

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i2.899>

## Mejora de ingresos en plantas azucareras y control estadístico de calidad: Caso ecuatoriano

*Improvement of Revenues in Sugar Mills and Statistical Quality Control: Ecuadorian Case*

**Widmar Santiago Villarreal Revelo**

[widsanv@yahoo.com](mailto:widsanv@yahoo.com)

[widmar.villarreal@upec.edu.ec](mailto:widmar.villarreal@upec.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-2503-4034>

Universidad Politécnica Estatal del Carchi  
Tulcán - Ecuador

**Luis Homero Viveros Almeida**

[luis.viveros@upec.edu.ec](mailto:luis.viveros@upec.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-3612-1798>

Universidad Politécnica Estatal del Carchi  
Tulcán – Ecuador

*Artículo recibido: 10 marzo 2025*

*- Aceptado para publicación: 20 abril 2025*

*Conflictos de intereses: Ninguno que declarar*

### RESUMEN

El estudio actual evalúa el proceso de clarificación de jugos en la industria azucarera como una medida clave para mejorar la producción y calidad del azúcar refinado, las pérdidas de sacarosa resultantes de la conversión en azúcares reductores, afectan la rentabilidad de los ingenios azucareros. El objetivo principal radica en identificar las condiciones óptimas de operación para disminuir la presencia de azúcares reductores y elevar la pureza del jugo clarificado mediante el uso de herramientas estadísticas. La metodología utilizada implicó la recolección de muestras de jugos sulfitados, encalados y claros en una planta azucarera en Ecuador, para lo cual, se emplearon pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk), análisis de varianza (ANOVA), y regresión lineal para establecer la conexión entre variables independientes como pH y temperatura respecto a la calidad del jugo y el contenido de azúcares reductores. Los resultados sugieren que el nivel de acidez en el jugo sulfitado influye de manera significativa en la calidad del jugo clarificado, mientras que la temperatura tiene una relación relevante en la cantidad de azúcares reductores presentes. Concluyendo que, al ajustar estos factores, se pueden minimizar las pérdidas de sacarosa durante el proceso; así mismo, se determinó que el control estadístico de procesos es una herramienta efectiva para mejorar la eficacia del proceso de clarificación, mientras que, los ajustes en el pH y temperatura podrían aumentar la recuperación de sacarosa y resultar en un beneficio económico estimado de 272 354 USD al año; esto resalta la importancia de seguir investigando en este campo.

*Palabras clave:* control estadístico, clarificación, jugos, azúcares reductores, ingenio azucarero

## ABSTRACT

The current study evaluates the juice clarification process in the sugar industry as a key measure to improve the production and quality of refined sugar. The loss of sucrose due to its conversion into reducing sugars affects the profitability of sugar mills. The main objective is to identify the optimal operating conditions to reduce the presence of reducing sugars and enhance the purity of clarified juice using statistical tools. The methodology involved collecting samples of sulfited, limed, and clarified juices from a sugar plant in Ecuador. Normality tests (Shapiro-Wilk), analysis of variance (ANOVA), and linear regression were applied to establish the relationship between independent variables such as pH and temperature concerning juice quality and the content of reducing sugars. The results suggest that the acidity level in sulfited juice significantly influences the quality of clarified juice, while temperature has a relevant relationship with the amount of reducing sugars present. It is concluded that adjusting these factors can minimize sucrose losses during the process. Additionally, process statistical control was determined to be an effective tool for improving the efficiency of the clarification process, while adjustments in pH and temperature could increase sucrose recovery, resulting in an estimated economic benefit of 272,354 USD per year; this highlights the importance of continued research in this field.

*Keywords:* statistical control, clarification, juices, reducing sugars, ingenio azucarero

## INTRODUCCIÓN

La producción y procesamiento de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) tiene importancia tanto por su contribución económica, como también por su papel en la producción de alimentos, energía renovable y desarrollo sostenible en diversas regiones del mundo (Zaidan et al., 2021). En Ecuador, la caña de azúcar es uno de los productos agrícolas más relevantes del país, es fuente significativa de ingresos para los agricultores, zafreiros, transportistas y agroindustriales que son parte de la cadena de este producto y contribuye significativamente a la generación de empleos, lo que impulsa el crecimiento económico de las regiones (Chávez Cruz et al., 2022). Actualmente, el 70% del azúcar producido en los países en desarrollo proviene de la caña de azúcar, para lo cual se debe procesar la caña de azúcar a partir de varias operaciones unitarias que incluyen la extracción de jugo, clarificación, concentración, cristalización del azúcar del jarabe, separación y secado del cristal (Babu & Adeyeye, 2024). Este artículo busca abordar la interrogante sobre cómo el uso de herramientas estadísticas puede determinar condiciones óptimas en el proceso de clarificación de un ingenio azucarero y reducir los azúcares reductores y otros elementos no solubles en los jugos, además de estimar la mejora en los ingresos para la empresa, por aumento de producto final obtenido. Se espera que este análisis contribuya a optimizar los procesos en la industria azucarera y a incrementar su competitividad en el mercado.

### Revisión de literatura

En la industria del azúcar existen desafíos importantes relacionados a la pérdida de sacarosa y la formación de color debido a la degradación de la sacarosa y otros azúcares como la glucosa y fructosa. Para mitigar estas pérdidas y problemas asociados, es común aplicar un pretratamiento para estabilizar la sacarosa a un pH de 8 y el resto de los azúcares a un pH entre 3 y 5. Por lo que, para obtener la menor degradación de sacarosa se debe obtener un valor entre 6,45 y 8, lo que resalta la importancia de considerarlo al momento del procesamiento para obtener resultados óptimos. La prioridad de la industria es mantener el equilibrio del pH para minimizar las pérdidas y optimizar la calidad del azúcar (Akhtar et al., 2020).

La clarificación consiste en la eliminación de impurezas y sólidos en suspensión presentes en el jugo extraído, lo cual no solo mejora el rendimiento del proceso de cristalización posterior, sino que también impacta la pureza del azúcar producido (Laksameethanasana et al., 2012). Este proceso implica la eliminación de impurezas y la reducción de la concentración de azúcares reductores, que, si no se controlan adecuadamente, pueden resultar en una significativa pérdida de sacarosa (Cywinska et al., 2023), afectando tanto la calidad como el rendimiento del producto (Du et al., 2022). Estas pérdidas, en términos generales, se cuantifican al comparar la cantidad de sacarosa al final del proceso (azúcar) con la cantidad que ingresó desde la caña (Beeram et al., 2020).

