



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**COMPARACIÓN DE CINCO MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAR
LA CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

Marvin Ottoniel Estrada Cardona

Asesorado por el Ing. Félix René Morales Magarín

Guatemala, mayo de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE CINCO MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAR
LA CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MARVIN OTTONIEL ESTRADA CARDONA

ASESORADO POR EL ING. FÉLIX RENÉ MORALES MAGARÍN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DE CINCO MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de marzo de 2011.



Marvin Ottoniel Estrada Cardona

Guatemala, 20 de julio de 2011

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Respetable Ingeniero Álvarez Mejía:

Por este medio atentamente le informo que como asesor del trabajo de graduación del estudiante universitario **Marvin Ottoniel Estrada Cardona** de la carrera de ingeniería química, con carné No. **200611146**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"COMPARACIÓN DE CINCO MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR"**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



Ing. Félix René Morales Magarín
Ingeniero Químico
Colegiado No. 1385



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 31 de octubre de 2011
Ref.EIQ.TG.241.2011

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-155-2011-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario, **Marvin Ottoniel Estrada Cardona**, identificado con carné No. 2006-11146, titulado: "COMPARACIÓN DE CINCO MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR", el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico Félix René Morales Magarín.

Habiendo encontrado el referido informe final satisfactorio, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Estrada Cardona**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. **Terésa Lisely de León Arana**, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **MARVIN OTONIEL ESTRADA CARDONA** titulado: "**COMPARACIÓN DE CINCO MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, abril de 2012

Cc: Archivo
WGAM/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **COMPARACIÓN DE CINCO MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR**, presentado por el estudiante universitario: **Marvin Ottoniel Estrada Cardona**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, mayo de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi fuente de fortaleza, amor y sabiduría.
- Mis padres** Ángel Francisco Estrada Recinos y Mauricia Cardona de Estrada, que esto sea una pequeña recompensa a su apoyo.
- Mis hermanos** Ángel Omar y Vernick Alexander Estrada Cardona, por su ayuda incondicional.
- Mis amigos** Con afecto especial.
- Universidad de San Carlos de Guatemala**

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	A quien agradezco infinitamente por darme la vida y por permitirme alcanzar este triunfo.
Mis padres	Por ser la más grande bendición en mi vida y por su apoyo incondicional.
Mis catedráticos	Por compartir y aportarme sus conocimientos y experiencias durante el trayecto de mi carrera.
Mis amigos	Por su afecto y amistad sincera.
Mi asesor	Por su apoyo para llevar a cabo este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. La caña de azúcar	5
2.1.1. Composición de la caña de azúcar	6
2.1.1.1. Sacarosa	8
2.2. Control de calidad en la caña de azúcar	10
2.2.1. Recepción de la caña	10
2.2.2. Muestreo y control de la caña	11
2.2.3. Procedimientos analíticos	13
2.2.3.1. Polarimetría	14
2.2.3.2. Refractometría	17
2.3. Métodos para el análisis y evaluación de la caña de azúcar	18
2.3.1. Métodos indirectos	18
2.3.2. Métodos directos	20
2.3.2.1. Métodos de desintegración húmeda	23
2.3.2.2. Métodos de prensa hidráulica	25

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	27
3.1.	Variables.....	27
3.1.1.	Variables dependientes	28
3.1.1.1.	Pol de caña.....	28
3.1.1.2.	Porcentaje de fibra en la caña	28
3.1.1.3.	Tiempo de análisis.....	29
3.1.1.4.	Costo variable unitario de análisis	29
3.1.2.	Variables Independientes	30
3.1.2.1.	Brix.....	30
3.1.2.2.	Polarización directa.....	30
3.1.2.3.	Pol.....	31
3.1.2.4.	Peso de torta húmeda.....	32
3.1.2.5.	Peso de torta seca	32
3.1.2.6.	Humedad	32
3.2.	Delimitación del campo de estudio	33
3.2.1.	Enfoque de la investigación	33
3.2.2.	Nivel de la investigación	33
3.2.3.	Tipo de investigación	34
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	34
3.4.	Recursos materiales disponibles	34
3.4.1.	Reactivos	34
3.4.1.1.	Subacetato de plomo	35
3.4.1.2.	Octapol	35
3.4.1.3.	Tierras silíceas.....	36
3.4.2.	Cristalería	36
3.4.3.	Equipo.....	36
3.5.	Técnica cuantitativa.....	40
3.5.1.	Comparación de los métodos analíticos para la evaluación de la caña de azúcar	40

3.5.1.1.	Preparación de la muestra	41
3.5.1.2.	Métodos analíticos	42
3.5.1.3.	Tiempo de análisis	47
3.5.1.4.	Análisis económico de los métodos analíticos	47
3.5.2.	Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos.....	49
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	50
3.6.1.	Comparación de los métodos analíticos para la evaluación de la caña de azúcar.....	50
3.6.2.	Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos.....	54
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	55
3.7.1.	Comparación de los métodos analíticos para la evaluación de la caña de azúcar.....	55
3.7.2.	Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos.....	59
3.8.	Análisis estadístico	60
3.8.1.	Comparación de los métodos analíticos para la evaluación de la caña de azúcar.....	60
3.8.1.1.	Análisis de varianza unidireccional de medidas repetidas	60
3.8.1.2.	Prueba de Tukey de datos emparejados.....	63
3.8.2.	Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos.....	65
3.8.2.1.	Precisión	65
3.8.2.2.	Exactitud	67
3.8.2.3.	Linealidad.....	68

4.	RESULTADOS.....	69
4.1.	Comparación estadística de los métodos para la determinación de pol de caña	69
4.2.	Comparación estadística de los métodos para la determinación de fibra en la caña	72
4.3.	Comparación del tiempo de análisis de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar	75
4.4.	Comparación económica de los métodos de análisis para determinar la calidad de la caña de azúcar	76
4.5.	Selección de un método de análisis para determinar la calidad de la caña de azúcar	78
4.6.	Propuesta de la modificación del método CONSECANA para la determinación del porcentaje de fibra en la caña	80
4.7.	Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos	82
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	87
5.1.	Comparación estadística de los métodos para la determinación de pol de caña	87
5.2.	Comparación estadística de los métodos para la determinación de fibra en la caña	89
5.3.	Comparación del tiempo de análisis de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar	91
5.4.	Comparación económica de los métodos de análisis para determinar la calidad de la caña de azúcar	93
5.5.	Selección de un método de análisis para determinar la calidad de la caña de azúcar	94
5.6.	Propuesta de la modificación del método CONSECANA para la determinación del porcentaje de fibra en la caña	97

5.7. Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos.....	99
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105
APÉNDICES	109
ANEXOS.....	153

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Representación espacial de la forma de cadena cíclica de la glucosa, fructosa y sacarosa	9
2. Vista general de un <i>core sampler</i>	13
3. Vista de un polarímetro digital y los tubos de observación	15
4. Muestreador por perforación horizontal	21
5. Muestreador por perforación tipo inclinado	21
6. Equipo desfibrador de caña	22
7. Equipo homogeneizador tipo mezclador	22
8. Equipo de desintegración húmeda.....	24
9. Prensas hidráulicas comerciales.....	25
10. Subacetato de plomo	35
11. Muestreador <i>core sampler</i>	38
12. Prensa hidráulica	38
13. Desintegrador húmedo.....	39
14. Agitador mezclador	39
15. Polarímetro digital	39
16. Refractómetro digital	40
17. Procedimiento para la preparación de la muestra.....	42
18. Diagrama de flujo de los métodos directos por prensa hidráulica	44
19. Diagrama de flujo del método de desintegración húmeda	45
20. Diagrama de flujo del método de balance de masa	46
21. Gráfica de los resultados de pol de caña obtenidos a través de los métodos aplicados	69

22.	Diagrama de cajas para la comparación de los métodos de análisis de pol de caña	71
23.	Gráfica de los resultados de porcentaje de fibra obtenidos a través de los métodos aplicados	72
24.	Diagrama de cajas para la comparación de los métodos de análisis de porcentaje de fibra en la caña.....	74
25.	Gráfica de comparación de tiempo de análisis de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar	76
26.	Gráfica de comparación de los costos variables unitarios de los métodos de análisis de caña de azúcar.....	77
27.	Gráfica comparativa del factor estadístico, económico, tiempo de ejecución y del impacto ambiental de los cinco métodos analíticos empleados en la investigación.....	79
28.	Correlación entre el porcentaje de fibra y el peso de torta húmeda para el método modificado de CONSECA.....	80
29.	Gráfica de los resultados de porcentaje de fibra obtenidos a través de los métodos aplicados junto con el método modificado de CONSECANA.....	81
30.	Linealidad del procedimiento refractométrico empleado en la investigación.....	84
31.	Linealidad del procedimiento polarimétrico empleado en la investigación.....	85

TABLAS

I.	Composición química promedio del tallo y del jugo de la caña de azúcar	7
II.	Variables de estudio empleadas en la investigación.....	27

III.	Concentraciones de sacarosa de las soluciones estándares empleadas para la evaluación de los procedimientos analíticos	49
IV.	Formato de la tabla de recolección de datos para los métodos de prensa hidráulica	51
V.	Formato de tabla de recolección de datos para el método por desintegración húmeda ICUMSA	51
VI.	Formato de tabla de recolección de datos para el método de balance de masa.....	52
VII.	Formato de tabla de recolección de datos para el tiempo de análisis de los métodos CONSECAN, TANIMOTO y TECNICAÑA	53
VIII.	Formato de tabla de recolección de datos para el análisis económico de los métodos	54
IX.	Formato de tabla de recolección de datos para la evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos.....	55
X.	Formato de presentación de resultados de pol de caña para los distintos métodos aplicados	56
XI.	Formato de presentación de resultados de fibra de caña para los distintos métodos aplicados	56
XII.	Formato de la tabla de procesamiento de información para el tiempo de análisis de los distintos métodos aplicados	57
XIII.	Formato de la tabla de procesamiento de información para el cálculo de la energía consumida por análisis	58
XIV.	Formato de la tabla de procesamiento de información para el cálculo del costo variable por muestra para cada método.....	59
XV.	Formato de la tabla de procesamiento de información para la evaluación del procedimiento refractométrico y polarimétrico	59
XVI.	Resumen de datos para la aplicación del ANOVA	62
XVII.	Fórmulas para calcular el ANOVA de medidas repetidas.....	63
XVIII.	Resumen de datos para la aplicación de la prueba de Tukey	64

XIX.	Análisis de varianza de datos emparejados para los métodos de determinación de pol de caña	70
XX.	Análisis de comparaciones múltiples de Tukey para los métodos de determinación de pol de caña	70
XXI.	Análisis de varianza de datos emparejados para los métodos de determinación de fibra de caña	73
XXII.	Análisis de comparaciones múltiples de Tukey para los métodos de determinación de fibra de caña	73
XXIII.	Tiempo promedio de análisis de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar.....	75
XXIV.	Costos variables unitarios de la aplicación de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar.....	77
XXV.	Desglose comparativo del factor estadístico, económico, tiempo de ejecución y del impacto ambiental de los cinco métodos de análisis, para la determinación de la calidad de la caña	78
XXVI.	Modelo de la correlación lineal entre el porcentaje de fibra y el peso de torta húmeda	81
XXVII.	Análisis de varianza de datos emparejados para los métodos de determinación de fibra en la caña, con el método modificado de CONSECANNA	82
XXVIII.	Evaluación de la respuesta instrumental del refractómetro empleado en la investigación	83
XXIX.	Evaluación de la respuesta instrumental del polarímetro empleado en la investigación.....	83
XXX.	Modelo de correlación para la linealidad del procedimiento refractométrico	84
XXXI.	Modelo de correlación para la linealidad del procedimiento polarimétrico.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HP	Caballos de fuerza (<i>Horse Power</i>), unidad de potencia
r^2	Coeficiente de correlación
CV	Coeficiente de variación
MS	Cuadrado medio (<i>mean square</i>)
dm	Decímetros
σ	Desviación estándar
HSD	Diferencia máxima significativa de Tukey
t	Estadístico de la prueba de t de <i>student</i>
°Brix	Grados brix
°C	Grados Celsius (temperatura)
gl	Grados de libertad
°S	Grados de polarización
ISS	Grados internacionales de azúcar
g	Gramos
H_i	Hipótesis de investigación
H_o	Hipótesis nula
kg	Kilogramos
kW	Kilowatts (Unidades de potencia)
kWh	Kilowatts-hora (unidades de energía)
lb	Libras
PSI	Libra por pulgada cuadrada (presión)
\bar{X}	Media
ml	Mililitros

mm	Milímetros
min	Minutos
nm	Nanómetros
α	Nivel de significancia
NDS	No hay diferencias significativas
n	Número de muestras analizadas por tratamiento
N	Número de tratamientos (métodos)
K	Número total de muestras analizadas
Q₁	Percentil 1 (25% de los datos)
Q₃	Percentil 3 (75% de los datos)
PBU	Peso de torta húmeda (<i>peso do bagaço úmido</i>)
PBS	Peso de torta seca (<i>peso do bagaço seco</i>)
%	Porcentaje
% p/p	Porcentaje en peso
P	Potencia
Q.	Quetzales, moneda guatemalteca
SS	Suma de cuadrados
Σ	Sumatoria
F	Valor estadístico de Fisher

GLOSARIO

ANOVA	Análisis de varianza.
Bagazo	Subproducto final de la caña de azúcar, que es utilizado como fuente de energía para un ingenio azucarero.
Brix	Es una unidad de medida que expresa el porcentaje en peso de sólidos disueltos en una solución pura de sacarosa. Es el porcentaje de sólidos totales (azúcares y no azúcares), disueltos en el jugo.
Cachaza	Se le llama así a los lodos de fondo obtenidos en el proceso de clarificación, constituidos principalmente por sales de fosfato de calcio y magnesio, gomas, cera, cenizas y agua.
Cera	Revestimiento de la caña que precipita en el proceso de clarificación pasando a formar parte de la cachaza.
CONSECANA	<i>Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool</i> (Consejo de productores de caña de azúcar, azúcar y alcohol)
Desfibradora	Aparato empleado para la preparación y desintegración de la caña, con el propósito de facilitar la extracción del jugo. Su nombre indica la acción que desarrolla al cortar en pequeños pedazos y desfibrar.

Exactitud	Grado de concordancia entre el resultado y un valor de referencia certificado. En ausencia, se tiene error sistemático.
Fibra	Materia seca insoluble en agua contenida en caña o bagazo.
Humedad	Contenido de agua en una muestra sólida. Se representa como porcentaje de peso de agua contenido.
ICUMSA	<i>International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis</i> (Comisión internacional de métodos uniformes para el análisis de azúcar)
Jugo	Mezcla líquida homogénea que contiene agua, sólidos disueltos y sólidos en suspensión.
Linealidad	Define la aptitud de un método para obtener resultados proporcionales a la concentración de la solución a analizar. La linealidad del método es la relación entre la respuesta del instrumento y concentraciones conocidas de la solución.
Método	Proceso analítico que consiste en un conjunto de procedimientos, operaciones o técnicas aplicadas al análisis de una muestra.
Peso de torta húmeda	Porción de una muestra de caña desfibrada que permanece, luego de extraerle el jugo mediante una prensa hidráulica.
Peso de torta seca	Porción de la torta húmeda que queda, posterior al secado en un horno.

Pol	Es el valor obtenido por la polarización directa del peso normal de una solución en un sacarímetro. Pol es la abreviatura de la palabra polarización; en la práctica se asume igual al porcentaje de sacarosa, es decir, es el valor del contenido aparente de sacarosa en una muestra.
Polarización	Es la lectura o escala del polarímetro, que se encuentra calibrada en unidades conocidas como grados de azúcar internacionales ($^{\circ}\text{S}$ o ISS). Esta lectura se establece de tal manera que 26 gramos de sacarosa pura en 100 ml de solución, da una lectura de 100 grados de azúcar (100°S) en un tubo de 2 decímetros (20 cm) a una longitud de onda de 546,23 nm. Por lo tanto, una solución conformada solo de agua destilada sin azúcar dará una lectura de cero grados de azúcar (0°S).
Polarímetro	Equipo que mide el contenido de pol de una sustancia, mediante el principio de rotación de un plano de luz polarizada que atraviesa una solución con azúcares ópticamente activas.
Precisión	Grado de concordancia entre los datos obtenidos de una serie. Es la capacidad de un instrumento o de un método de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones Refleja el efecto de los errores aleatorios producidos durante el proceso analítico.
Procedimiento	Forma específica de llevar a cabo una actividad de un determinado método. El procedimiento se refiere a las partes que componen un método.

Pureza	Es la relación porcentual entre pol y brix de una solución. Indica la proporción entre sacarosa y sólidos solubles totales.
Refractómetro	Equipo que se emplea para medir el brix de una solución mediante el principio del índice de refracción.
Rendimiento	Relación matemática que determina cuántas libras de azúcar se obtienen por cada tonelada de caña quemada y cortada. En el ingenio se determina al pesar los quintales de azúcar producida, transformándola a libras y dividir este resultado entre las toneladas de caña ingresadas y pesadas en una báscula.
Sacarosa	Compuesto químico orgánico de fórmula $C_{12}H_{22}O_{11}$, también denominado comúnmente como azúcar y pertenecientes al grupo de compuestos llamados carbohidratos.
Soluble	Dícese de la propiedad de los materiales sólidos, líquidos y gaseosos, de disolverse en otros materiales en los mismos estados, con el fin de formar una sola fase.
Tándem	Conjunto de varios molinos y sus accesorios que constituyen la unidad de molienda de un ingenio.
TECNICAÑA	Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar.
Zafra	Temporada en que se realiza la recolección de la caña de azúcar para ser procesada industrialmente.

RESUMEN

Para la cuantificación del porcentaje de sacarosa y de fibra en la caña de azúcar se aplican numerosas técnicas, y no existe entre los laboratorios, unanimidad en la selección de la más adecuada. Por tal motivo, se compararon cinco métodos para la determinación de porcentaje de sacarosa (pol) y el porcentaje de fibra, en muestras de caña, con el fin de evaluar la precisión estadística con base en un método de referencia, rentabilidad económica y el impacto ambiental. Se utilizaron 30 muestras de caña de azúcar, recolectadas en un período de tres semanas, bajo las condiciones de laboratorio de un ingenio azucarero guatemalteco.

