Y. Aplicación del diseño de experimentos para el análisis del proceso de doblado. Colombia, Revista EIA, núm. 11, julio, 2009, pp. 145-156.

- PRIYANKA SAXENA, R.P. Srivastava & M.L. Sharma (2010) Impact of cut to crush delay and bio-chemical changes in sugarcane.
- ROY, K. S., & SUTAPA, I. N. Case studies of use of Design of Experiments in material research. Jurnal teknik industri vol. 5, no. 1, 2003: 32 - 40.
- RAMÍREZ, G., & GARCÍA, C. (2005). Sistema de transporte de caña de azúcar en Colombia. Recuperado de http://www.cenicana.org/pdf/otros/foro_cosecha_transporte_2006/4_transporte_cana_colombia_texto_may9-2006.pdf
- RAMÍREZ, Juan Ruiz. Eficiencia Relativa y Calidad de los Experimentos de Fertilización en el Cultivo de Caña de Azúcar. Terra Latinoamericana Volumen 28 Número 2, 2010, p. 149-154.
- REIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar, 1 Ed. Bartens. 2012. 880 p. ISBN 3870401427, 9783870401429.
- RUIZ, R Juan (2010). Eficiencia relativa y calidad de los experimentos de fertilización en el cultivo de caña de azúcar. Terra Latinoamericana (28), 149-154.
- ROJAS ORTÍZ, José Luis., & CONCHA PELÁEZ, Ángela María. Diseño de Experimento para el cálculo teórico de emisiones de CO₂ generadas por cuatro tipos de preparación del suelo para un cultivo de caña de azúcar. Trabajo de grado Magister en Ingeniería Industrial. Santiago de Cali, Universidad ICESI. Facultad de Ingeniería. 2011. 99 p.
- SÁNCHEZ, J. J. Los diseños de Taguchi contra los diseños clásicos de experimentos, México, Conciencia Tecnológica, núm. 19, abril, 2002, p. 0.
- SALAZAR, J. C., & ZAPATA, A. B. Análisis y diseño de experimentos aplicados a estudios de simulación. Colombia, Dyna, Vol. 76, Núm. 159, septiembre, 2009, pp. 249-257.
- SALOMON, S. (2009) Post-harvest deterioration of sugarcane, Sugar Tech, Springer, (2), 109-123.

- SRIVASTAVA R.P., SIDDHANT & SHARMA M. L. (2009) Studies on minimizing quality and quantity losses in stale cane. Sugar Tech, Springer, (2), 176-180.
- TANCO, M., Applying Design of Experiments to improve a laser welding process. Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part B, (2008). 8 p.
- KUPIEC Tom, Quality-Control Analytical Methods: High-Performance Liquid Chromatography, International Journal of Pharmaceutical Compounding Vol. 8 (2004). 5p.
- VERMAA, K., SINGHA, S.B., AGARWALA, K., SOLOMONC, S., Influence of postharvest storage temperature, time, and invertase enzyme activity on sucrose and weight loss in sugarcane, Postharvest Biology and Technology 73 (2012) 14–21.
- WALPOLE, Ronald., MYERS, Raymond H., MYERS Sharon L., & YE, Keying. Probabilidad y Estadística Para Ingenierita y Ciencias, 8ª edición PEARSON Prentice Hall, 2007. 840 p. ISBN 9789702609360.
- YUSOF, S., SHIAN, L.S., OSMAN, A. Changes in quality of sugar-cane juice upon delayed extraction and storage Food Chemistry 68 (2000) 395-401.
- ZEPEDA GUARDADO, Edwin Romeo. Propuesta de Alternativas para la Reducción de Pérdidas de Sacarosa en un Ingenio Azucarero. Trabajo de grado Ingeniero Químico. San Salvador: Universidad de el Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Química, 2012. 519 p.

ANEXOS

Anexo 1. Resumen datos analizados.