Las pérdidas de sacarosa están influenciadas por diversos factores, entre ellos las prácticas de campo y cosecha, estado de madurez, calentamiento, subida y bajada de pH (potencial hidrógeno), uso de insumos como lechada de cal, sacarato, floculantes, y el tiempo de residencia en equipos de transferencia de calor, entre otros (Shi et al., 2021). Los azúcares reductores son carbohidratos capaces de reaccionar con agentes oxidantes, característica fundamental para poder ser identificados y valorados a nivel de laboratorio (García Asprilla & Ramírez-Navas, 2018). Los azúcares reductores incluyen a la glucosa, fructosa, galactosa y la lactosa, siendo las dos primeras presentes en el jugo de caña de azúcar (Marasinghe et al., 2024).

En este contexto, la reducción de azúcares reductores en el jugo es de particular interés, dado que estos compuestos pueden interferir en la eficacia del proceso de refinación y afectar las propiedades organolépticas del azúcar (Meng et al., 2021). Estudios realizados en Brasil y México indican que la optimización de parámetros de proceso puede resultar en una reducción significativa de azúcares reductores (Vargas Díaz et al., 2023). Sin embargo, es escasa la investigación que aborde de manera integrada la interacción de estos factores utilizando control estadístico.

Por estas razones, en la industria azucarera es fundamental establecer controles rigurosos que optimicen los procesos, no solo para asegurar la excelencia del producto, sino también para aumentar la sostenibilidad financiera y la competitividad en el mercado. El control estadístico del proceso (CEP) es una herramienta poderosa para optimizar distintas etapas de producción en la industria, permitiendo identificar y ajustar factores que influyen en la eficiencia del mismo (Gessa et al., 2022). A través del uso de técnicas como el CEP y el Análisis de varianza (ANOVA), el monitoreo continuo y la evaluación de parámetros críticos generan información valiosa para la toma de decisiones (Alim & Kesen, 2023).

Con base en esta información, se han propuesto las siguientes preguntas:

RQ1:¿Cuáles son los factores de proceso que afectan la clarificación del jugo, que influyen en la eficacia de la clarificación del jugo?

RQ2:¿Qué relación existe entre los ajustes en el proceso de clarificación y la reducción de azúcares reductores en el jugo?

RQ3:¿Cómo optimizar el procedimiento de control de calidad para las operaciones de clarificación de jugo del Ingenio Azucarero del Norte?

## METODOLOGÍA

### Materiales

La toma de muestras se realizó en su totalidad del proceso industrial del Ingenio Azucarero, dentro del proceso de elaboración del ingenio se realiza control de calidad de cada proceso y de las actividades que la componen, se obtuvieron muestras de jugo sulfitado, jugo encalado y jugo claro, de la línea de proceso industrial de caña de azúcar.

Los análisis se efectuaron en el laboratorio de control de calidad de la fábrica. El jugo encalado era el jugo mixto cuyo pH se ajusta a neutro mediante lechada de cal. En el ingenio y en este proceso no se utilizan otros productos químicos, solución indicadora de azul de metileno (C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) se obtuvieron de proveedor Chemicals Co. El sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O); grado analítico y la sal de Rochelle, tartato sódico potásico (K<sub>2</sub>C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub> · 2H<sub>2</sub>O); grado analítico se adquirieron a Ajax Chemical Co. La toma de temperatura se realiza en el jugo posterior al encalado, presente en el tanque flash y previo al ingreso al clarificador, en esta etapa se considera al jugo como encalado.

### Equipos

Los equipos que se utilizó en la determinación de las variables se detallan a continuación:

**Tabla 1**  
*Cuadro de operacionalización de variables*

Variable	Dimensiones	Indicador	Instrumentos
pH de Jugos (Variable independiente)	pH jugo sulfitado.	La escala de pH oscila entre 0 y 14, donde valores inferiores a 7 señalan una solución ácida, un pH de 7 representa neutralidad y valores superiores a 7 indican que la solución es básica o alcalin (Shaw & Gregory, 2022)	pH-metro manual o digital.
	pH jugo encalado.		
	pH jugo claro		
Temperatura (Variable independiente)	Temperatura jugo encalado.	Grados centígrados (°C) o grados Fahrenheit (°F).	Termómetros de mercurio o digitales, termistores.
	Temperatura jugo claro.		
Azúcares Reductores	Cantidad de azúcares reductores	g/L	Turbidímetro, comparadores de color
Color del jugo	Cantidad de partículas suspendidas en el jugo claro	Unidad de Color (unidades de NTU (Nephelometric Turbidity Units))	Turbidímetro, comparadores de color

### Métodos

En la toma de datos se utilizó la metodología de series temporales interrumpidas (DSTA), práctica estadística manejada para evaluar el efecto de una intervención o un cambio en el proceso de un sistema, se basa en la medición repetida de variables dentro del proceso productivo.

Las muestras se tomaron distintos períodos de tiempo de operación considerando para ello una molienda continua de por lo menos 8 horas sin para, la data general histórica se tomó en un periodo de dos semanas, para determinar una posible relación entre los Azúcares Reductores “AR” con los grados Brix, pH de los jugos, temperatura de ingreso al clarificador y el porcentaje de Sacarosa de la mezcla alimentada. Los análisis de jugos se realizaron siguiendo la metodología detallada en el manual de procesos del laboratorio de calidad del ingenio azucarero.

### **Evaluación de calidad**

Tras los análisis, las muestras de jugo se caracterizaron en función de su Brix, % AR (azúcar reductor) y t (temperatura). En todos los casos se tomó los datos de los análisis de control de calidad de los laboratorios del ingenio.

### **Análisis estadístico**

- **Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk):** Evalúa si los datos siguen una distribución normal, clave en análisis como ANOVA o regresión. Se recomienda para muestras menores a 50 observaciones (Monter-Pozos & González-Estrada, 2024).
- **Prueba de Homogeneidad de Varianzas (Levene):** Determina si las varianzas de los grupos son iguales, siendo robusta ante desviaciones de la normalidad, lo que la hace adecuada para análisis como ANOVA (Villaseñor & González-Estrada, 2025).
- **Análisis de Varianza (ANOVA):** Técnica que compara las medias de tres o más grupos para identificar diferencias significativas, útil en estudios experimentales (Hobbs et al., 2024).
- **Modelo de Regresión Lineal:** Establece una conexión entre una variable que dependiente y una o más variables independientes a través de una ecuación lineal para así poder predecir valores en el futuro (Marino, 2024).