Entre los métodos empleados, se aplicó un método directo por desintegración húmeda, específicamente la metodología ICUMSA, considerado como de referencia; tres métodos de análisis directo por prensa hidráulica, CONSECANA-SP, TANIMOTO y TECNICAÑA; y uno que combina ambas metodologías, conocido como balance de masa o simplemente método ponderado.

Se encontraron diferencias estadísticas significativas al comparar los cinco métodos, tanto para pol como para fibra de caña. Sin embargo, para la determinación de pol de caña se evidenció que los métodos CONSECANA y el modelo de balance de masa, presentaron equivalencia estadística con ICUMSA, por lo que se concluyó que dichas técnicas son comparables entre sí. De igual manera, para la determinación de fibra, los métodos que resultaron ser equivalentes estadísticamente fueron las metodologías de ICUMSA, TANIMOTO, TECNICAÑA y el modelo de balance de masa.

A pesar de que los métodos ICUMSA y balance de masa resultaron ser confiables en ambas determinaciones, se estimó que son técnicas muy poco rentables y de tiempos altos de ejecución. Por lo tanto, como recomendación inmediata, se estableció que la combinación del método de CONSECANA, para la determinación del pol, con el método de TANIMOTO, para la determinación de fibra, era la más rentable económicamente, confiable estadísticamente y favorable al medio ambiente, bajo las condiciones de análisis estudiadas.

Debido a que la metodología completa de CONSECANA, resultó ser la más factible analíticamente, con un tiempo de aplicación menor en un 89,5% que el de ICUMSA, y un costo menor a este en Q. 0,99 por muestra analizada, se propuso la modificación del cálculo para la determinación de fibra del método de CONSECANA, como recomendación a largo plazo, con el fin de lograr su equivalencia estadística. Se desarrolló una ecuación para el cálculo de fibra, bajo el modelo de CONSECANA para las 30 muestras, encontrando que no existían diferencias significativas de estos valores con los demás métodos de determinación de fibra.

Durante la investigación, se evaluaron los procedimientos y las lecturas del refractómetro y del polarímetro, esto con el fin de monitorear su buen funcionamiento durante las rutinas de análisis. Se emplearon soluciones de sacarosa grado reactivo a concentraciones conocidas, para determinar la confiabilidad de estos equipos de medición. Se encontró buena exactitud, precisión y linealidad para ambos procedimientos.

OBJETIVOS

General

Comparar los resultados de porcentaje de sacarosa y de fibra en la caña de azúcar, obtenidos por medio de cinco métodos analíticos: ICUMSA, CONSECAN, TANIMOTO, TECNICAÑA y un modelo de balance de masa.

Específicos

1. Comparar los métodos de CONSECAN, TANIMOTO, TECNICAÑA y un modelo de balance de masa, respecto a un método de referencia establecido, de la metodología ICUMSA.
2. Seleccionar un método para determinar los parámetros de calidad de la caña de azúcar, a través de la comparación estadística, económica, de tiempo de análisis y del impacto ambiental.
3. Evaluar los procedimientos de lecturas refractométricas y polarimétricas, a través de la exactitud, precisión y linealidad de las mediciones de la concentración de sacarosa, en soluciones comprendidas dentro de un rango de 5% a 20% en peso.

HIPÓTESIS

Es posible seleccionar la metodología más adecuada a través de la comparación de los métodos ICUMSA, TECNICAÑA, CONSECAÑA, TANIMOTO y del balance de masa, de forma estadística, económica, por tiempo de ejecución de análisis e impacto ambiental.

Hipótesis estadísticas

Hi: Los parámetros de calidad de la caña de azúcar, tales como el porcentaje de sacarosa (pol) y el porcentaje de fibra de caña que se obtienen por medio de los métodos ICUMSA, TECNICAÑA, CONSECAÑA, TANIMOTO y del balance de masa, presentan diferencias significativas entre sí.

Ho: Los parámetros de calidad de la caña de azúcar, tales como el porcentaje de sacarosa (pol) y el porcentaje de fibra de caña que se obtienen por medio de los métodos ICUMSA, TECNICAÑA, CONSECAÑA, TANIMOTO y del balance de masa, no presentan diferencias significativas entre sí.

Hi: Los resultados de concentración experimental de sacarosa obtenidos por medio de la medición de brix y polarización directa a través de los equipos de laboratorio adecuados difieren significativamente entre sí respecto de la concentración teórica de las soluciones.

Ho: Los resultados de concentración experimental de sacarosa obtenidos por medio de la medición de brix y polarización directa a través de los equipos de laboratorio adecuados, no difieren significativamente entre sí respecto de la concentración teórica de soluciones.

INTRODUCCIÓN

La recepción y aceptación de caña en los ingenios azucareros es una operación compleja dentro del proceso de producción de azúcar, ya que involucra muchos factores que deben ser tomados en cuenta, tales como la calidad de la caña, los pagos de los proveedores por materia de sacarosa contenida, el rendimiento de la caña, entre otros. En la recepción de caña, es necesario definir con claridad el procedimiento de control, muestreo y análisis de la caña recibida; a manera de obtener información veraz y confiable de su calidad y cantidad.

La caña de azúcar está constituida por dos componentes industriales que son de interés técnico y económico para los agricultores e industriales del azúcar: el grado de concentración de sacarosa (pol) y el contenido de fibra (%p/p). Ambos componentes ofrecen una buena representatividad del grado de calidad comercial que posee la materia prima entregada al ingenio. Su relevancia radica en ser indicadores directos del contenido real de sacarosa contenida en la caña y, por tanto, potencialmente recuperable en la fábrica. El contenido de pol también es utilizado para realizar el pago de la caña. La fibra da lugar al bagazo, residuo que resulta esencial como materia prima para alimentar a las calderas y generar la energía requerida por el proceso industrial, o para su venta.

Actualmente, para la cuantificación de la calidad de la caña de azúcar existen numerosos métodos definidos por diversos países y laboratorios, y no hay entre ellos acuerdos que estipulen parámetros para la selección más adecuada.

El ingenio, donde se realizó la investigación, cuenta con un laboratorio de caña, con el fin de evaluar la calidad de la caña que ha de transformarse en azúcar. Para esto han empleado diversos métodos cuantitativos adquiridos por asesoría de expertos y por medio de documentación normalizada de otros países. Dichas técnicas han proyectado datos considerados como confiables, pero que no tienen validez demostrable en su exactitud en forma documentada. Últimamente, se ha encontrado discrepancia entre los datos, al compararlos con los balances de masa de la producción en fábrica; por lo que surgió la necesidad de evaluarlos y compararlos con otros métodos.

Por tales motivos se compararon cinco métodos diferentes para la determinación de sacarosa y fibra de la caña. El principal objetivo de la presente investigación fue comparar y evaluar los métodos analíticos empleados en el laboratorio de caña de azúcar dentro un ingenio guatemalteco, con el fin de apreciar la similitud o desviación entre los mismos y establecer pautas para su utilización, y por lo tanto definir una única metodología de análisis.

1. ANTECEDENTES

Los niveles de recuperación de azúcar que se obtienen en los ingenios a partir de la caña de azúcar, requieren ser mejorados permanentemente para propiciar incrementos de rentabilidad de la agroindustria de la caña de azúcar. En los laboratorios se realizan mediciones necesarias para evaluar la calidad de la caña, que entra a las áreas productoras, presentando una gran dificultad el análisis general de esta materia prima, debido a la gran cantidad que ingresa continuamente. Se han desarrollado, en distintos países, diversos procedimientos analíticos para la caña de azúcar, los cuales han creado controversia, ya que no se conoce con certeza cuál de las metodologías existentes debe ser aplicada a un ingenio determinado.

En cuanto a investigaciones realizadas respecto del tema de evaluación y comparación de métodos analíticos en laboratorios de calidad en nuestro país, se pueden encontrar diversas publicaciones realizadas en distintos campo de aplicación. Por ejemplo, el informe de EPS de Ingeniería Química de Nildred Jeanneth Montufar Pérez (2009), titulado “Validación de cinco métodos analíticos utilizados en el laboratorio de control de calidad, de una planta de envasado de rones añejos”, concluye que la validación de métodos en los laboratorios asegura y garantiza la calidad de los productos.

De igual forma, Celia Mercedes González Arévalo (2001), realizó su trabajo de graduación sobre la “Validación del análisis fisicoquímico para el control de producto en proceso en una planta de saponificación continua”.

Por otra parte, se han realizado trabajos de graduación sobre evaluaciones y comparaciones de métodos analíticos en laboratorios de ingenios azucareros, pero son escasos y muy específicos.

Entre los trabajos de graduación realizados en ingenios azucareros, se encuentra el de César Omar Méndez Hurtarte (2003), sobre “Validación del método analítico para cuantificación de retinol en azúcar fortificada de consumo nacional”, donde se concluye que por medio de los resultados y el cumplimiento de los parámetros de validación, se demostró que el método espectrofotométrico para la cuantificación de retinol es confiable para su uso rutinario. Cabe resaltar que esta investigación se realizó en el laboratorio de calidad de azúcar procesada y no en un laboratorio de caña.

De igual forma, la Lic. Qca. Farm. Ivette Cristina del Carmen Lima Portillo (1996), realizó su trabajo de graduación sobre la “Comparación de dos métodos para cuantificar sacarosa y determinación del contenido de la misma en azúcar de consumo local”, en donde concluyó que no había diferencias significativas entre los dos métodos empleados. Además, se encuentra la tesis nombrada “Sustitución de subacetato de plomo como clarificante en los análisis de laboratorio en un ingenio azucarero” del Ing. Qco. José Adolfo Orozco Bautista (2006), en el cual concluyó que es factible la sustitución del subacetato de plomo por otro agente clarificante que no contiene plomo, contribuyendo de tal manera a prevenir contaminación por medio de este metal pesado.

Además, el Ing. Qco. Sergio Penagos Dardón (1999), efectuó su trabajo de graduación sobre el tema de “Aseguramiento de la calidad de la caña de azúcar” donde realizó una recopilación de información de la implementación y manejo de un departamento de aseguramiento de la calidad en un ingenio

azucarero. Este estudio fue una investigación del tipo exploratorio, donde no se efectuó ningún tipo de análisis de datos, pero se explica de una forma clara los principios básicos y la importancia de las evaluaciones de los métodos fisicoquímicos en los laboratorios de cualquier ingenio azucarero.

Además la Ing. Qca. Lily Mabel García Nájera (1999), efectuó su trabajo de graduación sobre la “Evaluación de un nuevo método para el análisis de jugo residual en un ingenio azucarero de Guatemala”. En esta investigación se estudia la factibilidad de implementar un método por prensado hidráulico para determinar la composición del jugo residual contenido en el bagazo final. Dicho método se compara con el método tradicional por dilución, encontrando diferencias significativas entre ambos. Como recomendación, sugiere la implementación del método por prensa hidráulica, para determinar la composición de sacarosa en el bagazo que abandona el último tándem de molinos.

Por último, cabe resaltar que el Ing. Flavio Welmer Reyes Rodas (1999), realizó su trabajo de graduación sobre el tema “Selección de un método estándar para evaluar la caña de azúcar” previo a conferírsele el título de ingeniero agroindustrial en el centro universitario del sur (CUNSUR). En esta publicación concluyó que el procedimiento de análisis adecuado para evaluar la calidad de la caña de azúcar es un método propuesto de balance de masa, en virtud de que presentó mayor concordancia con un método estandarizado ICUMSA. Sin embargo, en esta investigación no se considera la rentabilidad económica de la implementación de estas técnicas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. La caña de azúcar

La caña de azúcar es una materia prima de características muy importantes. Sus características la han colocado como una de las materias primas de mayor rendimiento, obtenido en un menor tiempo que otros cultivos, referentes a materia verde, energía y fibra. El jugo de su tronco es la principal fuente de azúcar. Según Romero, “la caña de azúcar constituye el cultivo sacarífero más importante del mundo, responsable del 70% de la producción de azúcar”¹.

La caña de azúcar pertenece a la familia de las gramíneas y al género *Saccharum*., de las cuales existen seis especies: *S. spontaneum*, *S. robustum*, *S. barberi*, *S. sinense*, *S. edule* y *S. officinarum*. Las modificaciones comerciales de caña de azúcar son derivadas de las combinaciones entre especies, predominando las características de *S. officinarum* como productora de azúcar.

La caña de azúcar es un cultivo de las zonas tropicales y su explotación ha constituido una de las principales actividades económicas de Guatemala, debido a la diversidad de los productos finales que se derivan de ella. Chen², menciona que la caña de azúcar, al ser procesada, da origen a siete productos:

- Residuos vegetales que se quedan en el campo y centro de limpieza
- Agua vegetal obtenida por evaporación del jugo

¹ ROMERO, Eduardo, et. al. *Manual del cañero*. p. 15.

² CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. p. 27.

- Cachaza o productos sólidos del proceso
- Melaza o miel final, residuos líquidos del proceso
- Bagazo, residuos sólidos de la molienda
- Cenizas, residuos de la combustión del bagazo y
- Azúcar cristalizada

2.1.1. Composición de la caña de azúcar

La caña de azúcar está constituida principalmente por jugo y fibra. De acuerdo con Chen³, los principales constituyentes químicos de la caña de azúcar son la sacarosa, en el jugo, y la celulosa en la fibra. La fibra se refiere a la parte insoluble en agua, y está conformada por celulosa, que a su vez está constituida por azúcares sencillos como la glucosa. El jugo de la caña está compuesto por agua, sólidos solubles e insolubles. En la caña, “el agua representa entre 73% y 76%, mientras que los sólidos totales solubles varían entre 10% y 16%, y la fibra oscila entre un 11% y 16%”⁴.

La sacarosa, los azúcares reductores y otros constituyentes solubles en agua se reportan como contenido porcentual de sólidos solubles; comúnmente se emplea como unidad de medida los grados brix, es decir, el porcentaje de sólidos totales disueltos en el jugo. El contenido aparente de sacarosa, se expresa como porcentaje en peso, determinado por el método polarimétrico, conocido con el nombre de grados pol. Los sólidos solubles diferentes a la sacarosa, tales como los azúcares reductores, se nombran componentes no-pol. La razón porcentual entre la sacarosa en el jugo y el brix, se conoce como pureza del jugo, e indica qué porcentaje de sólidos totales disueltos representa la sacarosa.

³ CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. p. 46.

⁴ LARRAHONDO, Jesús. *Calidad de la caña de azúcar*. p. 339.

Entre los azúcares más sencillos contenidos en la caña se encuentran la glucosa y fructosa (azúcares reductores), que existen en el jugo de cañas maduras en una concentración del 1% y 5%. Además de los azúcares presentes en el jugo, existen otros constituyentes químicos de naturaleza orgánica e inorgánica, representados por sales de ácidos orgánicos, minerales, polisacáridos, proteínas y otras no-azúcares.

Tabla I. **Composición química promedio del tallo y del jugo 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	1,0 - 3,0
Ácidos orgánicos	1,5 - 5,5
- Ácidos carboxílicos	1,1 - 3,0
- Aminoácidos	0,5 - 2,5
Otros no azúcares	
- proteína	0,50 - 0,60
- almidones	0,001 - 0,05
- gomas	0,30 - 0,06
- ceras, grasas, etc.	0,05 - 0,15
- 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: CHEN, James. Manual de azúcar de caña. p. 47.

En la tabla I se resume la composición porcentual de los diversos constituyentes en la caña de azúcar, tanto en el tallo como en el jugo. El tallo de la caña está compuesto aproximadamente de 75% de agua y el resto consiste en fibra y sólidos solubles.

Según su abundancia, los azúcares componentes en el jugo, como se observa en la tabla I, son: sacarosa, glucosa y fructosa, enumerados generalmente como un porcentaje de los sólidos en los jugos. La cantidad de estos componentes es diversa según la variedad y temporada de la caña.

La recuperación final de sacarosa o la cantidad de azúcar recuperable en la planta de producción es afectada por varios factores, siendo los más importantes:

- El contenido de sacarosa de la caña (porcentaje de sacarosa)
- El contenido de fibra de la caña (porcentaje de fibra)
- El contenido de no-pol de la caña.

2.1.1.1. Sacarosa

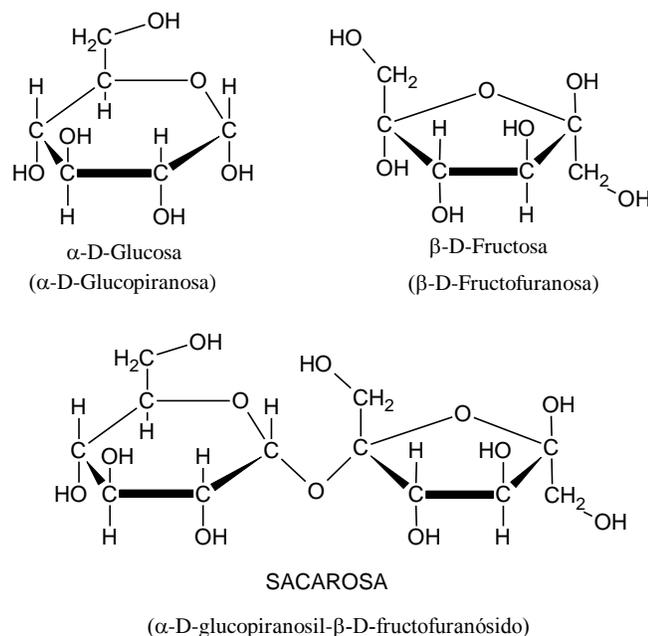
La sacarosa es el azúcar de mayor uso doméstico e industrial, además es la más común en el reino vegetal. La sacarosa se ubica en todas las partes de la caña de azúcar, pero se concentra principalmente en el tallo.