Ensayo	HORA	EXTRACTO						HPLC				HDAD	SAC REAL
		BRIX	POL	SACAROSA	PUREZA	A.R.	DEX	SAC HPLC	PZA HPLC	FRUCTOSA	GLUCOSA		
1	0	4,335	15,905	4,075	94,005	0,10	39	3,843	88,651	0,192	0,122	69,9	14,965
	24	3,815	13,185	3,385	88,728	0,23	70	3,339	87,510	0,157	0,157	65,4	12,156
2	0	4,430	16,120	4,129	93,198	0,10	72	4,173	94,199	0,102	0,106	67,1	15,001
	24	4,245	15,805	4,051	95,428	0,11	317	4,090	96,349	0,067	0,095	70,1	14,844
4	0	4,265	14,885	3,815	89,444	0,07	23	3,992	93,599	0,089	0,145	65,55	13,749
	24	4,200	14,496	3,716	88,477	0,18	53	3,970	94,524	0,146	0,336	63,05	13,260
5	0	4,150	15,060	3,861	93,045	0,11	81	4,299	97,380	0,177	0,358	69,75	14,105
	24	3,595	12,575	3,231	89,878	0,17	359	3,587	99,777	0,177	0,296	67,25	11,622
6	0	3,945	13,600	3,490	88,461	0,15	132	3,626	91,901	0,121	0,138	65,8	12,551
	24	3,565	12,965	3,332	93,456	0,35	393	3,400	95,372	0,024	0,045	61,75	11,772
7	0	4,340	15,445	3,957	91,179	0,10	122	4,465	99,760	0,189	0,391	64,6	14,209
	24	4,310	14,894	3,816	88,549	0,11	192	4,433	98,730	0,222	0,481	62,55	13,595
8	0	4,045	13,565	3,479	86,019	0,17	86	3,810	94,190	0,228	0,403	67,05	12,565
	24	3,875	13,385	3,436	88,659	0,24	553	3,700	95,484	0,306	0,393	57,05	11,959
9	0	4,370	15,810	4,050	92,683	0,09	35	4,285	98,055	0,146	0,335	69,35	14,803
	24	4,315	15,530	3,979	92,221	0,24	168	4,156	96,315	0,200	0,314	65,75	14,360
11	0	4,420	16,390	4,198	94,978	0,07	83	4,230	95,690	0,085	0,117	62,1	14,987
	24	4,305	15,709	4,025	93,504	0,11	182	4,025	93,496	0,081	0,111	65,05	14,506
12	0	4,365	14,980	3,838	87,919	0,09	30	3,992	91,455	0,185	0,387	65,8	13,860
	24	4,300	14,610	3,744	87,066	0,18	66	3,891	90,477	0,189	0,400	62,2	13,342
13	0	4,550	16,105	4,123	90,614	0,09	27	4,104	90,198	0,134	0,188	65,1	14,900
	24	4,200	15,715	4,029	95,917	0,18	52	3,993	95,060	0,135	0,189	62,55	14,378
15	0	4,195	15,980	4,097	97,653	0,09	33	4,147	98,844	0,201	0,315	61,6	14,563
	24	3,940	15,005	3,850	97,725	0,15	71	3,889	98,706	0,196	0,307	64,45	13,791
16	0	4,370	16,105	4,126	94,412	0,07	28	4,102	93,856	0,178	0,165	61,55	14,698
	24	4,270	15,515	3,976	93,119	0,14	73	3,883	90,925	0,188	0,174	58	13,979
17	0	4,265	14,885	3,815	89,444	0,07	23	3,992	93,599	0,116	0,217	65,55	13,749
	24	4,200	14,197	3,639	86,652	0,18	53	3,970	94,524	0,117	0,225	63,05	12,980
19	0	4,870	17,250	4,411	90,567	0,27	42	4,326	88,819	0,098	0,065	68,1	16,170
	24	4,870	16,895	4,320	88,703	0,29	63	4,360	89,528	0,091	0,108	56,85	15,205
22	0	4,295	14,465	3,707	86,304	0,26	38	3,563	82,945	0,083	0,107	65,6	13,397
	24	4,140	13,620	3,492	84,355	0,41	89	3,387	81,812	0,088	0,115	67,15	12,667

Anexo 2. Formato de la hoja para recolección de datos para el DOE.