### **Herramientas estadísticas**

Se entiende por herramientas estadísticas al conjunto de técnicas que ayudan en la organización de datos numéricos o de información, previamente obtenida, detección de problemas a ser analizados y en lo posible resolverlos, para optimizar el proceso de toma de decisiones (Sarker, 2021). Durante el procedimiento de clarificación, se emplearon diferentes herramientas estadísticas para reducir las pérdidas de sacarosa, entre las cuales se incluía el uso de un histograma, las gráficas de control, el diagrama de Pareto, alineadas a la metodología Six Sigma.

### **Plan de acción**

El plan de acción es un medio que permite a los equipos operativos, monitorear el progreso de un proceso y centrarse en llevar a cabo las actividades necesarias. Se recomienda seguir el plan de acción de manera regular regularmente, ya sea semanal, mensual, trimestral o semestralmente dependiendo de la situación, y trabajar en ello diligentemente hasta que se complete o se resuelva el proyecto o tema en cuestión (Boggan & Ver, 1995). Por lo tanto, resulta necesario para un equipo, determinar si el plan está alcanzando los objetivos esperados o

generando efectos secundarios no deseados, por lo que, el análisis del rendimiento de la solución propuesta es fundamental en cualquier estrategia empresarial exitosa.

Para la obtención de datos se realizó bajo los siguientes criterios:

- a. La frecuencia a la que se obtienen las muestras para la creación de histogramas y gráficos de control.
- b. Se sugiere utilizar entre el 10% y el 20% de la población total de datos al elaborar histogramas.
- c. El mínimo aconsejable es que cada muestra contenga al menos cinco datos para poder elaborar las gráficas de control de tipo x-r.

Bajo estas consideraciones, se consideraron los siguientes datos para cada una de los factores en análisis.

- d. Para el análisis estadístico, ANOVA, diseños factoriales, histogramas y cuadros de control, se recopilaron muestras con una frecuencia de muestreo, que corresponde a una vez cada hora durante dos períodos de 28 días de molienda, con moliendas constantes, debido al presencia de interrupciones en el procedimiento, no se podía llevar cabo la recolección de muestras. No obstante, a partir del muestreo realizado, se obtuvo 12 muestras diarias, lo que correspondió a una total de 336 muestras al mes.
- e. Con esta data se realiza un promedio cada 8 horas que se considera tiempo de trabajo por turno, el ingenio maneja periodos de molienda de 14 días de molienda, con ello se obtienen un total de 48 muestras que se muestran en la **Tabla 2**.

**Tabla 2**

*Data resumen para los análisis de azúcar reductores y porcentaje de pureza jugo claro*

<b>Azúcares Reductores</b>									
0,48	0,45	0,47	0,45	0,40	0,41	0,33	0,34	0,38	0,34
0,45	0,45	0,46	0,46	0,44	0,48	0,46	0,52	0,53	0,42
0,52	0,56	0,39	0,44	0,58	0,53	0,48	0,46	0,46	0,47
0,57	0,50	0,52	0,51	0,56	0,56	0,55	0,52	0,62	0,55
0,46	0,47	0,45	0,47	0,49	0,51	0,50	0,56		
<b>Porcentaje de pureza jugo clarificado</b>									
86,84	85,15	84,92	85,61	86,71	87,50	86,65	85,41	86,17	85,58
85,38	85,16	85,76	87,37	85,00	87,90	86,44	85,35	85,38	85,59
84,46	84,99	84,76	83,03	83,32	83,15	84,36	84,65	86,08	85,12
85,50	87,24	83,63	84,41	84,64	82,40	84,14	84,00	81,57	87,06
86,83	84,77	84,16	86,32	83,45	83,41	85,03	83,37		

Fuente: Laboratorio de control de calidad Ingenio Azucarero

## RESULTADOS

### Verificación estadística del proceso

Para evaluar la pérdida efectiva de sacarosa e incremento de azúcares reductores de los jugos en el proceso de clarificación del ingenio, se aplicó estadística descriptiva: medias, error estándar, desviación estándar, y coeficiente de variación, esto permitió tener una visión clara de la variabilidad y precisión de los datos. Se utilizaron pruebas de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk y se verificó la homogeneidad con el test de Levene, posterior se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para comparar las medias de las variables en estudio, concluyendo con el análisis de la relación entre factores, para ello se utilizó un análisis de regresión lineal.

### Análisis de normalidad

El análisis de Shapiro-Wilk, muestra los resultados del test de normalidad para la variable "AZUCARES REDUCTORES" revelan un valor W de 0,9726 y un p-valor de 0,3188. Como el p-valor es superior al umbral convencional de significancia de 0,05, no se rechaza la hipótesis nula de normalidad, lo que sugiere que los datos de esta variable presentan una distribución normal.

Por otro lado, el análisis realizado para la variable "PUREZA CLARIFICADO" presenta un valor W de 0,9875 y un p-valor de 0,8847. De manera similar, este p-valor elevado indica que no se puede rechazar la hipótesis nula, sugiriendo que la distribución de los datos en esta variable también tiende a ser normal.

### Prueba de homogeneidad de varianzas

El análisis de homogeneidad de varianzas mostró que los datos de las variables fueron homogéneos, donde el p-valor fue superior a 0,05 y se acepta la hipótesis Nula ( $H_0$ ) lo que confirma que hay igualdad de varianza.

### Análisis de varianza para la variable azúcares reductores

Se realizó un análisis de varianza ANOVA que permite determinar que existen diferencias significativas entre los valores de la variable dependiente: Azúcares Reductores (AR) y Porcentaje de Pureza en el jugo claro en función de las variables independientes (pH JS, pH JE, pH JC, y TEMPFLASH); se obtiene los siguientes resultados:

- Los valores de p para los diferentes niveles de pH son 0,5605, 0,4692 y 0,8058, respectivamente, lo que indica que el pH no tiene un efecto significativo en la concentración de azúcares en el jugo clarificado. Esto puede ser consistente con estudios previos que sugieren que el pH óptimo para la clarificación de jugos azucareros no necesariamente afecta la cantidad de azúcares, sino que influye más en la calidad del producto final y en la eficiencia de otros procesos como la sedimentación y la estabilización.

- **TEMPFLASH:** El valor de p para la temperatura de flash es 0,0812, que se encuentra cerca del límite de significancia (0.05). Esto puede indicar una tendencia que sugiere que la temperatura de flash podría tener un efecto marginal sobre la concentración de azúcares, aunque no suficiente para considerarlo significativo en este análisis.

#### **Análisis de regresión lineal para la variable azúcares reductores**

Se realizó un modelo de regresión lineal con interacciones para analizar el impacto individual y las combinaciones de factores en el aumento de azúcares reductores. Este enfoque ayuda a identificar efectos no evidentes y determinar relaciones entre las variables independientes y una de las variables dependientes, obteniendo que la mayoría de los factores analizados (pH JS, pH JE y pH JC) no muestran un efecto significativo sobre la variable dependiente Azúcares reductores. La TEMPFLASH es el único factor que presenta un valor p marginal (0,0812), lo que sugiere que podría haber un efecto en el incremento de los azúcares reductores.