Las azúcares como la sacarosa son carbohidratos y están constituidos por los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno. Las azúcares simples como la glucosa y fructosa, se clasifican como monosacáridos ya que no se pueden hidrolizar a moléculas más pequeñas de carbohidratos por acción enzimática o por medio de una solución ácida.

La sacarosa es un disacárido, constituido por dos azúcares simples, específicamente glucosa y fructosa. Estas dos azúcares simples pueden condensarse para formar sacarosa. La sacarosa tiene la fórmula empírica $C_{12}H_{22}O_{11}$. Cuando la sacarosa es hidrolizada, ya sea mediante un ácido o una invertasa (enzima), produce cantidades equimolares de glucosa y fructosa, y la mezcla se conoce como invertida.

En la figura 1 se aprecia de forma esquemática la representación espacial de las moléculas de la glucosa y fructosa de manera independiente, además se presenta la visualización de la forma condensada de ambos azúcares simples, para formar la sacarosa.

Figura 1. **Representación espacial de la forma de cadena cíclica de la glucosa, fructosa y sacarosa**



Fuente: CHEN, James. Manual de azúcar de caña. p. 48.

2.2. Control de calidad en la caña de azúcar

Una forma para lograr incrementos en el rendimiento de la sacarosa es por medio de la implementación de sistemas de medición de calidad exactos, precisos y transparentes. Romero⁵ considera que concebir el pago de la materia prima como una simple relación entre el precio y el peso de la caña, sin considerar los valores de sacarosa y en el futuro próximo los de fibra, trae como consecuencia la falta de estímulo en el productor cañero para mejorar el manejo y la cosecha del cultivo y por ende afecta directamente la rentabilidad de la agroindustria. Por estos motivos, el control de calidad de la caña de azúcar es de vital importancia en el desarrollo de cualquier ingenio azucarero.

Actualmente el concepto de azúcar recuperable es el que predomina en cualquier ingenio, ya que es el que está relacionado con la rentabilidad agroindustrial. Este concepto puede ser evaluado de diferentes maneras. La implementación un sistema de medición de calidad de caña de estas características no es sencillo y basta con advertir cómo los diferentes sistemas aplicados en los países azucareros han sido siempre motivos de controversias entre las partes. A continuación se describe los aspectos de mayor relevancia en el control de la caña.

2.2.1. Recepción de la caña

El control de calidad de la caña inicia en el momento de recepción en el ingenio, donde deben cumplirse ciertas características de calidad, tales como: fresca, madurez, limpieza, sin presencia de hongos, enfermedades, daño de plagas, ni carbonizadas, etc. Dichas características son controladas de forma visual a la hora de entrega de la materia prima.

⁵ ROMERO, Eduardo, et. al. *Manual del cañero*. p 209.

Durante la cosecha, se debe tener como meta la entrega de tallos de caña de azúcar de buena calidad a los molinos de la fábrica. La calidad, medida por el contenido de sacarosa y de basura, se reduce por los daños a los que se somete la caña al ser transportada a la fábrica y a la demora de dicha entrega. Por lo general, el deterioro de la caña tiene lugar mediante procesos enzimáticos, químicos y microbianos. Según Chen⁶, el pago basado en la calidad así como el tonelaje, aumenta el incentivo para mejorar la calidad.

2.2.2. Muestreo y control de la caña

Uno de los problemas más complicados en la industria de la caña es el de obtener muestras representativas de la misma, así como diversos productos de las diferentes etapas del proceso. Además, el control de la características de calidad de la caña, su recepción y rechazo se convierten en uno de los procesos más complejos en la producción de azúcar, debido a que se ven involucrados muchos factores e intereses tales como las cuotas de los proveedores, estado de la caña, azúcar recuperable, etc.

La dificultad en la toma de muestra de la caña es causada por las variaciones significativas en la caña procedente de un mismo lote, incluyendo las provenientes de varios sitios de un campo pequeño. De acuerdo con Chen (2000) es extremadamente difícil obtener una muestra de caña de azúcar de tamaño moderado que sea lo bastante representativa de un campo.

Para cualquier método aplicado al control de la caña, a manera de tener información veraz y confiable, es necesario definir con claridad el procedimiento de control de recepción, muestreo y análisis de la caña.

⁶CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. p. 807

Los métodos para muestrear caña convencional consisten en esperar su llegada a la fábrica, posteriormente se muelen o desintegran varias cargas por separado y se analiza el jugo. La toma de muestra de la caña es esencial para determinar los planes de pago.

Para lograr un eficaz muestreo es necesario aplicar de mejor manera los siguientes factores: la homogeneidad, el tamaño de la muestra y frecuencia del muestreo. En cuanto a la homogeneidad, se debe seleccionar las muestras de la forma más homogénea posible, para que refleje de mejor manera las características de la calidad de la caña, es decir sea representativa. El tamaño de la muestra debe estar en función del método de análisis aplicado, aunque se debe considerar tomar muestras de la menor masa posible, debido a que sus costos de análisis y manipulación se reducen con muestras de menor tamaño.

La frecuencia de muestreo depende de las políticas de la empresa y de los recursos humanos y materiales con que se cuente. Lo ideal es tener muestreo lo más frecuente posible de la caña que ingresa, aunque esto no es práctico ni económico. Generalmente, cuando la caña es pesada en el ingreso, el programa de calidad define qué unidades de transporte, deben ser muestreadas.

La toma de muestras en la fábrica de un ingenio puede ser manual o mecanizada. Actualmente, los métodos mecanizados se han extendido mucho, y los dispositivos son relativamente simples, de costos moderados y de fácil mantenimiento, además de que reducen el costo de mano de obra y preferencias personales al momento del muestreo.

Según Chen⁷, el muestreo mediante la perforación de muestras de una masa de caña en vagones ha sido desarrollado en los últimos años. Según Diez *et al.*⁸ el que ha alcanzado mayor difusión en la industria cañera es el muestreador conocido como *core sampler*, como el presentado en la figura 2.

Figura 2. **Vista general de un core sampler**



Fuente: ROMERO, Eduardo. Manual del cañero. p. 214.

Las tomas o núcleos obtenidos a través del muestreador son sometidos a un submuestreo para seleccionar la porción a la cual se le aplicará el análisis en el laboratorio. Una de las técnicas más comunes es someter la caña obtenida del muestreador a un desmenuzador o desintegrador, para convertirla en fibra, y después ser homogeneizada y pesada para obtener la submuestra deseada.

2.2.3. Procedimientos analíticos

Una vez que se haya obtenido una porción de caña desfibrada y homogenizada, se toma una submuestra de peso determinado, para ser analizada por diferentes procedimientos analíticos.

⁷CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. p. 807.

⁸ DIEZ, Oscar; DIGONZELLI, et al. *Control de calidad en la materia prima*. p. 207-217.

Los parámetros más importantes y que definen la calidad de la caña son el porcentaje de sacarosa y de fibra. El porcentaje de sacarosa se conoce en la industria cañera como grado pol de la caña, siendo ambas medidas equivalentes.

Para obtener los grados pol de la caña y el porcentaje de fibra, existen un sin número de métodos que se aplican en diversos países, como se explicará posteriormente. Sin embargo, los procedimientos analíticos que se aplican son básicamente los mismos, o se basan en los mismos principios. Entre estos procedimientos cabe resaltar la polarimetría, la determinación de sólidos totales y la determinación del contenido de humedad.

2.2.3.1. Polarimetría

Cuando un haz de luz ordinaria se hace vibrar a través de un solo plano por varios dispositivos ópticos, se dice que la luz está polarizada en un sentido, denominado plano de polarización. Muchas sustancias, tales como las soluciones de sacarosa y otras azúcares, tienen una propiedad de hacer girar el plano de polarización. El ángulo al cual es rotado el plano, se conoce como ángulo de polarización, y puede ser determinado por medio de instrumentos ópticos.

Según Chen⁹, cuando un rayo de luz polarizada pasa a través de una solución de sacarosa, o de cualquier azúcar, la rotación varía con la concentración de la solución, la longitud de celda, la longitud de la onda de luz y la temperatura. Si la longitud de celda, la longitud de la onda y la temperatura permanecen constantes, la rotación queda definida dependientemente de la concentración de azúcar en la muestra. Al medir la rotación en las condiciones

⁹CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. p. 685.

constantes mencionadas, se puede determinar la concentración del azúcar presente.

El instrumento que se emplea en la determinación cuantitativa de azúcares por medios ópticos se conoce con el nombre de polariscopio. Para el caso de determinación de sacarosa, se denomina polarímetro o sacarímetro.

Los polarímetros empleados en las industrias azucareras son calibrados específicamente para tales fines. En la figura 3, se muestra un polarímetro de uso común en la industria de la caña de azúcar; además en la figura adjunta pueden verse tubos de observación donde es vertida la muestra que se va a analizar. Los tubos de polariscopio se diseñan para facilitar el llenado, evitar la rotura y reducir la reflexión en las paredes. Puesto que la rotación total es proporcional a la longitud de la trayectoria, es necesario que el tubo tenga una gran precisión en su longitud entre las placas de los extremos; generalmente, la longitud es de 2 decímetros (20 cm), aunque existen de otras.

Figura 3. Vista de un polarímetro digital y los tubos de observación



Fuente: CHEN, James. Manual de azúcar de caña. p. 703.

Cuando se analiza el jugo extraído de una porción de caña de azúcar es necesario preparar una solución que esté totalmente clarificada, libre de color y turbiedad. Existen varios métodos propuestos por la Comisión Internacional de Métodos Uniformes para el Análisis del Azúcar (ICUMSA, por sus siglas en inglés) para lograr tales fines.

Uno de los métodos más utilizados es emplear cierta cantidad de subacetato de plomo. La cantidad de este reactivo debe ser la mínima posible para obtener una solución clara y suficientemente coloreada. Dicho método de clarificación se conoce como método del subacetato seco de Horne. Posterior a la clarificación se procede a filtrar la solución final para obtener una solución libre de materias extrañas. La solución es entonces vertida en el tubo de observación y se analiza en el polarímetro, obteniendo la lectura del aparato.

La lectura o escala del polarímetro está calibrada en unidades conocidas como grados de azúcar (S). Esta lectura se establece de tal manera que 26 gramos de sacarosa pura en 100 ml de solución, indique una lectura de 100 grados de azúcar (100 S) en un tubo de 2 decímetros, a una longitud de onda de 546,23 nm. Por lo tanto, una solución conformada solo por agua destilada posee una lectura de cero grados de azúcar (0 S).

En los jugos de las cañas, generalmente se encuentran otros azúcares ópticamente activos diferentes a la sacarosa, como la glucosa y fructosa, que podrían afectar el resultado. Sin embargo, en la industria y el comercio, se considera que la lectura representa el porcentaje de sacarosa presente en el material analizado. La lectura obtenida es llamada polarización directa y muchas veces se abrevia como pol.

2.2.3.2. Refractometría

Cuando un rayo de luz pasa con determinado ángulo de un medio a otro, por ejemplo del aire al agua, los rayos de luz se desvían o refractan. La cantidad que se desvía la luz es proporcional a la velocidad de la luz en los dos medios. La medida de la cantidad de desviación de la luz se conoce como índice de refracción. El índice de refracción varía con la temperatura, la longitud de onda de la luz y la cantidad de sólidos disueltos. Por lo tanto, el índice de refracción de una solución de sacarosa pura es una medida del contenido de sacarosa.

El aparato de medición empleado en las fábricas de azúcar para determinar el índice de refracción son los refractómetros. Estos dispositivos se encuentran estandarizados para que el valor del índice de refracción sea leído como porcentaje de sólidos disueltos en la lectura del respectivo aparato. Esta unidad es también conocida como grados brix, y es una representación de porcentaje en peso de sólidos disueltos en la solución que se analiza.

Los sólidos disueltos en el jugo de la caña de azúcar son principalmente azúcares simples, como la glucosa y fructosa, y en mayor proporción, sacarosa. Por lo tanto, los grados brix refractométricos indican la cantidad de estos azúcares disueltos en solución.

Cuando se determina el brix de una solución debe tenerse cuidado de que la misma no tenga sólidos en suspensión, por lo que es conveniente filtrar las muestras previo a someterlas a la determinación de sólidos solubles.

2.3. Métodos para el análisis y evaluación de la caña de azúcar

Se han desarrollado varios procedimientos analíticos especializados para la caña de azúcar, basados en diferentes métodos y fórmulas. A continuación se describen brevemente, los métodos existentes y la forma de obtener los valores para emitir un resultado que permita evaluar la calidad de la caña de azúcar. Estos métodos pueden clasificarse en dos grandes grupos: indirectos y directos.

2.3.1. Métodos indirectos

En estos métodos, la valoración de calidad de la caña está basada en el análisis de los jugos primarios o de primera extracción. La muestra es tomada del jugo extraído por una desmenuzadora o el primer molino del tándem de la fábrica, y en algunos casos son muestras del jugo primario, entendiéndose a este como el jugo de la caña sin dilución.

Al utilizar estos métodos, deben tomarse las precauciones necesarias para evitar la mezcla de caña de diferentes agricultores en el conductor principal del tándem de molienda. Según Diez et al.¹⁰, durante años se ha insistido y resaltado en las dificultades que se presentan al proceder a la determinación exacta del contenido de sacarosa de una muestra de caña, por múltiples implicaciones que conlleva: muestreo defectuoso, dificultad del proceso, incertidumbre por participación humana, entre otros.

Las desventajas de estos métodos radican en que las mediciones de sacarosa dependen del porcentaje de jugo extraído, es decir, de las características operacionales de los molinos. Además, dichos métodos no

¹⁰ DIEZ, Oscar, et al. *Control de calidad en la materia prima*. p. 207-217.

toman en cuenta el efecto del contenido de fibra de la caña de extracción y las pérdidas por deficiencia en la fábrica.

Para la aplicación de los métodos es necesario realizar dos determinaciones fisicoquímicas sobre el jugo muestreado:

- El contenido de sólidos solubles totales (Brix)
- El contenido de sacarosa aparente (Pol)

La determinación de grados Brix se efectúa por lectura en un aerómetro con escala en grados Brix a temperatura controlada, o por la determinación con refractómetro. En ambos casos, debe observarse la ausencia de material en suspensión y de aire incluido, ya que inciden en el resultado final.

La determinación de pol de jugo se puede realizar sobre lectura directa de una submuestra clarificada, o aprovechando la definición del grado sacarimétrico sobre una solución de 26 gramos de jugo, disuelta hasta 100 ml, con agua destilada libre de materia orgánica. A su vez, cada determinación puede efectuarse con polarímetros ópticos o digitales.

El valor más importante es el pol de la caña, ya que representa la sacarosa real en la caña, y no el pol del jugo. En este método, la pol caña se calcula indirectamente a partir de la pol del jugo, utilizando el denominado factor Java, realizando así una estimación teórica del contenido de fibra de la caña, que le quita precisión a la determinación de la pol caña y que constituye la principal desventaja del sistema.

2.3.2. Métodos directos

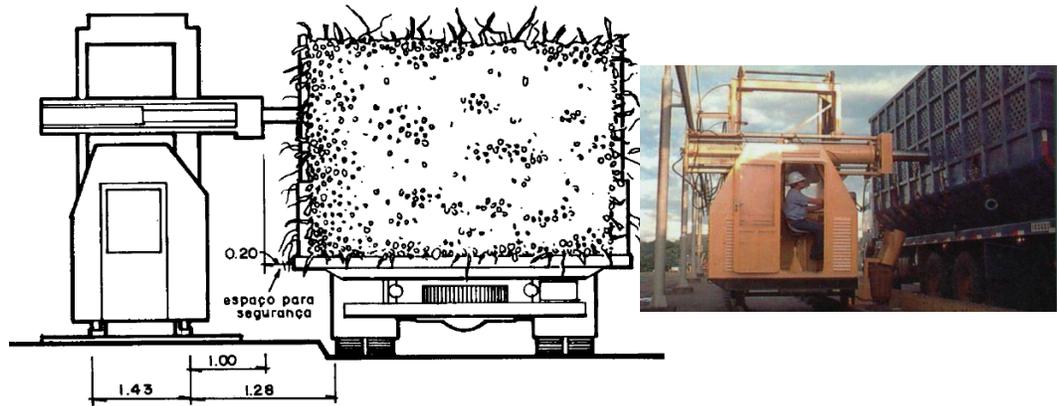
La característica principal de estos métodos reside en que se evalúa la calidad de la materia prima en una muestra de caña tomada antes de la molienda, además es posible evaluar el contenido de fibra. La muestra es tomada directamente del transporte, lo que asegura la individualidad de la muestra. La desventaja es que debido al reducido tamaño de la muestra sobre la cual se realizan los análisis, tiene una menor representatividad que la muestra del sistema indirecto.

La muestra de caña que se va a analizar, se extrae mediante una sonda de un muestreador industrial conocido como *core sampler*. Esta sonda penetra en el cargamento de materia prima en forma horizontal u oblicua (generalmente 50°). En función del diámetro de la sonda se extraen muestras entre 6 y 12 kg de caña de azúcar.

Existen dos tipos de máquinas muestreadoras diseñadas y muy utilizadas en la agroindustria. El primer tipo consiste en un tubo o sonda rotatoria de 10 pulgadas de diámetro que perfora horizontalmente a través de la carga del camión cargado (figura 4). Las muestras tomadas con este tipo de dispositivo son de alrededor de 30 libras de caña, equivalentes, aproximadamente, a un 0.08% del peso total de las 20 toneladas por camión.