FORMATO DE HOJA PARA TOMA DE DATOS

HORA	MUESTRA	BRIX	POL	A.R.	DEX	HPLC	HDAD
0	1	4,58	14,87	0,29	35	3,991	64,9
	2	4,59	14,85	0,29	30	4,037	61,2
	PROMEDIO	4,59	14,86	0,29	32,50	4,014	63,05
24	1	4,12	14,25	0,39	48	3,948	62,5
	2	4,15	14,22	0,39	55	3,752	61,7
	PROMEDIO	4,14	14,24	0,39	51,50	3,850	62,1

status

ORDEN		70520339			
Sect-Suert	Finca	Edad hoy	Orden	Sección	Dist
			70520339		

	inicial	Vacio	final
Tamiz 1	439,3	339,3	374,4
Tamiz 2	428,6	328,6	367,4

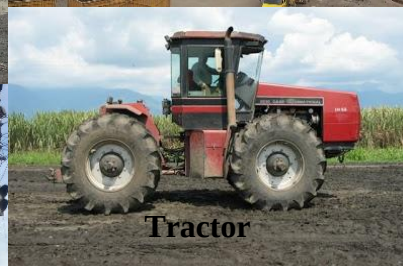
	inicial	Vacio	final
Tamiz 3	439,3	339,3	376,8
Tamiz 4	428,6	328,6	366,9

TABLA RESUMEN ENSAYO N°2											
Tiempo (hrs)	BRIX	POL	A.R.	DEX.	SAC.	SAC. HPLC	PZA HPLC%	PZA. %	HUM 105 °C	RED.	RED. HPLC
0	4,585	14,860	0,290	32,500	3,805	4,014	87,546	82,983	63,050	12,832	12,812
24	4,135	14,235	0,390	51,500	3,651	3,850	93,108	88,297	62,100	12,215	12,198
DIFERENCIA	0,450	0,625	-0,100	-19,000	0,154	0,164	-5,561	-5,314	0,950	0,617	0,614
	Disminuyo	Disminuyo	Aumento	Aumento	Disminuyo	Disminuyo	Aumento	Aumento	Disminuyo	Disminuyo	Disminuyo

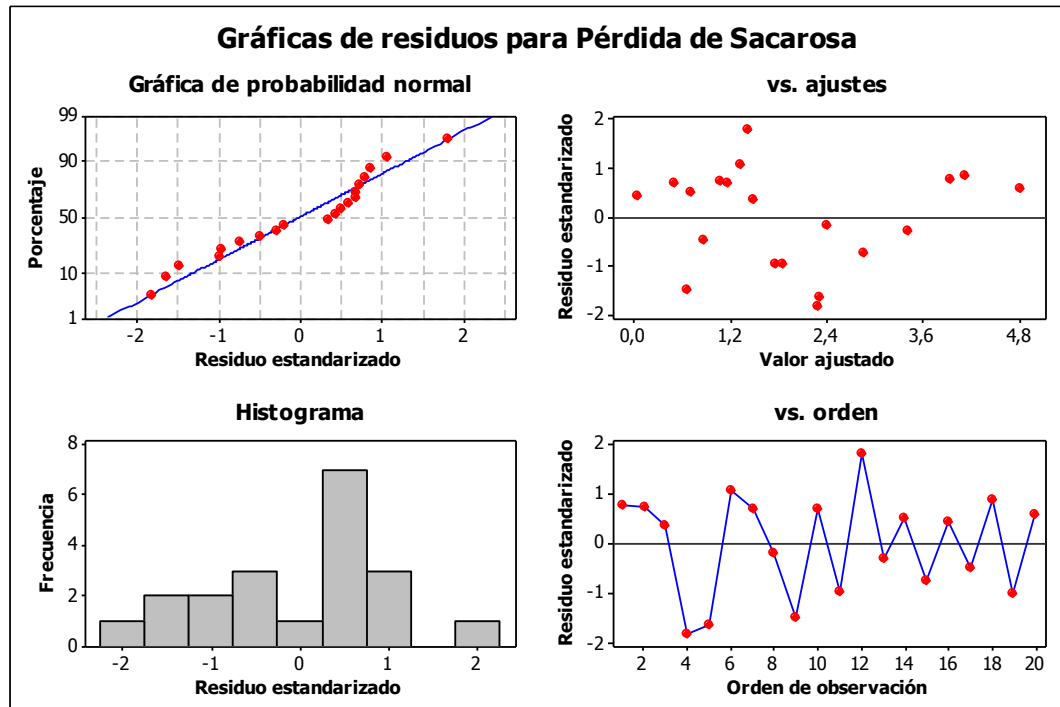
Anexo 3. Método determinación de Pol.