#### **Análisis de varianza para la variable porcentaje de pureza en jugo claro**

Los resultados muestran que, la variable pH JS presenta un valor de p significativo ( $p = 0,0432$ ), lo que indica que hay una relación significativa entre el pH JS y el porcentaje de pureza del jugo clarificado al final del proceso. Esto sugiere que el control del pH en esta etapa del proceso es crucial para optimizar la pureza del jugo. En el análisis los valores de p para las variables pH JE, pH JC y TEMPFLASH son 0,6489, 0,3663 y 0,1997, respectivamente, lo que indica que estas variables no tienen efecto significativo en el porcentaje de pureza en el jugo clarificado, al menos en las condiciones del proceso en el ingenio investigado.

#### **Regresión lineal con interacciones para estudiar el efecto individual y las combinaciones de distintos factores en el porcentaje de pureza**

Continuando con el análisis, se llevó a cabo un modelo de regresión lineal con interacciones para estudiar el efecto individual y las combinaciones de distintos factores en el porcentaje de pureza. Este método facilita la identificación de efectos que no son evidentes y permite establecer relaciones entre las variables independientes y una de las variables dependientes, obteniendo, que la mayoría de los factores analizados (pH JE, pH JC y TEMPFLASH) no muestran un efecto significativo sobre la variable dependiente porcentaje de pureza.

El pH JS es el único factor que presenta un valor p marginal (0,023), lo que sugiere que esta variable tiene un efecto negativo sobre el porcentaje de pureza del jugo, tiene un coeficiente negativo lo que indica que, si el pH JS aumenta en una unidad, se espera que la PUREZA disminuya aproximadamente en 2,12 unidades. Para mejorar la pureza del jugo clarificado, se debe enfocar los esfuerzos en controlar de manera precisa el pH JS. Además, debe evaluarse la posibilidad de ajustar el proceso tomando en cuenta las interacciones entre el pH en diferentes etapas y la temperatura.

Como resultado del análisis estadístico se observa que, en las actuales condiciones operativas del proceso de clarificación, los factores que están teniendo influencia es el pH del

jugo sulfitado y la temperatura de calentamiento con la que ingresa el jugo al clarificador desde el tanque de acondicionamiento de temperatura llamado “Tanque flash”.

### Control de proceso

Después de definir las especificaciones para recopilar datos, que correspondió a la cantidad de datos necesarios, tamaño de la muestra y frecuencia de muestreo y haberlas utilizado para recopilar los datos de las variables en estudio, se verificó si el proceso estaba estable mediante el uso de herramientas estadísticas como el análisis de normalidad, histogramas y gráficos de control (Isniah & Purba, 2021). Para crear los histogramas de las variables analizadas (porcentaje de sacarosa y azúcares reductores en jugo claro), se ingresaron los datos correspondientes en el software “R”. Las gráficas de los histogramas se muestran en las Figura 1, y su interpretación se detalla en la Tabla 3:

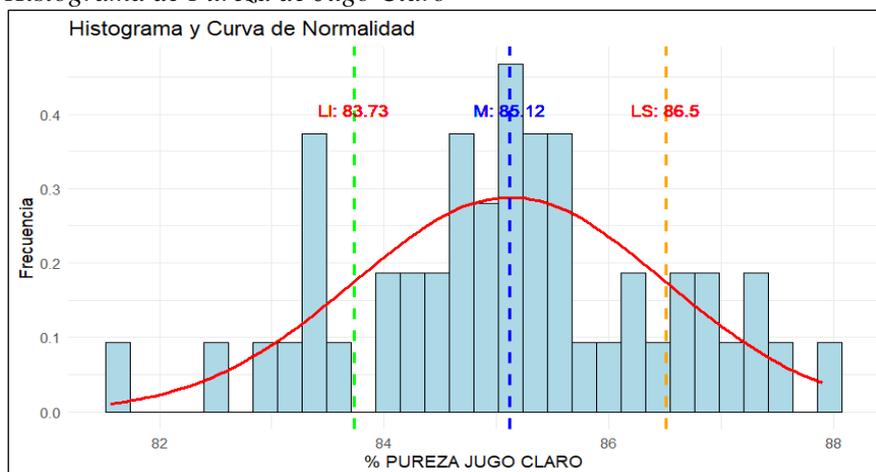
**Tabla 3**

*Límites y media de especificación de las variables en estudio, para la elaboración de histogramas*

Azúcares reductores		Porcentaje de Pureza en Jugo claro	
Número de datos	48	Número de datos	48
Límite superior calculado	0,54	Límite superior calculado	86,52
Límite inferior calculado	0,41	Límite inferior calculado	83,72
Media calculada	0,48	Media calculada	85,12

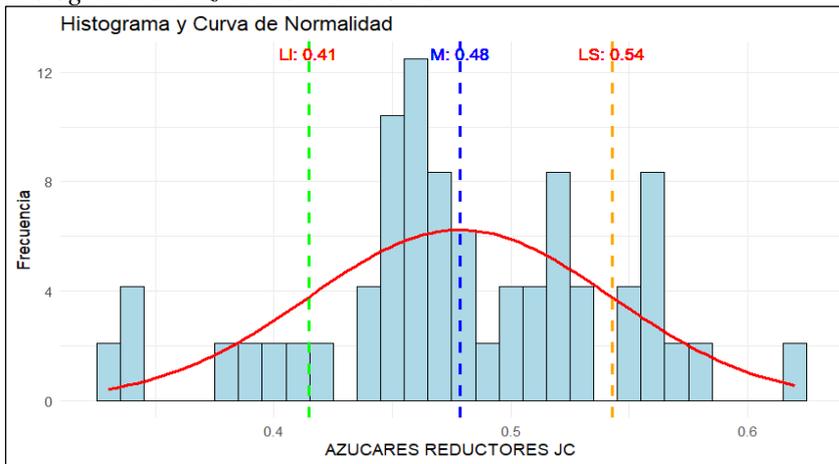
**Figura 1**

*Histograma de Pureza de Jugo Claro*



Los histogramas muestran que tanto el nivel de pureza en el jugo claro como el contenido de azúcares reductores presentan una distribución normal, lo que facilita la aplicación del control estadístico de procesos (CEP). La correcta adaptación a la curva normal señala que el proceso es estable y que los valores se encuentran dentro de los límites de control establecidos. Es recomendable mantener un seguimiento de las variaciones que sobrepasan estos límites para asegurar la consistencia y calidad del producto final.