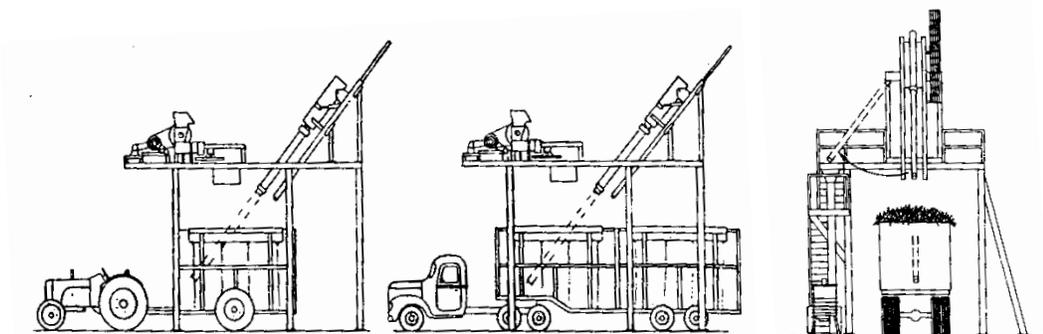
El segundo tipo tiene una sonda sacamuestras de 8 pulgadas de diámetro que está montada sobre un eje para entrar a un ángulo de 50° a través de la parte superior de la carga. A este dispositivo se le conoce comúnmente como muestreador por perforación de tipo inclinado o *core sampler* tipo inclinado. En la figura 5, se muestran diagramas de este dispositivo.

Figura 4. **Muestreador por perforación horizontal**



Fuente: CONSECAN-SP. Manual de instruções. p. 41.

Figura 5. **Muestreador por perforación tipo inclinado**



Fuente: CHEN, James. Manual de açúcar de caña. p. 810.

Las muestras obtenidas a través del *core sampler* son sometidas a un desmenuzador o desfibrador para convertir la caña en fibra. Esto con el fin de tener muestras más homogéneas y de fácil manejo. La figura 6 muestra un desfibrador de cuchillas para realizar tal fin; en la figura adjunta se observa la apariencia de la caña luego de someterla al desmenuzador.

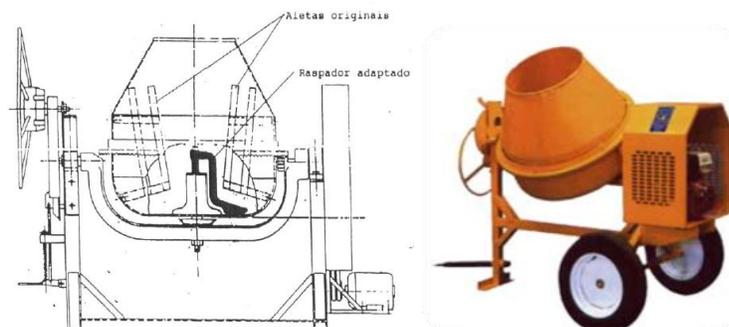
Figura 6. **Equipo desfibrador de caña**



Fuente: ROMERO, Eduardo. Manual del cañero. p. 214.

Posteriormente, la muestra desfibrada se somete en un homogeneizador tipo mezclador (figura 7) con el fin de tener una muestra uniforme para el análisis de laboratorio.

Figura 7. **Equipo homogeneizador tipo mezclador**



Fuente: CONSECAN-SP. Manual de instruções. p. 44.

Una vez que se ha tomado una muestra del transporte que entra a la fábrica a través del *core sampler*, se desfibra y se homogeneiza con el equipo adecuado. Entonces, se procede a tomar una cantidad de peso determinada de la muestra, para posteriormente ser analizada en el laboratorio. La ventaja del método directo consiste en la posibilidad de conocer la composición de la caña y su rendimiento esperado, sin necesidad de incorporar factores de fábrica en los cálculos.

Según Diez et al.¹¹, desde su implementación hasta nuestros días, el sistema de análisis directo fue objeto de modificaciones, con el fin de poder predecir cada vez con mayor exactitud, el azúcar posible de recuperar.

Dos metodologías de análisis directo han sido implementadas para fines de investigación y evaluación química de la caña, estos son los métodos directos de desintegración húmeda y los métodos directos de la prensa hidráulica. Por otra parte, han surgido algunos métodos que combinan las dos metodologías para determinar los parámetros de calidad con mayor exactitud.

2.3.2.1. Métodos de desintegración húmeda

Consisten en tomar una muestra de peso conocido de caña desfibrada junto con una cantidad determinada de agua, para posteriormente desintegrarla en una licuadora o desintegrador industrial. El tiempo de desintegración depende del método que se emplee, al igual que la cantidad de masa de muestra y agua. En la figura 8, puede apreciarse algunos modelos empleados para la desintegración húmeda de caña. El desintegrador húmedo está conformado generalmente por un recipiente metálico y un eje giratorio con cuchillas afiladas impulsadas por un motor eléctrico.

¹¹DIEZ, Oscar, et al. Control de calidad en la materia prima. p. 207-217

Figura 8. **Equipo de desintegración húmeda**



Fuente: The Jamaican Association of Sugar Technologists. *Manual of analytical methods*. p. 9.

Posteriormente, se filtra y analiza el componente líquido para determinar el brix, el pol y la pureza. El brix se obtiene por medio de la lectura refractométrica del jugo obtenido. Para determinar el pol de la caña, se toma una parte del jugo, se clarifica con subacetato de plomo seco y luego se mide su lectura de polarización. Posteriormente, mediante diferentes ecuaciones y factores, se procede a la determinación del pol de caña. Para el cálculo del porcentaje de fibra, se determina la humedad de la caña desfibrada por medio de la diferencia de peso, al someterla en un horno de secado. Luego, empleando fórmulas, que dependen del método, se determina el porcentaje de fibra de la caña.

El análisis directo de desintegración húmeda, ha sido adoptado en países como Colombia y África del Sur, para obtener información de la composición de la caña, especialmente sobre el porcentaje de fibra, de sacarosa y brix de la caña.

Los métodos directos de desintegración más conocidos por la industria azucarera son:

- Método de desintegración COPERSUCAR
- Método de desintegración oficial GS5/7-1 ICUMSA
- Método Van-Hengel

2.3.2.2. Métodos por prensa hidráulica

También conocido como método del jugo prensado o por vía seca. Estos se basan en tomar una muestra de peso conocido de caña desfibrada, la cual se somete a una extracción por medio de una prensa hidráulica a una alta presión y un tiempo establecido. De ahí, se obtiene una fase líquida, denominada jugo, y una parte sólida, denominada bagazo o torta húmeda; dichas fases se analizan posteriormente en el laboratorio. En la figura 9 se observa la vista general de algunas prensas hidráulicas comerciales.

Figura 9. **Prensas hidráulicas comerciales**

Fotografía 1



Fotografía 2



Fuente: fotografía 1, ROMERO, Eduardo. Manual del cañero. p. 215; fotografía 2, tomada en el laboratorio del ingenio azucarero.

Por medio de la masa de la torta húmeda, se obtienen los datos de porcentaje de bagazo y porcentaje de jugo obtenido, los cuales son empleados para cálculos posteriores. A la fase líquida se le determina pol, brix y pureza por análisis fisicoquímicos, mientras que a la fase sólida, el porcentaje de humedad. A partir de este conjunto de datos se determina el porcentaje de fibra, sacarosa y brix en la caña, además del rendimiento teórico.

Los métodos directos por prensado hidráulico más utilizados en las industrias azucareras, son:

- Método de la prensa hidráulica TECNICAÑA
- Método de la prensa hidráulica TANIMOTO, COPERSUCAR
- Método de la prensa hidráulica CONSECANA

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables empleadas en esta investigación se resumen en la tabla II, como variables dependientes e independientes. Las dependientes fueron las que se analizaron al final de la investigación, y a partir de ellas se extrajeron los resultados y conclusiones del estudio, y las variables independientes fueron las que se obtuvieron en el momento de la aplicación de la metodología.

Tabla II. **Variables de estudio empleadas en la investigación**

Variable	Unidad de medición
Dependientes	
Pol de caña	% p/p
Porcentaje de fibra en la caña	% p/p
Tiempo de análisis	Min
Costo variable unitario de análisis	Q./muestra
Independientes	
Brix	°Brix (%p/p)
Polarización directa	S (grados de azúcar)
Pol	% p/p
Peso de torta húmeda	Gramos (g)
Peso de torta seca	Gramos (g)
Humedad de caña o bagazo	%

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Variables dependientes

Las variables dependientes en la investigación fueron el pol de caña y porcentaje de fibra, entre otras, ya que estas fueron las variables de respuestas que obtuvieron a través del estudio, influenciadas por los datos recolectados.

3.1.1.1. Pol de caña

- Definición conceptual:
 - Valor del contenido aparente de sacarosa en una muestra de caña.¹
- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: contenido en porcentaje de sacarosa en la caña. Se reporta como porcentaje en peso de sacarosa (%p/p).
 - Indicador: porcentaje de sacarosa en peso.

3.1.1.2. Porcentaje de fibra en la caña

- Definición conceptual:
 - Contenido de sólidos secos insolubles en agua, en la caña de azúcar.²
- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: la cantidad de materia seca insoluble en agua, contenida en la caña de azúcar. Se reporta como porcentaje en peso (% p/p).
 - Indicador: porcentaje de fibra en peso.

¹ ROMERO, Eduardo, et al. *Manual del cañero*. 2009.

² *Ibíd.*

3.1.1.3. Tiempo de análisis

- Definición conceptual:
 - Intervalo de tiempo necesario para ejecutar el análisis de una muestra.

- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: el tiempo que ocupa un analista para aplicar un análisis de una muestra, aplicando un método determinado. El intervalo de tiempo puede ser para un paso determinado o para el análisis completo. Este valor se mide en minutos.
 - Indicador: minutos de análisis (min).

3.1.1.4. Costo variable unitario de análisis

- Definición conceptual:
 - Es la distribución del costo variable total entre todas las unidades producidas.

- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: es el costo al cual se incurre al aplicar un método determinado a una muestra de caña, tomando en cuenta solamente el consumo energético y de reactivos químicos, asociados directamente al método analítico.
 - Indicador: precio o costo por muestra (Q. /muestra).

3.1.2. Variables independientes

Las variables independientes en la investigación fueron el brix, la polarización directa, los pesos de torta y la humedad, entre otras. Estas variables, fueron las propiedades que definían las propiedades individuales de cada muestra de caña analizada, para luego analizar los datos obtenidos.

3.1.2.1. Brix

- Definición conceptual:
 - Contenido de sólidos disueltos en 100 gramos de solución.³
- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: contenido en porcentaje de peso de sólidos solubles en agua, contenidos en una muestra de jugo o extracto. Se representa como porcentaje en peso (% p/p).
 - Indicador: porcentaje en peso de sólidos solubles.

3.1.2.2. Polarización directa

- Definición conceptual:
 - Es el valor que resulta de dividir linealmente una escala construida entre la lectura de la rotación del plano de luz polarizada a 546,23 nm del agua y la de una solución de sacarosa pura de 26 gramos en 100 ml, ambas contenidas en un tubo de 200 mm de longitud. Esta lectura se establece de tal manera que 26 gramos de sacarosa pura en 100 ml de solución, da una lectura en el polarímetro de 100 grados de azúcar (100 S), por lo tanto el agua pura destilada se

³ ROMERO, Eduardo, et al. *Manual del cañero*. 2009.

define como cero grados de azúcar (0 S), quedando los demás valores dentro de la escala construida.⁴

- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: grados de azúcar internacionales reportados por el polarímetro para una solución de jugo o extracto de caña de azúcar, se representa como °S o como ISS (por su siglas en inglés). Para disoluciones que solo contengan sacarosa pura en agua, el pol es una medida de la concentración de sacarosa presente. Según ICUMSA⁵, para disoluciones que contengan sacarosa y otras sustancias ópticamente activas, pol representa la suma algebraica de la rotación de los constituyentes presentes en el jugo de la caña; la contribución de sacarosa a esta suma, sobrepasa lo suficiente a la de otros constituyentes.
 - Indicador: grado de azúcar internacionales (S).

3.1.2.3. Pol

- Definición conceptual:
 - Valor del contenido aparente de sacarosa en una muestra de solución.⁶
- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: contenido en porcentaje de sacarosa en una solución. Se reporta como porcentaje en peso (%p/p).
 - Indicador: porcentaje de sacarosa (% p/p).

⁴ ROMERO, Eduardo, et al. *Manual del cañero*. 2009.

⁵ International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA). Libro de métodos 2005.

⁶ ROMERO, Eduardo, et al. *Manual del cañero*. 2009.

3.1.2.3. Peso de torta húmeda

- Definición conceptual:
 - Residuo de bagazo de una porción de caña desfibrada, que permanece luego de extraerle el jugo mediante una prensa hidráulica.⁷

- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: porción de una muestra de caña desfibrada que queda, luego de someter la muestra en la prensa hidráulica.
 - Indicador: masa de la torta húmeda en gramos (g).

3.1.2.3. Peso de torta seca

- Definición conceptual:
 - Remanente de la torta húmeda, posterior al secado en un horno a 105°C.⁸

- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: porción de la torta húmeda que permanece luego de introducirla dentro de un horno de secado.
 - Indicador: masa de la torta seca en gramos (g).

3.1.2.3. Humedad

- Definición conceptual:
 - Porcentaje de agua contenida en una muestra sólida.⁹

⁷ BUENAVENTURA, Carlos. *Manual de laboratorio para la industria azucarera* TECNICAÑA. 1989.

⁸ *Ibíd.*

⁹ *Ibíd.*

- Definición operacional:
 - Dimensión de la variable: cantidad de agua contenida en una muestra de caña o bagazo, determinada por la diferencia de peso en una muestra, luego de someterla en un horno de secado.
 - Indicador: porcentaje en peso de agua (% p/p).

3.2. Delimitación del campo de estudio

La delimitación del campo de estudio para esta investigación fueron cinco métodos analíticos para el análisis de la calidad de la caña de azúcar, a continuación se detallan otras especificación del estudio realizado.

3.2.1. Enfoque de la investigación

La investigación que se realizó es de enfoque cuantitativo, debido a que se evaluaron y compararon estadísticamente determinados métodos de análisis de caña de azúcar. Además, durante la investigación se emplearon instrumentos que permitieron observar datos numéricos y el análisis de estos se realizó de forma numérica.

3.2.2. Nivel de la investigación

Se realizó una investigación descriptiva, ya que se sometió a análisis determinados métodos ya establecidos en otros laboratorios y diversos países. Utilizar los métodos bajo ciertas condiciones, implicó dar un resultado que describía la aplicabilidad de los mismos. Según Hernández Sampieri, Fernández y Baptista¹⁰, los estudios descriptivos buscan especificar las

¹⁰ HERNÁNDEZ, Sampieri; FERNÁNDEZ, Roberto y BAPTISTA, P. *Metodología de la investigación*. p. 45.

propiedades importantes de personas, grupos o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis, lo que coincide con los objetivos de la investigación. Además, cabe resaltar que no se realizó ninguna manipulación de variables, ya que estas solo se observaron y describieron.

3.2.3. Tipo de investigación

El estudio que se realizó es una investigación aplicada, ya que se basó en resolver un problema práctico. Además, la investigación no permitió profundizar para explicar un fenómeno determinado. Por otra parte, se aplicaron los conocimientos adquiridos en las distintas ramas de la ingeniería química y de la literatura bibliográfica, para establecer una única metodología.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Marvin Ottoniel Estrada Cardona
- Asesor: Ing. Félix René Morales Magarín

3.4. Recursos materiales disponibles

Los medios físicos que se emplearon para alcanzar los objetivos de la investigación se clasificaron en dos grupos: los reactivos de carácter químico y el equipo utilizado para hacer los análisis respectivos.

3.4.1. Reactivos

Dentro de la investigación se utilizaron reactivos químicos proporcionados por el laboratorio del ingenio azucarero, a continuación se describen en forma general.

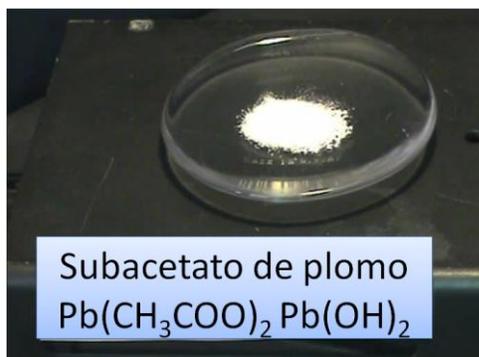
3.4.1.1. Subacetato de plomo

El subacetato de plomo es un polvo pesado, blanco e inodoro. Se utiliza como agente decolorante en el azúcar y como sustancia química en los análisis químicos. Esta sustancia figura en la lista de sustancias peligrosas.

Se recomienda su uso como clarificante o floculante, en muestras contaminadas con sustancias solubles, teniendo una acción que le permite en pocos segundos, obtener una muestra clara para posteriores análisis.

- Sinónimos: acetato básico de plomo
- Fórmula química: $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$

Figura 10. **Subacetato de plomo**



Fuente: fotografía tomada en el laboratorio del ingenio azucarero.

3.4.1.2. Octapol

Es un nuevo reactivo químico sin plomo, desarrollado por Baddley Chemical Inc., para la clarificación de materiales que contienen sacarosa con anticipación al análisis polarimétrico. Posee una apariencia similar a la del subacetato de plomo.

3.4.1.2. Tierra silíceas

También conocida como tierra de diatomeas, DE, TSS, diahydro o celite, es un polvo de rocas sedimentarias silíceas formadas por microfósiles de diatomeas, algas marinas unicelulares que secretan un esqueleto silíceo.

Este material sirve de medio de filtración; su granulometría es ideal para la utilización como coadyuvante de filtración. Se utiliza para las filtraciones en química y en la fabricación de la cerveza. Se ha utilizado, en particular, para estabilizar la nitroglicerina, y formar con ella la dinamita. También tiene otras aplicaciones como agente abrasivo para el pulido de metales, y en los dentífricos.

3.4.2. Cristalería

- Balones aforado boca ancha Kohlrausch
- Beackers
- Erlenmeyers
- Probetas
- Bandejas de secado
- Espátulas
- Goteros
- Embudos

3.4.3. Equipo

- Muestreador *Core Sampler* de perforación horizontal, montada en plataforma, que permite movimiento horizontal del carro y vertical de la sonda. Potencia eléctrica de 60 HP. Diámetro de sonda de 203 mm con

3 mm de espesor y de 400 rpm, con capacidad de extracción de 13 kg (figura 11).