Desfibrar la muestra de caña de azúcar
Homogeniza la muestra, pesa 2.000 g $\pm$ 10 de caña desfibrada y trasladar a recipiente de la máquina Desintegradora.
Agregar 6 litros de agua en el recipiente del desintegrador.
Se tapa el recipiente del desintegrador, se comprueba que el sello de caucho se encuentre correctamente ajustado.
Enciende el desintegrador durante 30 minutos.
Ubicar una malla de filtración en un recipiente plástico limpio y seco. Se filtra aproximadamente 500 ml del extracto de jugo de caña
Cubre el vaso con una tapa y enfría el extracto a temperatura ambiente en un baño de agua.
Toma 200 ml del extracto filtrado y agrega agente clarificante de acuerdo con método establecido en el ingenio objeto de estudio.
Mezcla bien y deja en reposo por 2 minutos.
Filtra la muestra por gravedad en un vaso de 250 ml a través de papel filtro Whatman No. 91 o su equivalente.
La muestra filtrada se lleva a una temperatura de 20 grados Celsius
Se vierte la muestra en el polarímetro, se espera estabilice el equipo y se guarda el dato que se muestre en pantalla el equipo, este es la Pol o sacarosa aparente.

Anexo 4. Equipos utilizados en patio de fábrica.



Anexo 5. Prueba de Normalidad y Varianza.



Nota: Los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia se cumplen, para los residuos estandarizados es útil en la detección de valores atípicos. El residuo estandarizado es igual al valor de un residuo, e_i , dividido entre un estimado de su desviación estándar. Los residuos estandarizados mayores que 2 y menores que -2 son considerados grandes y el Software Minitab etiquetan estas observaciones con una 'R' en la tabla de observaciones inusuales y en la tabla de ajustes y residuos.

Anexo 6. PLAN DE ACCIÓN.