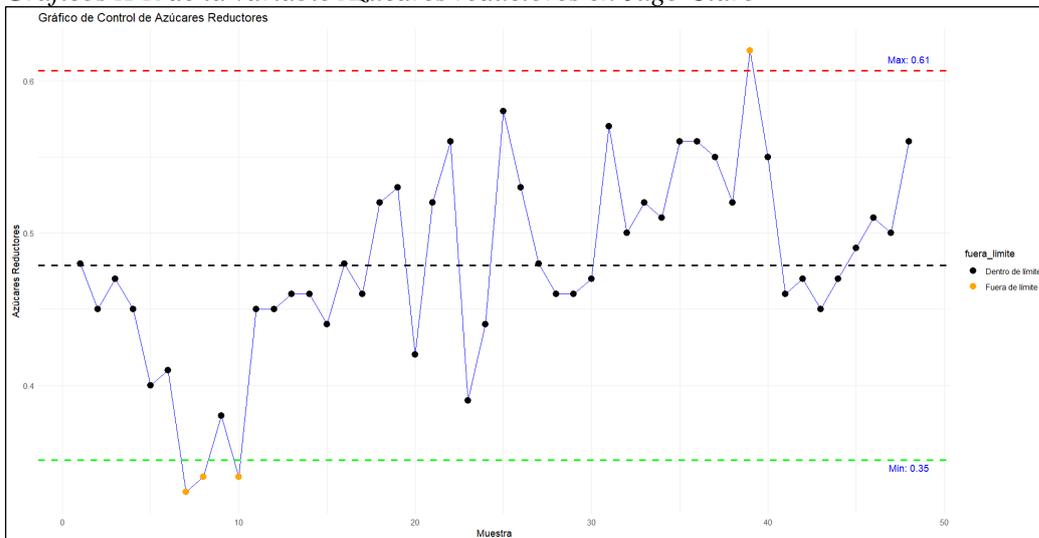
**Figura 2**  
**Histograma de Azúcares Reductores**



Los datos de los histogramas muestran que tanto el Porcentaje de Pureza en Jugo Claro como el Contenido de Azúcares Reductores mantienen un proceso estable y no presentan valores atípicos fuera de los límites de control establecidos. El gráfico de rangos confirma la estabilidad del proceso; no obstante, se aconseja mejorar el control estadístico antes de proceder a realizar posibles mejoras. Adicionalmente se ha observado que el contenido de azúcares reductores se mantiene dentro de los niveles permitidos para evitar posibles pérdidas sustanciales en sacarosa.

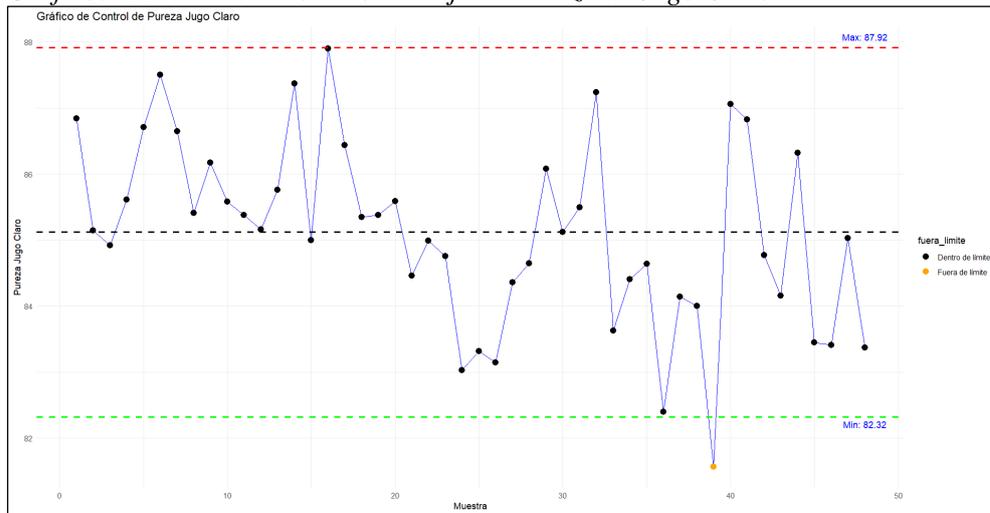
Se emplearon los datos de la Tabla 3 en el programa R para crear gráficos de control de medias y rangos de Azúcares Reductores (AR) y Porcentaje de Pureza en Jugo Claro. El análisis realizado en la Figura 3 y 4 y Tabla 4, evalúa la estabilidad del procedimiento mediante criterios como valores fuera de los límites establecidos por controladores, cumplimiento de las líneas maestras, secuencias, patrones y corridas; esto permite detectar variaciones y perfeccionar el proceso de clarificación.

**Figura 3**  
**Gráficos X-R de la variable Azúcares reductores en Jugo Claro**



**Figura 4**

*Gráficos X-R de la variable Porcentaje de Pureza de Jugo Claro*



El proceso se mantiene dentro de los límites establecidos de control de clarificación. Para afirmar lo antes mencionado es necesario realizar un análisis más preciso del proceso para ello se realiza el análisis de patrones que podrían estar afectando al proceso.

**Tabla 4**

*Descripción de patrones*

Variable	Patrones				
	Puntos fuera de los límites	Adhesión a líneas de control	Series	Tendencias	Corridas
Azúcares reductores	Si	No	No	No	No
% Pureza JC	Si	No	No	No	No

El análisis indica que el proceso de clarificación está bajo control, aunque se observan tendencias no constantes que podrían atribuirse a fluctuaciones en el flujo del líquido, lo que podría introducir interferencias en investigaciones futuras. Estudios en la industria azucarera subrayan la importancia del Control Estadístico de Procesos (CEP) y la supervisión continua a través de gráficos de control para optimizar la estabilidad y la calidad del proceso.

Se reconocen factores que pueden influir en la gestión del proceso en la planta de producción, como son alteraciones que salgan de los límites establecidos de control (modificaciones en el personal, equipos o métodos), cumplimiento de los límites de control establecidos (desgaste de equipos y acumulación de residuos), patrones y tendencias identificables a lo largo del tiempo (sucesivos cambios en el entorno o ajustes innecesarios), y corrida (o fallos en los procesos de control o manipulación intencionada de resultados). Además de esto se observó que la reducción de los azúcares reductores afectaba la recuperación de

sacarosa resultando en una pérdida estimada del 0,314 % (equivalente a 0,36 kg/t de jugo), lo cual impactaba negativamente en la eficacia del proceso de clarificación.