- Desfibradora de cuchillas con potencia de 5 HP y de corriente alterna de 220V. (véase figura 6).
- Homogeneizador tipo mezclador, con capacidad de 300 litros y con potencia eléctrica de 3 HP (véase figura 7).
- Prensa hidráulica para extracción de jugo de caña, marca CODISTIL/DEDINI, potencia total de 5 HP y una presión de trabajo de 250 Kg/cm² (3500 PSI). Regulada en un tiempo de prensado de 60 segundos. (figura 12).
- Balanza digital, voltaje 8-14.5V, frecuencia 50/60 Hz. Máxima capacidad 520 g, lectura mínima 0,01 g.
- Desintegrador húmedo tipo sudafricano con capacidad de 3 litros y velocidad de operación de 3500 RPM. Motor eléctrico trifásico, 220 V y 11,45 A, y con potencia de 3,4 HP (Véase figura 13).
- Agitador mezclador de laboratorio de hélice. Potencia de motor de 30W. (figura 14).
- Polarímetro digital, marca Rudolph Research Analytical, sensibilidad de 0.02 S. 100-240 volts, 50- 60 Hz. Potencia eléctrica de 50W.(figura 15)
- Refractómetro digital automático, marca Rudolph Research Analytical, con control de temperatura, sensibilidad de 0,01 °Brix. 100-240 volts, 50-60 Hz. Potencia eléctrica de 5W (figura 16).
- Horno de secado de laboratorio con temperatura de operación automática (105°C), 120V y 13,5 A, con potencia nominal de 1,6 KW (2.2 HP).

Figura 11. **Muestreador Core Sampler**



Fuente: fotografía tomada en el laboratorio del ingenio azucarero.

Figura 12. **Prensa hidráulica**



Fuente: fotografía tomada en el laboratorio del ingenio azucarero.

Figura 13. **Desintegrador húmedo**



Fuente: fotografía tomada en el laboratorio del ingenio azucarero.

Figura 14. **Agitador mezclador**



Fuente: The Jamaican Association of Sugar Technologists. Manual of analytical methods. p. 9.

Figura 15. **Polarímetro digital**



Fuente: fotografía tomada en el laboratorio del ingenio azucarero.

Figura 16. **Refractómetro digital**



Fuente: fotografía tomada en el laboratorio del ingenio azucarero.

3.5. Técnica cuantitativa

A continuación se describe de manera detallada la metodología cuantitativa empleada para la confirmación de las hipótesis planteadas en la investigación.

3.5.1. Comparación de los métodos analíticos para la evaluación de la caña de azúcar

Para realizar la comparación de los métodos de evaluación de la calidad de la caña de azúcar, se analizaron 30 muestras de caña seleccionadas totalmente al azar, durante un tiempo comprendido de tres semanas; el equivalente a 15 días de experimentación. Los parámetros evaluados para cada muestra fueron el porcentaje de sacarosa en la caña, conocido como pol de caña, y el porcentaje de fibra. Cada muestra seleccionada fue analizada por cinco métodos diferentes seleccionados, para efectuar un total de 150 análisis.

Para la toma y selección de la muestra se empleó la metodología propuesta por el Consejo de productores de caña de azúcar, azúcar y alcohol del estado de San Paulo (CONSECANA-SP, por sus siglas en portugués). Seleccionada la muestra, se procedió a aplicar los 5 métodos propuestos. De estos métodos, tres de ellos se clasifican como directos por prensado hidráulico, uno como método directo por desintegración húmeda, y el otro como método directo combinado, ya que integran ambas metodologías mencionadas.

En general, los métodos aplicados se resumen de la siguiente forma:

- De desintegración húmeda GS5/7-1 ICUMSA
- De la prensa hidráulica CONSECANA-SP
- De la prensa hidráulica TANIMOTO
- De la prensa hidráulica TECNICAÑA
- Balance de masa

Los procedimientos detallados de cada método que se aplicó, se describen en la sección de anexos, así como los cálculos para obtener las variables de respuestas deseadas.

3.5.1.1. Preparación de la muestra

El muestreo de la caña se realizó según normas CONSECANA-SP 2006, por medio de una sonda mecánica horizontal (*core sampler*) introducida aleatoriamente en por lo menos tres puntos de la carga de un vagón. Estos puntos estaban distribuidos de tal forma que no coincidían de forma vertical ni horizontal; de preferencia se realizaron de forma oblicua, cuando las condiciones lo permitían. Las porciones obtenidas de la forma descrita, se introducían en un mismo recipiente plástico, conteniendo finalmente unas 20 libras de caña, para formar una muestra.

Posteriormente, la muestra extraída era desintegrada por medio de una desfibradora de cuchillas. Inicialmente, se pasaba una pequeña cantidad de caña con el fin de evitar su mezcla o contaminación con muestras anteriormente analizadas. Esta porción se desechaba, procediendo seguidamente a pasar el resto de la muestra. La muestra desfibrada se homogenizaba en un mezclador rotatorio durante aproximadamente un minuto. Se extraía de él, y se llevaba a la siguiente fase del laboratorio, para aplicar los métodos respectivos. En la figura 17 se resume el procedimiento para la toma de muestra.

Figura 17. **Procedimiento para la preparación de la muestra**



Fuente: elaboración propia.

3.5.1.2. Métodos analíticos

En esta sección se engloba de forma general los métodos utilizados en la investigación; para mayor detalle se recomienda observar la sección de anexos.

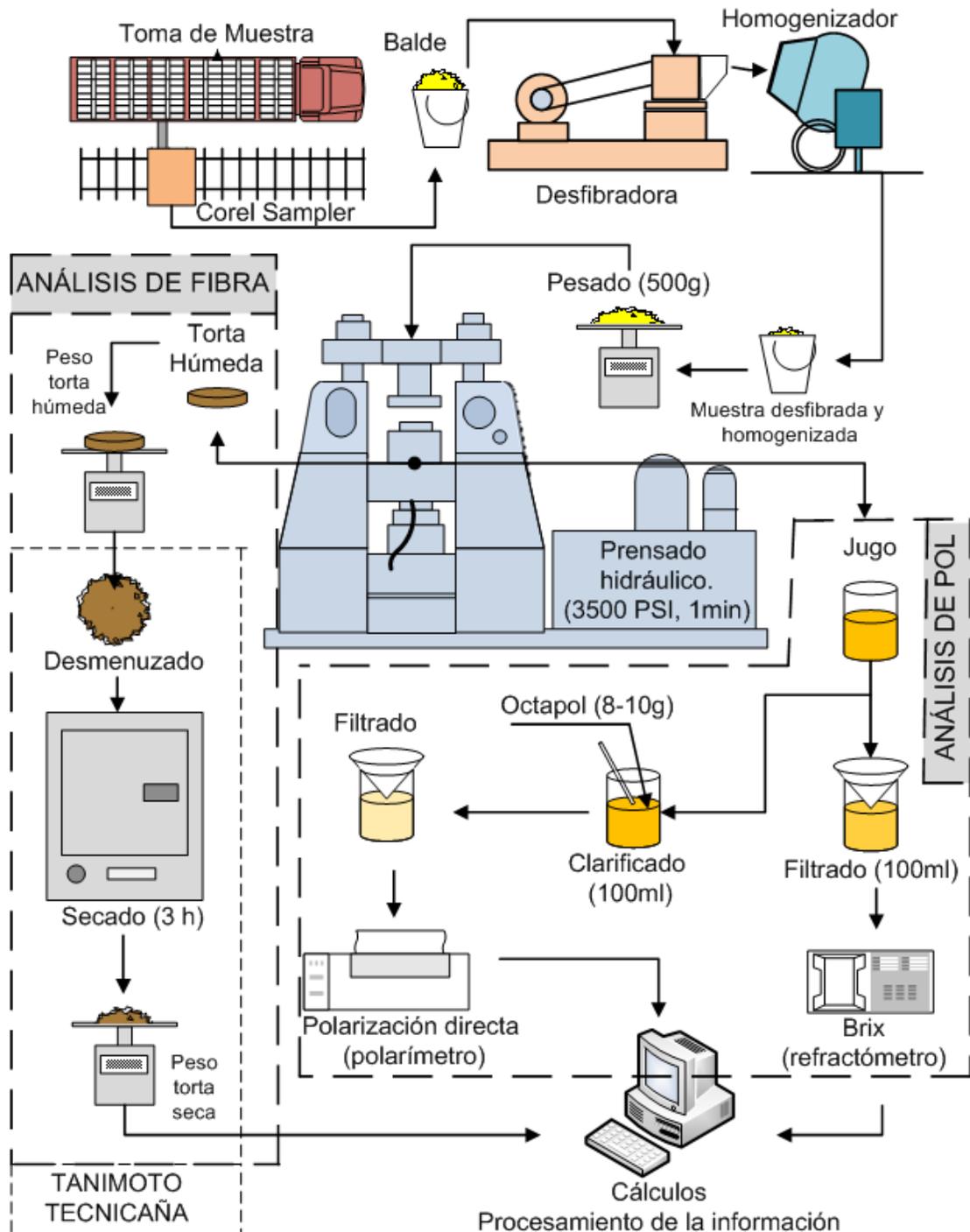
En la figura 18, se diagrama la secuencia de pasos que se aplicó para los métodos directos por prensa hidráulica, tanto para la determinación de pol de caña como porcentaje de fibra. Como se ha mencionado, tres de los cinco métodos emplean este principio, específicamente, CONSECANA, TANIMOTO y

TECNICAÑA. La muestra, desfibrada y homogenizada, fue pesada para seleccionar de ella una submuestra de 500 gramos. Esta se sometió a una prensa hidráulica con una presión de trabajo de 3500 PSI durante un minuto.

Del paso anterior, se obtuvo una porción de jugo y una de bagazo, a la cual se le denomina comúnmente torta húmeda. Una porción del jugo se le analizó el brix, mientras que otra porción se clarificó con octapol, para luego determinar su polarización directa. Mientras tanto la torta extraída de la prensa, se pesó en una balanza, y se sometió a un horno se secado a 105°C, para volver a determinar su peso en forma seca. Posteriormente, todos los datos obtenidos fueron computados y a través de los cálculos respectivos, se obtuvieron los valores de pol y porcentaje de fibra de caña.

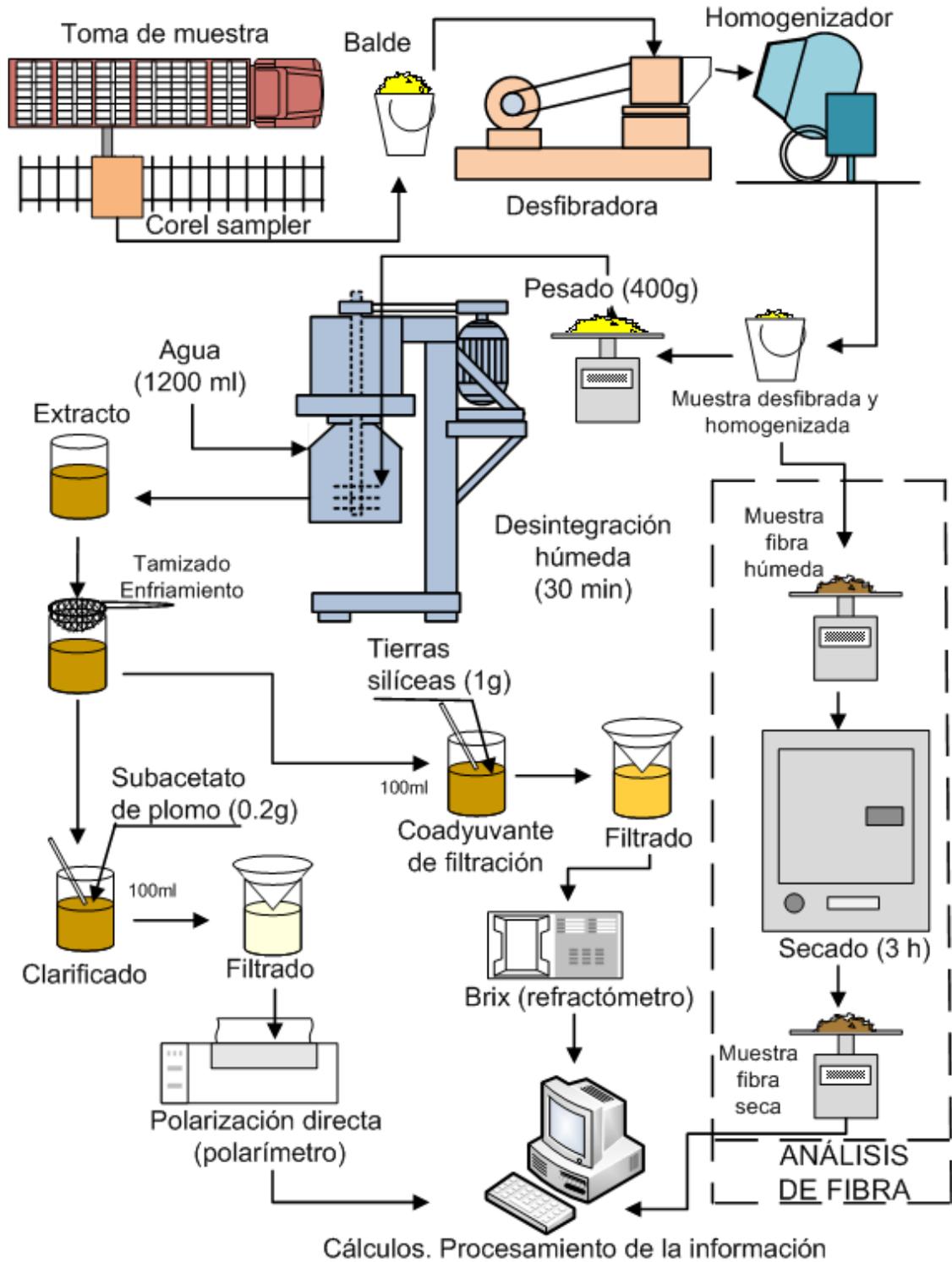
Cabe resaltar, que los métodos de TANIMOTO y TECNICAÑA, en sus ecuaciones para la determinación de porcentaje de fibra, necesitaban del peso de la torta seca luego de someterlo a un horno de secado. Por ello fue necesario el uso de este equipo para determinar la humedad de la torta extraída. Por el contrario, CONSECANA evita el uso del horno de secado, y emplea únicamente el peso de la torta húmeda, para determinar el porcentaje de fibra en la caña.

Figura 18. Diagrama de flujo de los métodos directos por prensa hidráulica



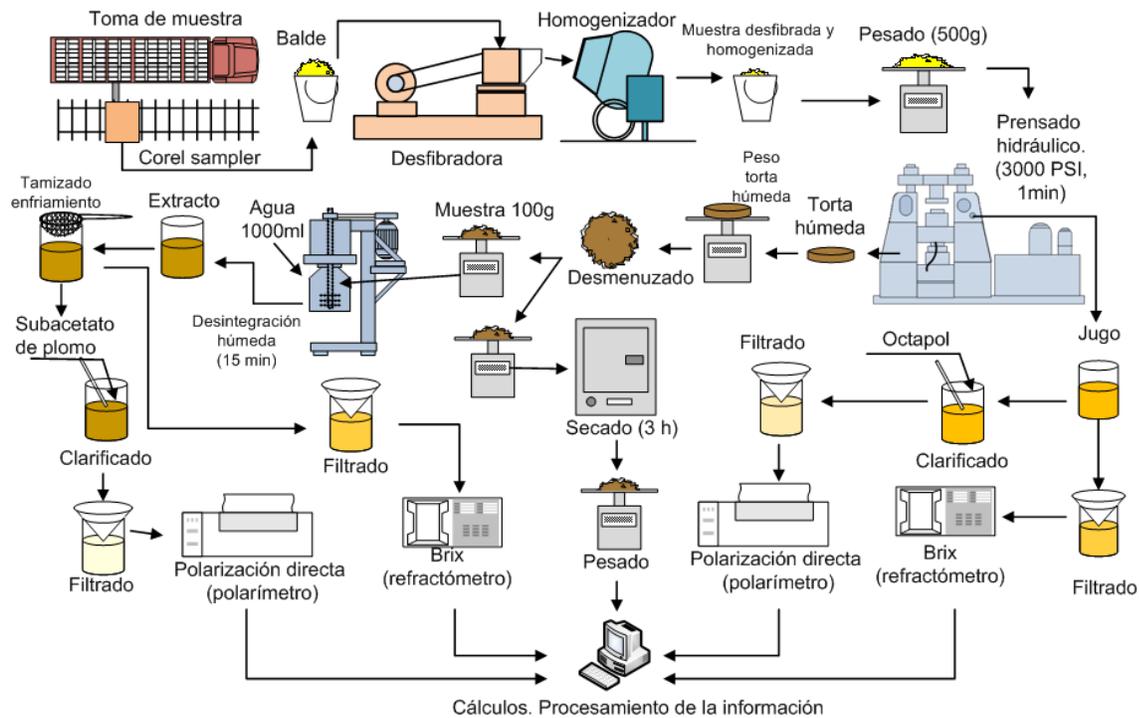
Fuente: elaboración propia. Con referencia de CONSECAN-SP (2006), Buenaventura (1989, p. 43-44), Fernández (2000).

Figura 19. Diagrama de flujo del método de desintegración húmeda



Fuente: elaboración propia. Con referencia de ICUMSA GS5/7-1(1994).

Figura 19. Diagrama de flujo del método de balance de masa



Fuente: elaboración propia. Con referencia de Reyes (1999).

En la figura 19, se aprecia la secuencia de pasos que se aplicó para el método de desintegración húmeda, en particular para esta investigación, el método ICUMSA. Como se observa, en esta metodología, la muestra se debe someter junto con agua a un desintegrador por un lapso de 30 minutos, y el extracto obtenido se analiza por polarimetría y refractometría. Para la determinación de fibra, se tomó una muestra de caña desfibrada y se le determinó la humedad en un horno de secado, para emplearla en los cálculos subsiguientes.