CAUSA		QUÉ?	CÓMO?	QUIÉN?
1	Estándares inadecuados e inexistentes	Revisión de las procedimientos claves en el proceso de almacenamiento de caña en patio de fábrica	Estandarizar los criterios para el almacenamiento de caña en equipos en patio de Fábrica	Jefe Molinos
2	Almacenamiento inadecuado	No almacenar caña en arrumes en patio de fábrica	Eliminar la practica de almacenar la caña en el suelo del patio de caña	Gerente de Fábrica
3	Baja disponibilidad de vagonería por mantenimiento y reparación	Tener vagones disponibles	Revisando la cantidad y disponibilidad de vagones y definiendo las necesidades	Supervisor de Cosecha
			Revisando y ajustando los planes de mantenimiento de los vagones actuales	supervisor de taller agrícola
4	Baja disponibilidad de equipos en patio (dolly's y tractores)	Tener equipos (dolly's y tractores) de patio disponibles	Revisando la cantidad y disponibilidad de equipos y definiendo las necesidades	Supervisor de Cosecha
			Revisando y ajustando los planes de mantenimiento de los equipos actuales	supervisor de taller agrícola
5	No hay un mecanismo que permita hacer seguimiento al tiempo de permanencia en CAT para la alimentación de caña	Establecer un mecanismo que permite el seguimiento del tiempo de permanencia en el patio de caña	Revisando la información que se tiene actualmente de la operación del patio y definiendo la adicional	Supervisor de Cosecha
			Diseñando un programa para registrar los movimientos en el patio	Supervisor de Cosecha
			Implementando el programa	Supervisor de Cosecha
6	No se comunican a la cosecha los problemas que disminuyan la molienda en la fábrica	Establecer una comunicación efectiva entre cosecha y fábrica	Revisando necesidades de medios de comunicación entre torre de control y fábrica	Supervisor de Cosecha
			Solicitando los medios de comunicación necesarios	Supervisor de Cosecha
			Estableciendo la reunión entre cosecha y fábrica en cada turno para informar condiciones y establecer acuerdos	Ingeniero Staff
7	Mantenimientos no efectivos de los vagones	Tener planes de mantenimiento efectivo para los vagones	Revisando los planes actuales de mantenimiento de vagones	supervisor de taller agrícola
			Mejorando los planes en aquellos aspectos que están causando baja confiabilidad de los vagones	supervisor de taller agrícola
8	Desconocimiento del impacto de almacenar la caña de azúcar en el patio de fábrica	Implementar plan de concientización al personal operativo involucrado	Campaña de reconocimientos de la labor donde ellos puedan evidenciar el comportamiento de la sacarosa en la caña durante las actividades que ellos desarrollan	Jefe Control Procesos, grupo staff,
9	Inadecuada metodología de medición de la pérdida de sacarosa por permanencia en patio y lavado	Mejorar el muestreo que realiza en patio de fábrica	Realizar una sesión de lluvia de ideas con el personal del laboratorio y grupo staff para proponer la mejora u contratar una persona que se encargue de realizar la investigación	Jefe Control Procesos, grupo staff
10	Falta de equipos (Vagones)	persuadir en la inversión en nuevos equipos	Junta con el personal encargado de las inversiones, exponiendo los ingresos que se pueden obtener al realizar las inversión y poder almacenar la caña solo en quipos y eliminar el arrume en piso de la misma.	Grupo staff

ANEXO 6. PLAN DE ACCIÓN (Continuación).

CAUSA	CUÁNDO (Fecha de terminación)						DONDE? (Sitio)	POR QUÉ? (Justificación)	CUÁNTO CUESTA? \$MM	IMPACTO
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar				
1	1						Patio de caña	Para garantizar el tiempo máximo de permanencia de la caña en patio		ALTO
2	12						Patio de caña	Para contribuir en la reducción de las pérdida de sacarosa actuales en un 50%		ALTO
3		9					Patio de caña	Para que la entrada de caña sea eficiente y en caso de tener que almacenar en patio se pueda hacer en vagones		MEDIO
		16					Taller agrícola			
4		16					Patio de caña	Para que la entrada de caña sea eficiente y no se almacene caña en el patio		MEDIO
		23					Taller agrícola			
5		30					Torre de control	Para poder medir el tiempo de la caña en el patio y asegurar la rotación de la caña		ALTO
			2				Torre de control		\$ 10,0	
			2				Torre de control		\$ 20,0	
6	19						Patio de caña	Para que se puedan tomar decisiones desde el corte y alce y no almacenar caña en patio		ALTO
			2				Oficina Cosecha		\$ 7,4	
	19						Sala de juntas fábrica			
7	26						Taller agrícola	Para que la entrada de caña sea eficiente y en caso de tener que almacenar en patio se pueda hacer en vagones		MEDIO
		2					Taller agrícola			
8				31			Preparación y molienda	Para que los operarios que tienen relación directa con el proceso de preparación y extracción tengan claro en cuanto impacta económicamente tener un incremento en las pérdidas y como ellos desde su operación pueden ayudar a controlarlo	\$ 0,5	ALTO
9			2				Patio de caña	Para obtener datos mas confiables y descartar de que se esta trabajando con cifras erróneas y así continuar con la mejora continua de proceso que se realiza en patio de caña	\$ 5,0	ALTO
10					28		Fábrica	Cumplir con las conclusiones y sugerencias obtenidas por el estudio realizado con el Diseño del experimento en patio de caña	\$ 1.800,0	ALTO

Anexo 7. Cronograma de los ensayos experimentales.