**Tabla 5**

*Análisis de pérdida en recuperación por efecto de la destrucción de azúcares reductores*

Proceso	Pureza Objetivo	Pureza Recuperación	Diferencia Pureza	Diferencia Recuperación (kg/día)	Diferencia Azúcares Reductores
Jugo Mixto	85,94	84,61	98,46	1061,16	0,89
Jugo Claro	85,12	84,46	99,23	-	-

Es evidente que hay una pérdida de sacarosa por conversión en azúcares reductores durante el proceso de clarificación, ya que se dan condiciones para ello. Sin embargo, es importante considerar que a menor variación del pH en el jugo sulfitado y a menor temperatura al entrar al clarificador, se reducirá la pérdida de sacarosa atribuida a la inversión y a la descomposición térmica. La tabla 6 presenta las toneladas de azúcar que se pueden recuperar al reducir la conversión de sacarosa, alcanzando un total de 324 toneladas. Esto resulta en un aumento de ingresos para el ingenio de 272.354,15 USD anuales.

**Tabla 6**

*Recuperación de sacarosa e incremento de ingresos*

Descripción	Toneladas Producidas	Costo kg	USD/Año
Producción sin intervención	38.387,36	0,613	32.302.967,53
Incremento	0.84%	0,608	272.354,15
Producción con intervención	38.711,02		32.575.321,68
Azúcar Blanca	36.791,75		263.383,63
Azúcar Morena	1.919,27		8.970,53

## DISCUSIÓN

Durante la evaluación del proceso de clarificación de jugos, se determinó la pérdida efectiva de sacarosa y el aumento de azúcares reductores mediante el análisis estadístico descriptivo y pruebas de normalidad, destacando que, los resultados señalan que los datos sobre azúcares reductores y porcentaje de pureza siguen una distribución normal, lo que posibilitó la aplicación de pruebas inferenciales para analizar la importancia de las variables en estudio. Así mismo, el análisis ANOVA demostró que el pH del jugo sulfitado (JS pH) y la temperatura de calentamiento (TEMPFLASH), junto a otros factores, tuvo un gran impacto en la calidad del jugo clarificado y la variación de los azúcares reductores.

El comportamiento de estas variables en este estudio coincide con lo que (Laksameethanasana et al., 2012) concluyeron sobre que altas temperaturas (80°C) ayudaban a eliminar la turbidez y el color del jugo de caña; sin embargo, una exposición prolongada podría

resultar en la formación de compuestos coloreados y la degradación de azúcares reductores. En contraste a lo anteriormente mencionado en este estudio, los resultados de la regresión lineal mostraron que la temperatura parece tener una influencia mínima en la cantidad de azúcares reductores (valor de  $p = 0,0812$ ), lo cual destaca que su efectividad es menor en comparación al pH presente en el jugo sulfatado.

Sin embargo, investigaciones recientes indican que este efecto no siempre es lineal y que el pH podría interactuar junto a otros factores como la temperatura y el tiempo de clarificación (Saitoh et al., 2014). Por otra parte, se ha señalado en investigaciones previas que elementos como la variedad de la caña de azúcar, las prácticas de manejo agronómico y las condiciones del entorno pueden tener un impacto aún mayor en los niveles de azúcares presentes en el jugo (Vargas Díaz et al., 2023). Específicamente (Lamanna et al., 2009) determinaron que la modificación del nivel de pH durante la fase de clarificación tiene un efecto directo en la calidad del azúcar clarificado y aumenta considerablemente su grado de pureza.

El análisis de varianza reveló que el nivel de acidez del jugo Sulfitado (JS) tiene un impacto significativo en la calidad del jugo clarificado. Con un valor de  $p$  de 0,0432, lo que indica que controlar este factor de manera precisa resulta esencial para mejorar el rendimiento del proceso. No obstante, el nivel de acidez en las etapas posteriores (jugo encalado y jugo clarificado) no presentó una correlación relevante con la calidad final del jugo clarificado. En lo que respecta a la temperatura del tanque flash se encontró una relación no significativa ( $p = 0,0812$ ) con la concentración de azúcares reductores, lo cual sugiere que un cambio en este parámetro podría afectar la estabilidad del proceso de clarificación.

Estos resultados concuerdan con estudios previos que resaltan la importancia del pH y la temperatura en el proceso de clarificación de los jugos azucarados. (Avalos & Ponte, 2019) indicaron que el pH puede influir en la clarificación de forma moderada; mientras que (Prati & Moretti, 2010) identificaron que la temperatura juega un papel relevante en la disolución de los azúcares. Según la investigación realizada por (Marasinghe et al., 2024) destaca que diversos aspectos afectan la calidad del jugo clarificado; en particular el tiempo de clarificación y la utilización de agentes clarificantes.

Investigaciones anteriores han resaltado la relevancia de mantener un pH óptimo para evitar cambios significativos en la clarificación de los jugos, según un estudio realizado por (Zaidan et al., 2021) estableció que el proceso de clarificación mediante sulfitación demanda una cuidadosa regulación del pH para reducir al mínimo la creación de compuestos indeseados y conservar la calidad del producto final. Destacando que, los resultados del presente estudio, muestran que el nivel de pH en el jugo es el factor de mayor influencia en la calidad del producto clarificado.

Los hallazgos de (Sewwandi et al., 2021) fueron consistentes en su estudio sobre la clarificación del jugo de caña a través de diferentes niveles de pH; determinaron que valores por

encima de 7,5 favorecerían la eliminación de impurezas, pero podrían comprometer la estabilidad del proceso.

Los datos de las variables estudiadas indicaron que la proporción de pureza y azúcares reducidos sigue una distribución normal, lo que facilita la implementación del CEP, obteniendo que los valores están dentro de los límites de control establecidos; sin embargo, se sugiere vigilar cualquier variación fuera de estos límites para prevenir pérdidas en la producción de sacarosa. Investigaciones previas como las de (Laksameethanasana et al., 2012) han subrayado la relevancia del CEP en la clarificación del jugo de caña; subrayando que la utilización de gráficos de control tipo barra-X posibilita la pronta detección de desviaciones en el proceso y el incrementar la eficacia operativa. En la presente investigación se observó que a pesar de la estabilidad del procedimiento existían cambios que podrían ser resultado de variaciones en el rendimiento del equipo o en la eficacia del proceso de separación de impurezas.