Respecto del método de balance de masa, en la figura 20, se esquematizan los pasos más importantes del método. Su metodología es una

combinación de los dos que se describieron anteriormente, y se caracteriza por analizar por desintegración húmeda, la torta que es extraída de la prensa hidráulica. En general, es una combinación del método de prensa hidráulica y desintegración húmeda para alcanzar datos más exactos. El porcentaje de sacarosa se obtiene por ponderación entre el porcentaje de sacarosa del jugo y de la torta; es por ello que se le denomina método de balance de masa.

3.5.1.3. Tiempo de análisis

Para determinar el tiempo de análisis de cada método, se seleccionaron tres analistas para que efectuaran las cinco metodologías respectivas. Fue tomado el tiempo para cada actividad que realizaba el analista, de tal manera que se obtuvo el tiempo de ejecución de cada paso del análisis. En forma general, cada metodología fue dividida en tres secciones: la toma de muestra, el análisis de pol de caña y el análisis de la fibra de caña. Los valores de tiempo de cada analista se promediaron para tener uno solo, para cada sección y para el tiempo total análisis de cada método. Dichos valores se emplearon para intercomparar los métodos.

3.5.1.4. Análisis económico de los métodos analíticos

Para comparar los métodos de forma económica, se estimó el costo variable de aplicar cada metodología de análisis a solamente una muestra. Se consideró solamente el costo de energía eléctrica y el de los reactivos necesarios para ejecutar cada método; sin considerar costos fijos tales como la mano de obra de los analistas y el costo de ciertos equipos que permanecen conectados a la luz eléctrica durante toda la jornada, tales como la balanza analítica, el polarímetro, el refractómetro, entre otros. Por lo tanto el valor dado del costo obtenido, es solo para fines comparativos.

El cálculo del consumo de energía eléctrica se determinó por la siguiente ecuación 1:

$$\text{Consumo energía} = P \cdot t \quad (1)$$

Donde P , representa la potencia eléctrica del equipo que se está analizando en kilowatts (KW), y t representa el tiempo en horas de uso del equipo durante el análisis de una sola muestra; por lo tanto, el consumo de energía eléctrica se reporta como kilowatt-hora (KWh). El tiempo de uso de cada equipo se extrajo del análisis de tiempo de ejecución de cada método, mencionado en la sección anterior.

Para cada método, se enlistaron los equipos junto con sus potencias eléctricas y tiempos de uso, se calculó el consumo de energía para cada uno de ellos, y se sumaron para obtener el consumo de energía eléctrica para cada método. El consumo de energía se multiplicó por el costo unitario de cada KWh, y de esta manera se obtuvo el costo de análisis por muestra, para cada método, por concepto de energía eléctrica.

Para el costo por reactivos químicos, se enlistaron los reactivos empleados en cada análisis, junto con la cantidad añadida en gramos por muestra y su costo unitario por gramo. La multiplicación de la cantidad añadida de reactivo por su costo unitario, proporcionó el costo del uso del reactivo por muestra analizada.

La suma del costo de energía eléctrica por muestra, más el costo del uso de reactivos, dio como resultado el costo variable por muestra analizada, para cada método en estudio.

3.5.2. Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos

La evaluación de estos dos procedimientos se basó en la metodología propuesta por CONSECAN-SP 2006. Los parámetros considerados fueron la exactitud, precisión y linealidad. Esta evaluación se realizó utilizando variables estadísticas básicas como la desviación estándar y los coeficientes de variación, así como, también regresiones lineales y pruebas de *t-student*.

Para llevar a cabo esta evaluación, se prepararon soluciones con concentraciones conocidas de sacarosa grado reactivo, durante los días que se aplicaron los cinco métodos de análisis de caña, es decir, durante los 15 días de experimentación. Para ello, cada día antes de iniciar la rutina de experimentación, se prepararon cinco soluciones de sacarosa con agua a un determinado porcentaje en peso de sacarosa, dichas valores de concentraciones se presentan en la tabla III. El valor teórico mostrado de la lectura polarimétrica se encontró por medio de las tablas de Schmitz (anexo B).

Tabla III. **Concentraciones de sacarosa grado reactivo de las soluciones estándares empleadas para la evaluación de los procedimientos analíticos**

Solución	Solución (% p/p Sacarosa)	Brix esperado	Lectura polarimétrica esperada (ISS)
1	0	0	0,00
2	5	5	19,56
3	10	10	39,90
4	15	15	61,06
5	20	20	83,08

Fuente: elaboración propia.

Antes de analizar cada solución, se calibró el refractómetro y polarímetro a cero, con agua destilada. Posteriormente, se analizó el brix de la solución y los grados internacionales de azúcar (ISS).

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

El método de recolección para el estudio realizado fue la observación y toma de datos de los análisis realizados, en tablas impresas en papel. Posteriormente, dicha información fue ordenada en hojas de cálculo. A continuación se detalla cada sección de la investigación realizada.

3.6.1. Comparación de los métodos analíticos para la evaluación de la caña de azúcar

La recolección de datos de las 30 muestras analizadas, se realizó durante el periodo comprendido de tres semanas. Se prepararon las tablas con anterioridad y al momento de la experimentación, se rellenaron los campos en tablas impresas en papel. Una vez que se aplicaron los métodos, se extrajeron los datos de los análisis, necesarios para determinar las variables de respuesta.

En la tabla IV, se expone el formato que se empleó para la recolección de los datos de los métodos de prensa hidráulica CONSECANA, TANIMOTO y TECNICAÑA, aplicados a las 30 muestras estudiadas.

Tabla IV. **Formato de tabla de recolección de datos para los métodos de prensa hidráulica**

CONSECANA, TANIMOTO, TECNICAÑA				TANIMOTO, TECNICAÑA		
No.	PRENSA HIDRAÚLICA		JUGO		TORTA (Secado)	
	Peso muestra (g)	Peso torta húmeda (g)	Brix jugo	Polarización directa del jugo (S)	Muestra torta húmeda (g)	Muestra torta seca (g)
1	500					
2	500					
3	500					
⋮	500					
30	500					

Fuente: elaboración propia.

De la misma forma, en la tabla V, se detallan los datos que se obtuvieron al aplicar el método por desintegración húmeda, ICUMSA.

Tabla V. **Formato de tabla de recolección de datos para el método por desintegración húmeda ICUMSA**

No.	DESINTEGRADOR		EXTRACTO		FIBRA	
	Muestra de caña (g)	Cantidad de agua (g)	Brix extracto	Polarización directa del extracto (S)	Muestra fibra húmeda (g)	Muestra fibra seca (g)
1	400	1200				
2	400	1200				
3	400	1200				
⋮	400	1200				
30	400	1200				

Fuente: elaboración propia.

Por último, en la tabla VI, se presenta la tabla utilizada para la recolección de datos para el método de balance de masa.

Tabla VI. **Formato de tabla de recolección de datos para el método de balance de masa**

No	PRENSA HIDRAÚLICA		JUGO		TORTA					
	Peso muestra (g)	Peso torta húmeda (g)	Brix Jugo	Polarización directa del jugo (S)	Muestra torta desintegrador (g)	Agua desintegrador (g)	Brix torta	Polarización directa de torta (S)	Muestra torta húmeda (g)	Muestra torta seca (g)
1	500				100	1000				
2	500				100	1000				
3	500				100	1000				
:	500				100	1000				
30	500				100	1000				

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la recolección de datos para determinar el tiempo de ejecución de los métodos, en la tabla VII se expone un ejemplo respecto del uso de los datos necesarios para el análisis de la información. Dicha tabla es un modelo de ejemplo para la aplicación de los métodos CONSECANA, TANIMOTO y TECNICAÑA. Las tablas de los demás métodos, siguen el mismo formato, razón por la cual se omiten en esta sección.

Tabla VII. **Formato de tabla de recolección de datos para el tiempo de análisis de los métodos CONSECAN, TANIMOTO y TECNICAÑA**

Descripción		TIEMPO DE ANÁLISIS (min)		
		Analista 1	Analista 2	Analista 3
TOMA DE MUESTRA	Toma muestra <i>Core sampler</i>			
	Desfibrado			
	Homogenizado			
	TOTAL			
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	Prensado hidráulico			
	Pesado torta húmeda			
	Preparación del jugo con clarificante			
	Filtrado			
	Medición de brix			
	Medición de polarización			
	TOTAL			
ANÁLISIS DE FIBRA DE CAÑA	Toma de muestra			
	Pesar muestra e introducirla al horno			
	Secado			
	Pesado de la muestra seca			
	TOTAL			
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN				

Fuente: elaboración propia.

En lo que se refiere a la comparación económica de los métodos, se utilizó la tabla VIII para extraer la información necesaria. En ella se detalla un listado genérico de los equipos y reactivos comunes en los cinco métodos, y se aplicó de forma individual a cada uno de ellos. En dicha tabla se encuentra toda la información que se necesitó para evaluar los costos variables por análisis, para cada uno de los métodos.

Tabla VIII. **Formato de tabla de recolección de datos para el análisis económico de los métodos**

MÉTODO APLICADO				
ENERGÍA ELÉCTRICA	Equipo	¿Se utiliza? Sí/No	Potencia (HP)	Tiempo de operación (min)
	Core Sampler			
	Desfibradora			
	Homogeneizador			
	Prensa hidráulica			
	Desintegrador			
	Horno de secado			
	Precio KWh (Q.)			
REACTIVOS	Reactivo	¿Se utiliza? Sí/No	Gramos utilizados por muestra (g)	Precio (Q/g)
	Octapol			
	Subacetato de plomo			
	Tierras silíceas			

Fuente: elaboración propia.

3.6.2. Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos

Para esta parte de la investigación, fue necesario tomar las lecturas directas de los aparatos de medición, para luego procesarlas y obtener las variables de interés. Los aparatos de medición fueron el refractómetro y el polarímetro. La recolección de la información quedó estructurada de tal forma que se obtuviera el valor de las variables por cada día de experimentación. En la tabla IX, se muestran los campos que se rellenaron durante la aplicación de la metodología.

Tabla IX. **Formato de tabla de recolección de datos para la evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos**

Día	Concentración de la solución (%p/p)	°Brix	Lectura de polarización (ISS)
1	0	$X_{1,1}$	$X_{1,1}$
	5	$X_{1,2}$	$X_{1,2}$
	10	$X_{1,3}$	$X_{1,3}$
	15	$X_{1,4}$	$X_{1,4}$
	20	$X_{1,5}$	$X_{1,5}$
2	0	$X_{2,1}$	$X_{2,1}$
	5	$X_{2,2}$	$X_{2,2}$
	10	$X_{2,3}$	$X_{2,3}$
	15	$X_{2,4}$	$X_{2,4}$
	20	$X_{2,5}$	$X_{2,5}$
⋮	⋮	⋮	⋮
15	0	$X_{15,1}$	$X_{15,1}$
	5	$X_{15,2}$	$X_{15,2}$
	10	$X_{15,3}$	$X_{15,3}$
	15	$X_{15,4}$	$X_{15,4}$
	20	$X_{15,5}$	$X_{15,5}$

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos obtenidos de la experimentación se introdujeron en hojas electrónicas de cálculos para determinar las variables de respuestas necesarias.

3.7.1. Comparación de los métodos analíticos para la evaluación de la caña de azúcar

Se construyeron tablas donde se calcularon los datos intermedios necesarios para calcular el porcentaje de sacarosa y fibra en la caña; esto se

realizó para cada método. Las ecuaciones y cálculos efectuados para cada método se pueden consultar en la sección de anexos, al igual que las tablas intermedias a los resultados, localizadas en la sección de apéndices. En la tabla X y XI, se presenta el modelo de tabla que se empleó para resumir los datos finales de pol de caña y fibra de caña obtenidos. A partir de estas tablas, se realizaron los gráficos y análisis estadísticos respectivos.

Tabla X. Formato de presentación de resultados de pol de caña para los distintos métodos aplicados

Muestra	Porcentaje de Sacarosa (Pol)				
	ICUMSA	CONSECAÑA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance masa
1	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$	$X_{4,1}$	$X_{5,1}$
2	$X_{1,2}$	$X_{2,2}$	$X_{3,2}$	$X_{4,2}$	$X_{5,2}$
3	$X_{1,3}$	$X_{2,3}$	$X_{3,3}$	$X_{4,3}$	$X_{5,3}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	$X_{1,25}$	$X_{2,25}$	$X_{3,25}$	$X_{4,25}$	$X_{5,25}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Formato de presentación de resultados de fibra de caña para los distintos métodos aplicados

Muestra	Fibra de caña (%)				
	ICUMSA	CONSECAÑA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance masa
1	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$	$X_{4,1}$	$X_{5,1}$
2	$X_{1,2}$	$X_{2,2}$	$X_{3,2}$	$X_{4,2}$	$X_{5,2}$
3	$X_{1,3}$	$X_{2,3}$	$X_{3,3}$	$X_{4,3}$	$X_{5,3}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	$X_{1,25}$	$X_{2,25}$	$X_{3,25}$	$X_{4,25}$	$X_{5,25}$

Fuente: elaboración propia.

En lo referente a la comparación por tiempo de análisis, al igual que la comparación anterior, se tabuló y procesó la información en hojas de cálculo. Se efectuaron los promedios respectivos, para cada paso realizado por los tres analistas, y se sumaron para obtener los tiempos de importancia. En la tabla XII, se resume en un formato general el procesamiento de la información que se llevó a cabo. Los datos de importancia son el tiempo promedio para la realización de la toma de muestra, del análisis de pol de caña y del análisis de la fibra, así como el tiempo total promedio para ejecutar el método completo.

Tabla XII. **Formato de la tabla de procesamiento de información para el tiempo de análisis de los distintos métodos aplicados**

Descripción		TIEMPO DE EJECUCIÓN (min)			
		Analista 1	Analista 2	Analista 3	Promedi o
TOMA DE MUESTRA	paso 1	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$	\bar{X}_1
	paso 2	$X_{1,2}$	$X_{2,2}$	$X_{3,2}$	\bar{X}_2
	paso 3	$X_{1,3}$	$X_{2,3}$	$X_{3,3}$	\bar{X}_3
	TOTAL	$\sum X$	$\sum X$	$\sum X$	$\sum \bar{X}_{1-3}$
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	paso 4	$X_{1,4}$	$X_{2,4}$	$X_{3,4}$	\bar{X}_4
	paso 5	$X_{1,5}$	$X_{2,5}$	$X_{3,5}$	\bar{X}_5
	paso 6	$X_{1,6}$	$X_{2,6}$	$X_{3,6}$	\bar{X}_6
	TOTAL	$\sum X$	$\sum X$	$\sum X$	$\sum \bar{X}_{4-6}$
ANÁLISIS DE FIBRA DE CAÑA	paso 7	$X_{1,7}$	$X_{2,7}$	$X_{3,7}$	\bar{X}_7
	paso 8	$X_{1,8}$	$X_{2,8}$	$X_{3,8}$	\bar{X}_8
	paso 9	$X_{1,9}$	$X_{2,9}$	$X_{3,9}$	\bar{X}_9
	TOTAL	$\sum X$	$\sum X$	$\sum X$	$\sum \bar{X}_{7-9}$
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN		$\sum X$	$\sum X$	$\sum X$	$\sum \bar{X}_{1-9}$

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XIII, se muestra el formato de tabla que se empleó para determinar el consumo de energía eléctrica en KWh, esta se utilizó para cada método. En dicha tabla, la energía consumida se obtuvo al multiplicar la potencia en watts por el tiempo de uso del equipo en horas; además, el valor resultante se dividió dentro del número de muestras, para determinar el consumo unitario.

La suma de cada equipo proporcionó el consumo total de energía por cada método. Este último dato se trasladó a la tabla XIV, para calcular el costo unitario por muestra. En esta tabla se añade el costo unitario del KWh, el de los reactivos y la cantidad promedio de reactivo empleado en cada metodología, para obtener por medio de multiplicaciones entre filas, los costos por energía y por consumo de reactivo, que sumados proporcionan el costo variable unitario por muestra.

Tabla XIII. **Formato de la tabla de procesamiento de información para el cálculo de la energía consumida por análisis**

Equipo	Potencia (HP)	Potencia (KW)	Tiempo de operación (min)	Tiempo de operación (h)	No. de muestras analizadas	Energía consumida (KWh)
Equipo 1						X_1
Equipo 2						X_2
Equipo 3						X_3
TOTAL ENERGÍA CONSUMIDA POR MUESTRA ANALIZADA (KWh)						ΣX

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Formato de la tabla de procesamiento de información para el cálculo del costo variable por muestra para cada método**

Descripción		Consumo por muestra	Costo unitario	Costo por muestra (Q)
Energía eléctrica		X KWh	Y Q/KWH	X*Y
Reactivos	Reactivo 1	X G	Y Q/g	X*Y
	Reactivo 2	X G	Y Q/g	X*Y
	Reactivo 3	X G	Y Q/g	X*Y
TOTAL				X*Y

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos

Una vez obtenidos los datos de los análisis en el laboratorio se procedió a tabularlos en hojas de cálculos. Para esta parte de la investigación se encontraron los promedios y desviaciones estándares de los datos obtenidos. El modelo de las tablas utilizadas se presenta en la tabla XV. Se realizó una tabla similar para cada solución.

Tabla XV. **Formato de la tabla de procesamiento de información para la evaluación del procedimiento refractométrico y polarimétrico**

Concentración de sacarosa (%p/p)	^o Brix Teórico	^o Brix (lectura instrumental)	Lectura de polarización teórica	Lectura de polarización (lectura instrumental)
5	5	X ₁	19.56	X ₁
5	5	X ₂	19.56	X ₂
5	5	X ₃	19.56	X ₃
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5	5	X ₁₅	19.56	X ₁₅
Promedio	5	\bar{X}	19.56	\bar{X}
Desviación estándar	---	Σ	----	Σ

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Se aplicaron los análisis estadísticos respectivos a los resultados obtenidos de cada sección. Se aplicaron análisis estadísticos tanto paramétricos y descriptivos para determinar la confiabilidad de los resultados.