Así mismo, (Chiaramonte de Castro & Bernardo, 2019) investigaron el uso de gráficos de control en la clarificación de jugos, destacando que los gráficos X-barra permiten identificar rápidamente variaciones inusuales, lo que ayuda a lograr un proceso más eficiente y controlado. Mientras que, (Paixão et al., 2020) mostraron que los gráficos de control, al ser utilizados correctamente, no solo detectan problemas, sino que también ayudan a prevenir defectos y a optimizar parámetros operacionales como el pH y la temperatura en la clarificación.

También en el estudio de (González Campos, 2023), se determinó que los análisis estadísticos revelaron patrones de comportamiento y tendencias que antes no eran evidentes. Con base en estas conclusiones, se propusieron modificaciones específicas en los procesos para optimizar la eficiencia, reducir costos y mejorar la calidad del servicio.

## CONCLUSIONES

La producción de caña de azúcar en Ecuador es fundamental no solo para la economía de los factores del proceso que influyen en la clarificación del jugo y en su eficacia fueron analizados mediante herramientas estadísticas y pruebas experimentales. Se identificó que la sulfitación del jugo, específicamente el control del pH en esta etapa, tiene una relación significativa con la pureza del jugo clarificado, resaltando la importancia de una gestión precisa de este parámetro. Aunque la temperatura del jugo podría afectar la calidad final y la concentración de azúcares reductores, el nivel de significancia estadística obtenido ( $p = 0.0812$ ) no permitió llegar a una conclusión definitiva, por lo que se recomienda realizar estudios adicionales para confirmar su impacto. Además, la interacción entre pH y temperatura resultó ser relevante para la eficacia del procedimiento, lo que sugiere que la combinación de estos factores debe ser cuidadosamente monitoreada para optimizar el proceso de clarificación. A pesar de estas variaciones, los gráficos de control del proceso indicaron que la clarificación se mantiene estable y dentro de los límites

operativos establecidos, evidenciando un control adecuado de los parámetros operativos en el ingenio azucarero.

En cuanto a la relación entre los ajustes en el proceso de clarificación y la reducción de azúcares reductores, los resultados indican que la eliminación de impurezas y la optimización del proceso de clarificación tienen un impacto directo en la pureza del jugo. Se observó que la disminución de azúcares reductores durante el proceso mejora significativamente la recuperación de sacarosa, lo que resulta en un producto final de mayor calidad y valor en el mercado. Sin embargo, aunque el pH mostró una relación con la pureza del jugo clarificado, su influencia en la reducción de azúcares reductores no fue significativa en todas las mediciones realizadas. Esto sugiere que otros factores operativos, además del pH, podrían estar afectando la reducción de estos compuestos, por lo que se recomienda profundizar en la investigación para identificar con mayor precisión cuáles son los elementos clave en este proceso.

Para optimizar el procedimiento de control de calidad en las operaciones de clarificación de jugo en el Ingenio Azucarero del Norte, se sugiere la implementación de herramientas estadísticas avanzadas como ANOVA y gráficos de control de la media (X-barra), las cuales permitirán un monitoreo más preciso de los parámetros críticos del proceso. La confirmación de la normalidad en los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk respalda la validez del análisis estadístico y facilita la toma de decisiones basada en evidencia.

Asimismo, el control riguroso del pH en la etapa de sulfitación es esencial para mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del jugo clarificado. Se calculó que una optimización efectiva del procedimiento podría generar un incremento en los ingresos de aproximadamente **272,354 dólares anuales**, lo que resalta la importancia de implementar mejoras en la gestión del proceso de clarificación. Finalmente, se recomienda continuar con estudios que permitan evaluar la interacción de diferentes variables operativas y su influencia en la calidad del azúcar, promoviendo la adopción de tecnologías avanzadas y metodologías de control para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad del sector azucarero.

### **Consideraciones éticas**

La investigación tuvo fines académicos y se centró en el proceso de clarificación de jugos en un ingenio azucarero para la obtención de sacarosa. Se garantizó el cumplimiento de principios éticos, incluyendo la gestión del consentimiento de los informantes. No tuvo implicaciones políticas, económicas, religiosas ni de otra índole que afectaran a los participantes. Se siguió la normativa establecida para la redacción científica.

### **Conflicto de interés**

El autor declara que no existen conflictos de interés en relación con este estudio, ya que no hay intereses personales ni financieros que pudieran influir inapropiadamente en la representación o interpretación de los resultados. Asimismo, se especifica que los patrocinadores no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio, la recopilación, el análisis o la interpretación

de los datos, en la redacción del manuscrito, ni en la decisión de publicar los resultados. Esta declaración asegura la transparencia y la integridad del trabajo presentado.

#### **Declaración de contribución de los autores**

Widmar Santiago Villarreal Revelo desarrolló la investigación en campo, análisis de datos y redacción del artículo científico; Luis Viveros Almeida proporcionó asesoría en el diseño metodológico y el análisis crítico de los resultados.

#### **Fuente de financiación**

La investigación sobre el control de calidad en la clarificación de jugo en un ingenio azucarero se realizó sin financiamiento externo ni subvenciones, basándose únicamente en el esfuerzo personal del autor. Esta autonomía permitió mayor flexibilidad en el desarrollo del estudio, asegurando que los resultados reflejen con precisión la realidad del proceso sin influencias externas que comprometan la objetividad. La financiación independiente destaca el compromiso del autor con la integridad y el rigor científico en su trabajo, garantizando la autenticidad de las conclusiones obtenidas.