3.8.1. Comparación de los métodos analíticos para la evaluación de la caña de azúcar

A través de los resultados obtenidos de las 30 muestras y de los cinco métodos en estudio, se procedió a aplicar análisis estadísticos paramétricos, para comparar los métodos de forma estadística. Para determinar si existían diferencias significativas entre ellos se aplicó un ANOVA unidireccional de medidas emparejadas, con un nivel de probabilidad del 95% (nivel de significancia del 0,05). Al haber aplicado esta prueba, se encontraron diferencias significativas, por lo que se procedió a aplicar una prueba de Tukey para determinar cuáles métodos diferían de los demás. A continuación se describe el principio y su aplicación en la investigación de estos métodos estadísticos.

3.8.1.1. Análisis de varianza unidireccional de medidas emparejadas

El análisis de varianza o ANOVA es una prueba estadística para analizar si dos o más grupos difieren significativamente entre sí en cuanto a sus medias y varianza. La prueba de ANOVA de medidas repetidas o emparejadas es una extensión de la prueba t-student para observaciones pareadas. La hipótesis nula especifica que no existen diferencias significativas entre los métodos que se aplican.

Los resultados de cada tratamiento, es decir cada método, fueron sometidos a este tipo de prueba, para determinar si existían diferencias significativas entre los métodos utilizados para evaluar la calidad de una misma muestra de caña, con un nivel de significancia del 0.05. El estadístico, lo constituyó una hipótesis nula, la que describe que no existen diferencias significativas:

Hi: Existen diferencias estadísticas entre cada método empleado

Ho: No existen diferencias estadísticas entre cada método empleado

Ho: $\mu_{ICUMSA} = \mu_{CONSECANA} = \mu_{TANIMOTO} = \mu_{TECNICAÑA} = \mu_{Balance\ de\ masa}$

Según Moncada¹¹, el análisis de varianza unidireccional de medidas repetidas se estudia por medio de tres varianzas:

- Variación entre tratamientos
- Variación dentro de tratamientos
- Variación residual

Siendo la variación dentro de los tratamientos la que interesa en este tipo de diseños. el análisis de varianza unidireccional de medidas repetidas produce un valor conocido como “F” basado en la prueba de Fisher. Esta se define en la ecuación (2).

$$F = \frac{S_{dentro}^2}{S_{residual}^2} \quad (2)$$

Donde:

F= Valor F de Fisher

S_{dentro} = Varianza de las medias dentro de los tratamientos

$S_{residual}$ = Varianza residual

¹¹ MONCADA, José. *Estadística para ciencias del movimiento humano*. 2005.

Donde el valor F calculado, debe ser menor que el tabulado en las tablas de F para n grados de libertad, para que no exista diferencias entre los métodos empleados.

Para desarrollar el ANOVA de datos emparejados, se emplearon los datos obtenidos de las 30 muestras analizadas por los cinco métodos aplicados, específicamente el pol de la caña y el porcentaje de fibra. En la tabla XVI, se muestra la forma cómo se tabularon los datos para la aplicación del ANOVA. Se construyó una tabla para el porcentaje de sacarosa y otra para el porcentaje de fibra.

Tabla XVI. **Resumen de datos para la aplicación del ANOVA**

Muestra (i)	Método (k)					Conteo (K)	$\sum X_i$
	ICUMSA k=1	CONSECAÑA	TANIMOTO	TECNICA ÑA	Balance de masa k=5		
i=1	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$	$X_{4,1}$	$X_{5,1}$	K=5	$\sum X_1$
2	$X_{1,2}$	$X_{2,2}$	$X_{3,2}$	$X_{4,2}$	$X_{5,2}$	5	$\sum X_2$
3	$X_{1,3}$	$X_{2,3}$	$X_{3,3}$	$X_{4,3}$	$X_{5,3}$	5	$\sum X_3$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	5	$\sum X_4$
i=30	$X_{k,i}$	$X_{k,i}$	$X_{k,i}$	$X_{k,i}$	$X_{k,i}$	5	$\sum X_5$
Conteo (n)	n=30	30	30	30	30	N=150	
$\sum X_k$	$\sum X_1$	$\sum X_2$	$\sum X_3$	$\sum X_4$	$\sum X_5$		

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XVII se detallan las fórmulas para calcular el ANOVA de medidas repetibles simples, a través de los datos obtenidos.

Tabla XVII. **Fórmulas para calcular el ANOVA de medidas repetidas**

Variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrado medio (MS)	Valor F calculado
Entre métodos	n-1	$\sum \left(\frac{(\sum X_i)^2}{K} \right) - \frac{(\sum \sum X_k)^2}{N}$	$\frac{SS_{entre}}{gl_{entre}}$	
Dentro de métodos	K-1	$\sum \left(\frac{(\sum X_k)^2}{K} \right) - \frac{(\sum \sum X_k)^2}{N}$	$\frac{SS_{dentro}}{gl_{dentro}}$	$\frac{MS_{dentro}}{MS_{residual}}$
Residual	(n-1)(K-1)	$SS_{total} - SS_{entre} - SS_{dentro}$	$\frac{SS_{residual}}{gl_{residual}}$	
Total	N-1	$\sum_k \sum_i X_{k,i}^2 - \frac{(\sum \sum X_k)^2}{N}$		

Fuente: ÁLVAREZ, Rafael. Estadística aplicada a la ciencia de la salud. p. 47.

3.8.1.2. Prueba de Tukey de datos emparejados

La prueba de Tukey, también conocida como Tukey's HSD (por sus siglas en inglés, *Tukey's Honestly Significant Difference Test*), consiste en realizar comparaciones múltiples luego de haber obtenido una razón F significativa en la prueba ANOVA. La prueba de Tukey se utiliza para determinar en dónde se encuentran las diferencias estadísticas, lo cual no puede hacerse por el ANOVA.

La información necesaria para aplicar esta prueba, se obtiene de la tabla de resumen de ANOVA (véase tabla XVII), y además se necesitan los promedios generales de cada método aplicado.

El valor estadístico de la prueba de Tukey se conoce como HSD, el cual es un valor que indica la mayor diferencia significativa que puede existir entre métodos, para que estos sean equivalentes. La fórmula para calcular se presenta por la ecuación 3:

$$HSD = \alpha \cdot \sqrt{\frac{MS_{residual}}{n}} \quad (3)$$

Donde $MS_{residual}$, es el cuadrado medio residual obtenido del ANOVA y n es el número de muestras sometidas al análisis (30 muestras). El valor α , se determina a través de una tabla de valores de Tukey al nivel de significancia seleccionado (anexo C) y con los grados de libertad dentro de métodos y residual, obtenidos del ANOVA. Para el caso presente, el nivel de significancia seleccionado fue de 0,05, con valor de gl_{dentro} de 4, y de $gl_{residual}$ de 116. Lo que da un valor de α de 3,68 (valor extraído del anexo C). Con esta información se determina el valor de HSD.

Posteriormente, se construyó una tabla con la diferencia entre promedios de los métodos, como se muestra en la tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Resumen de datos para la aplicación de la prueba de Tukey**

		ICUMSA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance de masa
		\bar{X}_1	\bar{X}_2	\bar{X}_3	\bar{X}_4	\bar{X}_5
ICUMSA	\bar{X}_1$		|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|$	$|\bar{X}_1 - \bar{X}_3|$	$|\bar{X}_1 - \bar{X}_4|$	$|\bar{X}_1 - \bar{X}_5|$
CONSECANA	\bar{X}_2$	|\bar{X}_2 - \bar{X}_1|$		$|\bar{X}_2 - \bar{X}_3|$	$|\bar{X}_2 - \bar{X}_4|$	$|\bar{X}_2 - \bar{X}_5|$
TANIMOTO	\bar{X}_3$	|\bar{X}_3 - \bar{X}_1|$	$|\bar{X}_3 - \bar{X}_2|$		$|\bar{X}_3 - \bar{X}_4|$	$|\bar{X}_3 - \bar{X}_5|$
TECNICAÑA	\bar{X}_4$	|\bar{X}_4 - \bar{X}_1|$	$|\bar{X}_4 - \bar{X}_2|$	$|\bar{X}_4 - \bar{X}_3|$		$|\bar{X}_4 - \bar{X}_5|$
Balance de masa	\bar{X}_5$	|\bar{X}_5 - \bar{X}_1|$	$|\bar{X}_5 - \bar{X}_2|$	$|\bar{X}_5 - \bar{X}_3|$	$|\bar{X}_5 - \bar{X}_4|$	

Fuente: elaboración propia

Posterior a obtener las diferencias entre todos los promedios, se procedió a comparar ese valor con el de HSD. Si alguna diferencia de promedios fuese mayor a HSD, se consideró que existía una diferencia significativa entre ambos grupos.

Para una mejor representación gráfica de las comparaciones, se procedió a realizar un diagrama de cajas para los métodos de análisis de pol y otro para el porcentaje de fibra. Para realizar este tipo de diagrama, se ordenaron los datos de menor a mayor magnitud, con la ayuda de un procesador electrónico. El valor mínimo, el valor del primer percentil Q_1 (25% de los datos), la mediana, el valor de tercer percentil Q_3 (75% de los datos) y el valor máximo de los datos se extrajeron para construir dichos diagramas.

3.8.2. Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos

Para esta parte de la investigación se hizo uso de la estadística descriptiva y del análisis estadístico paramétrico. Para responder qué tan confiables eran los procedimientos refractométricos y polarimétricos se evaluó la exactitud, precisión y linealidad para cada uno de ellos.

3.8.2.1. Precisión

Para evaluar la precisión de los procedimientos, se calculó la media, desviación estándar y el coeficiente de variación de la medición de los aparatos, por cada solución preparada. El procedimiento se consideró repetible si el coeficiente de variación era menor al 2%, tanto para el refractométrico como para el polarimétrico, según normas CONSECANA-SP.¹²

¹² CONSECANA-SP. Manual de instruções. 2006.

Para este estadístico se emplearon las siguientes variables:

- Media: es la medida de tendencia central que se define como el promedio aritmético de un conjunto de valores. Su ecuación es:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

Donde:

\bar{x} = Media de un conjunto de datos

x_i = i-ésimo valor de un conjunto de datos

n = Número total de datos

Esta medida se empleó para calcular el promedio de los resultados obtenidos de cada solución preparada, por cada procedimiento empleado.

- Desviación estándar: es la medida de variabilidad que indica el promedio de las desviaciones de los valores respecto de la media. Su ecuación es:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

Donde:

σ = Desviación estándar

\bar{x} = Media de un conjunto de datos

x_i = i-ésimo valor de un conjunto de datos

n = Número total de datos

La desviación estándar se utilizó para determinar qué tanto se dispersan los valores de las observaciones respecto de la media, para cada variable.

- Coeficiente de variación: es la medida de variabilidad relativa que indica el promedio de las desviaciones de los valores respecto de la media. Su ecuación es:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (6)$$

Donde:

σ = Desviación estándar

\bar{x} = Media de un conjunto de datos

CV = Coeficiente de variación

El coeficiente de variación fue la variable estadística final que se empleó para determinar la precisión de cada procedimiento.

3.8.2.2. Exactitud

Para determinar la exactitud de los procedimientos se calculó el promedio experimental de las mediciones obtenidas para cada solución. Cada media obtenida se comparó con el valor teórico conocido, por medio de una prueba t de student, con un nivel de significancia del 0.05 (nivel de confianza del 95%).

La hipótesis nula que se adoptó es que las medias de los resultados dados no difieren significativamente de los datos teóricos conocidos. El principio de la prueba de t de student se explica a continuación.

- Prueba t de student de comparación de una media experimental con un valor conocido: es una prueba para evaluar si dos medidas difieren entre sí de manera significativa respecto de sus medias. Para decidir si la diferencia entre un valor promedio de un método y el valor teórico es significativa, se calcula el coeficiente estadístico t :

$$t = (\bar{x} - \mu) \frac{\sqrt{n}}{s} \quad (7)$$

Donde:

μ = Media poblacional o dato teórico

\bar{x} = Media muestral

S= Desviación estándar muestral

n= número de datos

Si el valor calculado de “t” es menor que el tabulado con un nivel de significancia del 0,05, se acepta que el procedimiento es exacto.

3.8.2.3. Linealidad

La linealidad de ambos procedimientos se comprobó realizando un gráfico con todas las soluciones preparadas, colocando en el eje de las ordenadas las lecturas instrumentales obtenidas de los aparatos de medición y en el eje de las abscisas, su concentración de sacarosa teórica.

Luego se procedió a realizar la regresión lineal, en donde se determinó la pendiente, el intercepto y el coeficiente de correlación por medio de un procesador electrónico de datos.

El coeficiente de correlación de Pearson es una prueba estadística para evaluar si existe relación entre dos variables. Este coeficiente es el indicador de la linealidad del método: entre más cercano se encuentre de 1, el método será más confiable.

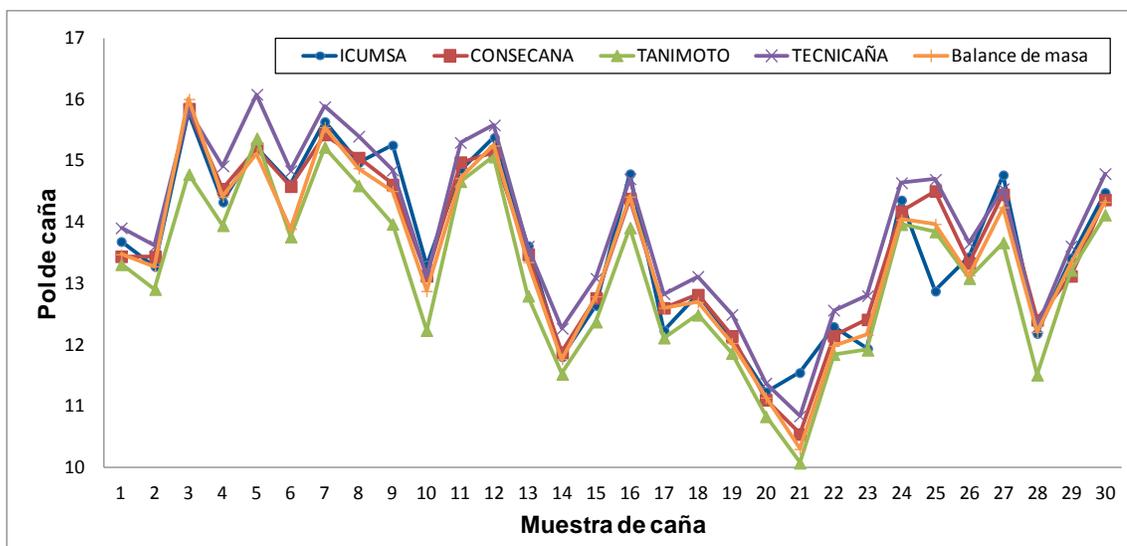
Este análisis estadístico se aplicó para ambos procedimientos: refractométrico y polarimétrico.

4. RESULTADOS

4.1. Comparación estadística de los métodos para la determinación de pol de caña

En esta sección se presentan los resultados de pol de caña obtenidos de los cinco métodos analíticos, la figura 21 es la representación gráfica de estos datos. En las tablas XIX y XX se puede apreciar los resultados comparativos del ANOVA con su respectiva prueba de Tukey a un nivel de confianza del 95%. La figura 22 muestra en diagramas de cajas la distribución de los datos por cada método.

Figura 21. **Gráfica de los resultados de pol de caña obtenidos a través de los métodos aplicados**



Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla XL.

Tabla XIX. **Análisis de varianza de datos emparejados para los métodos de determinación de pol de caña**

Fuente de varianza	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrado medio (MS)	F calculado	Significancia (α)	F crítico
Entre métodos	29	259,77	8,96	169,00	0,05	2,45
Dentro de métodos	4	8,67	2,17	40,90		
Residual	116	6,15	0,05			
Total	149	274,59				

Conclusión: existen diferencias significativas entre métodos ($F_{calc} > F_{crítico}$)

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tablas XLI y XLII.

Tabla XX. **Análisis de comparaciones múltiples de Tukey para los métodos de determinación de pol de caña**

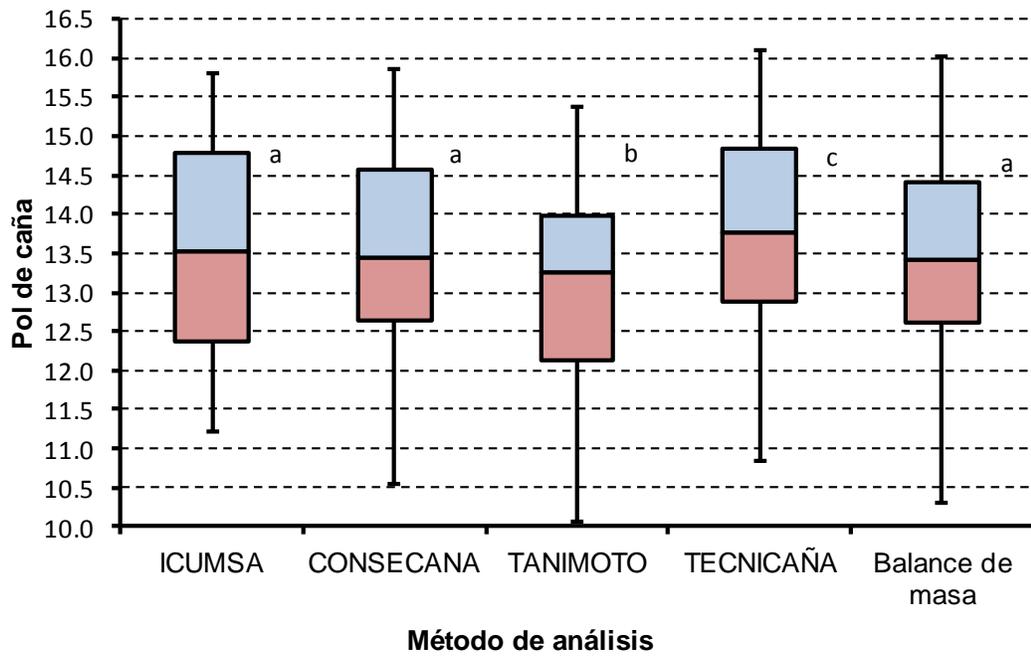
	\bar{X}_{ICUMSA} (13,63)	$\bar{X}_{CONSECANA}$ (13,60)	$\bar{X}_{TANIMOTO}$ (13,16)	$\bar{X}_{TECNICAÑA}$ (13,91)	$\bar{X}_{Balance\ de\ masa}$ (13,48)
\bar{X}_{ICUMSA} (13,63)	---	0,03	0,46**	0,28**	0,15*
$\bar{X}_{CONSECANA}$ (13,60)	---	---	0,44**	0,31**	0,12*
$\bar{X}_{TANIMOTO}$ (13,16)	---	---	---	0,74**	0,32**
$\bar{X}_{TECNICAÑA}$ (13,91)	---	---	---	---	0,43**
$\bar{X}_{Balance\ de\ masa}$ (13,48)	---	---	---	---	---

*HSD=0.15, valores superiores son significativamente diferentes.