## REFERENCIAS

- Akhtar, A., Subbiah, S., Mohanty, K., Sundar, R., Unnikrishnan, R., & Hareesh, U. S. (2020). Sugarcane juice clarification by lanthanum phosphate nanofibril coated ceramic ultrafiltration membrane: PPO removal in absence of lime pre-treatment, fouling and cleaning studies. *Separation and Purification Technology*, 249, 117157. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117157>
- Alim, M., & Kesen, S. E. (2023). Statistical Process Control (SPC) and Quality Management. In *Smart and Sustainable Operations and Supply Chain Management in Industry 4.0* (pp. 117–136). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003180302-6>
- Avalos, J., & Ponte, R. (2019). *Efecto del pH y temperatura en la clarificación del jugo de caña de azúcar (saccharum officinarum) por carbonatación* [Universidad Nacional Del Santa]. <https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/3386>
- Babu, A. S., & Adeyeye, S. A. O. (2024). Extraction of sugar from sugar beets and cane sugar. In *Extraction Processes in the Food Industry* (pp. 177–196). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819516-1.00007-7>
- Beeram, S., Morapakala, S., Deshmukh, S. S., & Sunkara, P. R. (2020). Selection of suitable and sustainable clarificants and clarification method for non-centrifugal sugar production using MCE. *Materials Today: Proceedings*, 28, 893–897. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.319>
- Boggan, E., & Ver, S. (1995). *Módulo de Enfoque de Negocio de los Equipos*. Competitive Solutions, Inc.,.
- Chávez Cruz, R., Heras Garzón, J., & Echeverría Bravo, C. (2022). Producción de panela en el Cantón Atahualpa, Ecuador. Un acercamiento al cumplimiento de la tributación. *SUMMA. Revista Disciplinaria En Ciencias Económicas y Sociales*, 4(2). <https://doi.org/10.47666/summa.4.2.10>
- Chiaramonte de Castro, B. J., & Bernardo, A. (2019). Evaluation of cane sugar production using multivariate statistical methods. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 5(3), 0228–0237. <https://doi.org/10.18540/jcecv15iss3pp0228-0237>
- Cywinska, M., Chen, Z., Groele, B., & Marszałek, K. (2023). Application of Emerging Techniques in Reduction of the Sugar Content of Fruit Juice: Current Challenges and Future Perspectives. *Foods*, 12(6), 1181. <https://doi.org/10.3390/foods12061181>
- Du, N., Pan, L., Liu, J., Wang, L., Li, H., Li, K., Xie, C., Hang, F., Lu, H., & Li, W. (2022). Clarification of Limed Sugarcane Juice by Stainless Steel Membranes and Membrane Fouling Analysis. *Membranes*, 12(10), 910. <https://doi.org/10.3390/membranes12100910>
- García Asprilla, I. del S., & Ramírez-Navas, J. S. (2018). Near-infrared spectroscopy: a rapid alternative technique to reducing sugars determination in juice of sugarcane (*Saccharum*

- officinarum L.). *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research*, 6(1), 392–401. [https://doi.org/10.56499/jppres18.374\\_6.5.392](https://doi.org/10.56499/jppres18.374_6.5.392)
- Gessa, A., Marin, E., & Sancha, P. (2022). A practical application of statistical process control to evaluate the performance rate of academic programmes: implications and suggestions. *Quality Assurance in Education*, 30(4), 571–588. <https://doi.org/10.1108/QAE-03-2022-0065>
- González Campos, E. (2023). Application of statistical processes control for the performance improvement of a clinical engineering department. *Global Clinical Engineering Journal*, 6(1), 29–35. <https://doi.org/10.31354/globalce.v6i1.160>
- Hobbs, J., Katzfuss, M., Nguyen, H., Yadav, V., & Liu, J. (2024). Functional analysis of variance (ANOVA) for carbon flux estimates from remote sensing data. *Geoscientific Model Development*, 17(3), 1133–1151. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-1133-2024>
- Isniah, S., & Purba, H. H. (2021). The Application of Using Statistical Process Control (SPC) Tools : Research Issues and Literature Review. *Spektrum Industri*, 19(2), 125. <https://doi.org/10.12928/si.v19i2.19035>
- Laksameethanasana, P., Somla, N., Janprem, S., & Phochuen, N. (2012). Clarification of sugarcane juice for syrup production. *Procedia Engineering*, 32, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1248>
- Marasinghege, C., Shi, C., Bottle, S., Bartley, J., Doherty, W. O. S., & Rackemann, D. W. (2024). One pot two-alkali clarification process to minimize sucrose degradation of clarified sugarcane juice during evaporation. *Journal of Food Engineering*, 374, 112022. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112022>
- Marino, M. F. (2024). Applied Linear Regression for Longitudinal Data: With an Emphasis on Missing Observations Applied Linear Regression for Longitudinal Data: With an Emphasis on Missing Observations, Frans E. S. Tan and Shahab Jolani, Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press, 2023, xxi + 226 pp., \$120.00(H), ISBN 978-0-367-63431-5. *The American Statistician*, 78(1), 128–129. <https://doi.org/10.1080/00031305.2024.2302792>
- Meng, Y., Yu, S., Qiu, Z., Zhang, J., Wu, J., Yao, T., & Qin, J. (2021). Modeling and optimization of sugarcane juice clarification process. *Journal of Food Engineering*, 291, 110223. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110223>
- Monter-Pozos, A., & González-Estrada, E. (2024). On testing the skew normal distribution by using Shapiro–Wilk test. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 440, 115649. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2023.115649>
- Paixão, C. S. S., Voltarelli, M. A., Silva, R. P. da, Borba, M. A. de P., & Torres, L. S. (2020). statistical process control applied to monitor losses in the mechanized sugarcane harvesting. *Engenharia Agrícola*, 40(4), 473–480. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n4p473-480/2020>

- Prati, P., & Moretti, R. H. (2010). Study of clarification process of sugar cane juice for consumption. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(3), 776–783. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000300033>
- Lamanna, R., Vega, P., Revollar, S., & Alvarez, H. (2009). Diseño Simultáneo de Proceso y Control de una Torre Sulfitadora de Jugo de Caña de Azúcar. *Revista CEA*, 23–43.
- Sarker, I. H. (2021). Data Science and Analytics: An Overview from Data-Driven Smart Computing, Decision-Making and Applications Perspective. *SN Computer Science*, 2(5), 377. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00765-8>
- Sewwandi, N., Ariyawansa, S., Kumara, B. S., & Maralanda, A. (2021). *Optimizing Pre Liming pH for Efficient Juice Clarification Process in Sri Lankan Sugar Factories*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-362414/v1>
- Shaw, I., & Gregory, K. (2022). Acid–base balance: a review of normal physiology. *BJA Education*, 22(10), 396–401. <https://doi.org/10.1016/j.bjae.2022.06.003>
- Shi, C., Xie, C., Zhang, Z., Rackemann, D., Wei, B., Hang, F., Lu, H., Li, K., & Doherty, W. O. S. (2021). Sugar and value-added products derived from retentate concentrate of sugarcane juice. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123915. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123915>
- Vargas Díaz, R., Lesmes Suárez, J., Varón Ramírez, V., Barona Rodríguez, A., Mendieta Menjura, O., & Franco Florez, C. (2023). Evaluación de variables agronómicas y calidad de la caña de azúcar sobre diferentes prácticas de labranza. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 4(2), 48–55. <https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v4i2.198>
- Villaseñor, J. A., & González-Estrada, E. (2025). A nonparametric test for homogeneity of variances. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 54(2), 646–654. <https://doi.org/10.1080/03610926.2024.2316274>
- Zaidan, N. L., Mohamad-Fuzi, S. F., Hailan, I. M., Roshidi, A. A., Kormin, F., Abu-Bakar, M. F., & Sabran, S. F. (2021). Physicochemical and sensory characteristic of treated sugarcane juice. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 736(1), 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/736/1/012073>