**existen diferencias significativamente a un $p < 0,05$

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tablas XLIII y XLIV.

Figura 22. **Diagrama de cajas para la comparación de métodos de análisis de pol de caña**



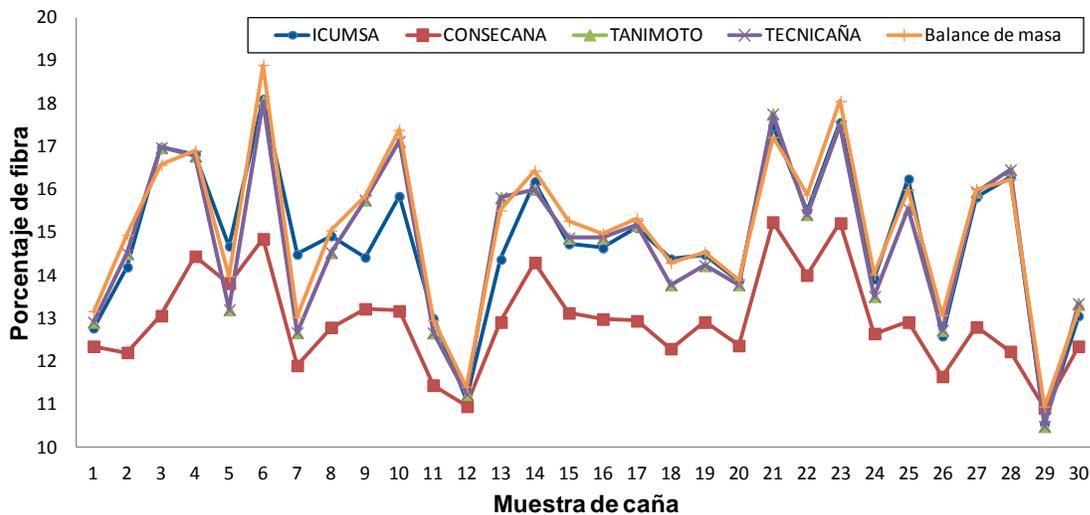
*Métodos con la misma letra, son significativamente equivalentes

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla XLV.

4.2. Comparación estadística de los métodos para determinación del porcentaje de fibra en la caña

En esta sección se presentan los resultados de porcentaje de fibra en caña obtenidos a través de los cinco métodos analíticos, la figura 23 es la representación gráfica de estos datos. En las tablas XXI y XXII se puede apreciar los resultados comparativos del ANOVA con su respectiva prueba de Tukey a un nivel de confianza del 95%. La figura 24 muestra en diagramas de cajas la distribución de los datos por cada método.

Figura 23. **Gráfica de los resultados de porcentaje de fibra obtenidos a través de los métodos aplicados**



Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla XLVI.

Tabla XXI. **Análisis de varianza de datos emparejados para los métodos de determinación de fibra en la caña**

Fuente de varianza	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrado medio (MS)	F calculado	Significancia (α)	F crítico
Entre métodos	29	404.88	13.96	42.58	0.05	2.45
Dentro de métodos	4	89.97	22.49	68.60		
Residual	116	38.03	0.33			
Total	149	532.88				

Conclusión: existen diferencias significativas entre métodos ($F_{calc} > F_{crítico}$)

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla XLVIII.

Tabla XXII. **Análisis de comparaciones múltiples de Tukey para los métodos de determinación de fibra de caña**

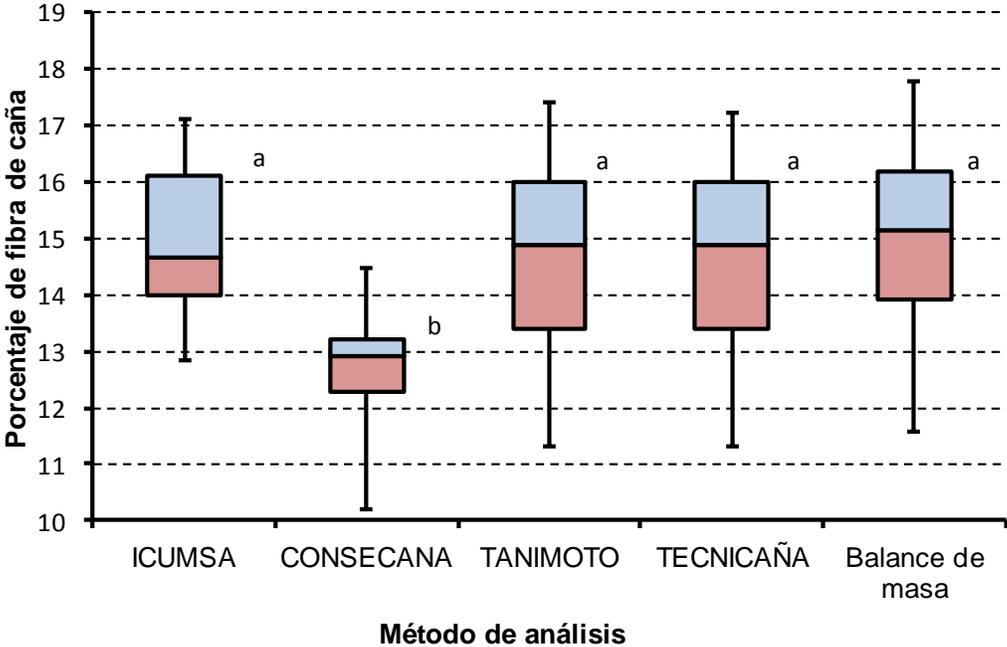
	\bar{X}_{ICUMSA} (14.80)	$\bar{X}_{CONSECANA}$ (12.92)	$\bar{X}_{TANIMOTO}$ (14.78)	$\bar{X}_{TECNICAÑA}$ (14.78)	$\bar{X}_{Balance\ de\ masa}$ (15.03)
\bar{X}_{ICUMSA} (14.80)	---	1.88**	0.02	0.02	0.23
$\bar{X}_{CONSECANA}$ (12.92)	---	---	1.86**	1.86**	2.11**
$\bar{X}_{TANIMOTO}$ (14.78)	---	---	---	0.00	0.25
$\bar{X}_{TECNICAÑA}$ (14.78)	---	---	---	---	0.25
$\bar{X}_{Balance\ de\ masa}$ (15.03)	---	---	---	---	---

*HSD=0.38, valores superiores son significativamente diferentes.

**existen diferencias significativamente a un $p < 0,05$

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tablas XLIX y L.

Figura 24. Diagrama de cajas para la comparación de los métodos de análisis de porcentaje de fibra en la caña



*Métodos con la misma letra, son significativamente equivalentes.

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla LI.

4.3. Comparación del tiempo de análisis de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar

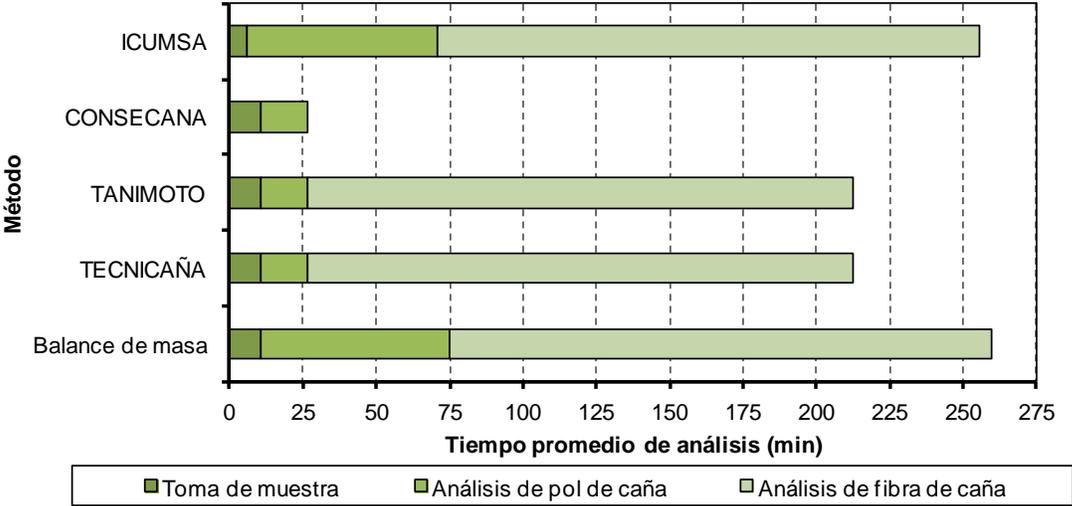
En esta sección se presenta los resultados de los tiempos de ejecución de análisis de cada método estudiado. Estos se muestran en la tabla XXIII, así como en forma gráfica en la figura 25, para observar la comparación de métodos.

Tabla XXIII. **Tiempo promedio de análisis de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar**

Descripción	Tiempo promedio de análisis (min)				Balance de masa
	ICUMSA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	
Toma de muestra	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
Análisis de pol de caña	65,0	20,6	20,6	20,6	68,7
Análisis de fibra de caña	184,6	0,0	186,1	186,1	185,0
TOTAL	255,7	26,8	212,8	212,8	259,8

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tablas LIII, LV LVII y LIX.

Figura 25. **Gráfica de comparación de tiempo de análisis de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar**



Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla XXIII.

4.4. Comparación económica de los métodos de análisis para determinar la calidad de la caña de azúcar

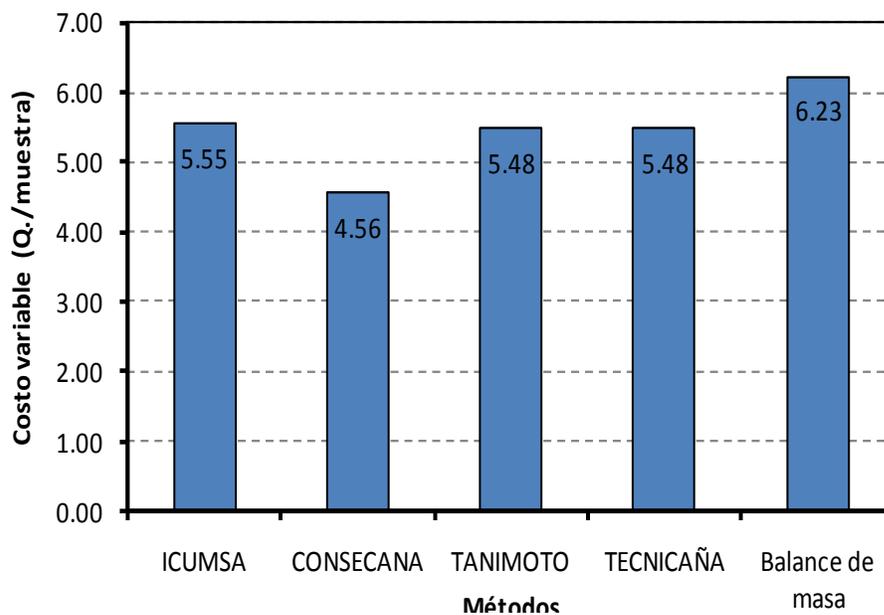
En la tabla XXIV, se muestran los resultados de los costos variables por muestra que implica el análisis de cada método. Para fines comparativos, para el cálculo del costo variable se consideró solamente los costos por energía eléctrica y los costos de los reactivos químicos empleados. En la figura 26 se aprecia los resultados en forma gráfica para fines comparativos.

Tabla XXIV. **Costos variables unitarios de la aplicación de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar**

Métodos	Costo variable por análisis (Q.)
ICUMSA	5,55
CONSECANA	4,56
TANIMOTO	5,48
TECNICAÑA	5,48
Balance de masa	6,23

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tablas LXV, LXVII, LXIX y LXXI.

Figura 26. **Gráfica de comparación de los costos variables unitarios de los métodos de análisis de caña de azúcar**



Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla XXIV.

4.5. Selección de un método de análisis para determinar la calidad de la caña de azúcar

En la tabla XXV se presenta un resumen de todos los comparativos realizados para los cinco métodos en estudio, es decir, comparación estadística, para pol y fibra en caña, comparación económica, de tiempo de ejecución y de impacto ambiental. En la figura 27, se representaron dichos valores en gráfica.

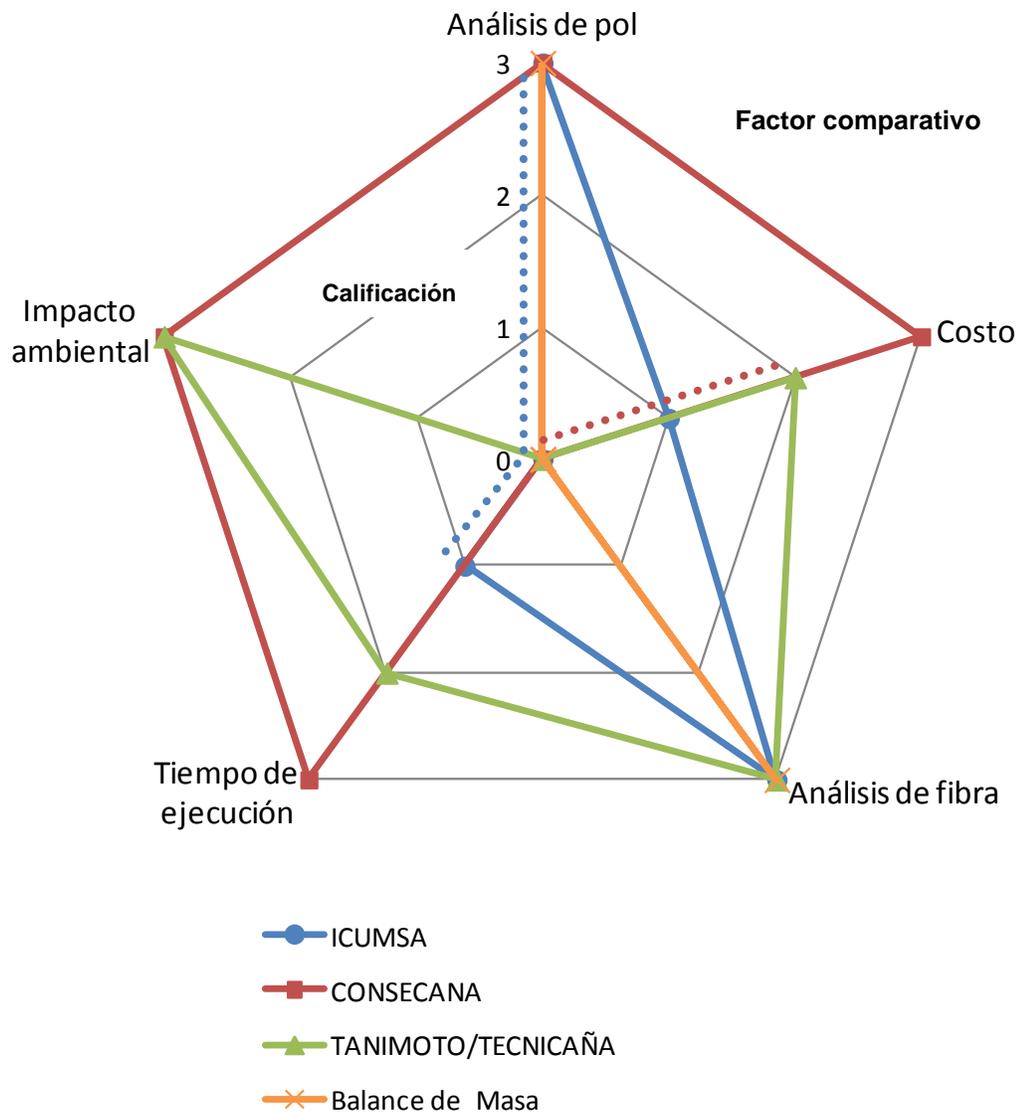
Tabla XXV. **Desglose comparativo del factor estadístico, económico, tiempo de ejecución y del impacto ambiental de los cinco métodos de análisis, para la determinación de la calidad de la caña**

Calificación del factor de selección*	FACTOR COMPARATIVO				
	Tiempo de análisis	Costo variable unitario	Estadístico (Análisis de pol)	Estadístico (Análisis de fibra)	Impacto Ambiental
3	CONSECANA	CONSECANA	ICUMSA/ CONSECANA/ Balance de masa	ICUMSA/ TANIMOTO/ TECNICAÑA/ Balance de masa	CONSECANA/ TANIMOTO/ TECNICAÑA
2	TANIMOTO/ TECNICAÑA	TANIMOTO/ TECNICAÑA	---	---	---
1	ICUMSA	ICUMSA	---	---	---
0	Balance de masa	Balance de masa	TANIMOTO/ TECNICAÑA	CONSECANA	ICUMSA/ Balance de masa

*A mayor valor calificación del factor más recomendable es el método. El valor 3 representa método recomendable; 2, moderadamente recomendable; 1, poco recomendable y 0, no recomendable.

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tablas XX, XXII, XXIII y XXIV.

Figura 27. **Gráfica comparativa del factor estadístico, económico, tiempo de ejecución y del impacto ambiental, de los cinco métodos analíticos empleados en la investigación**



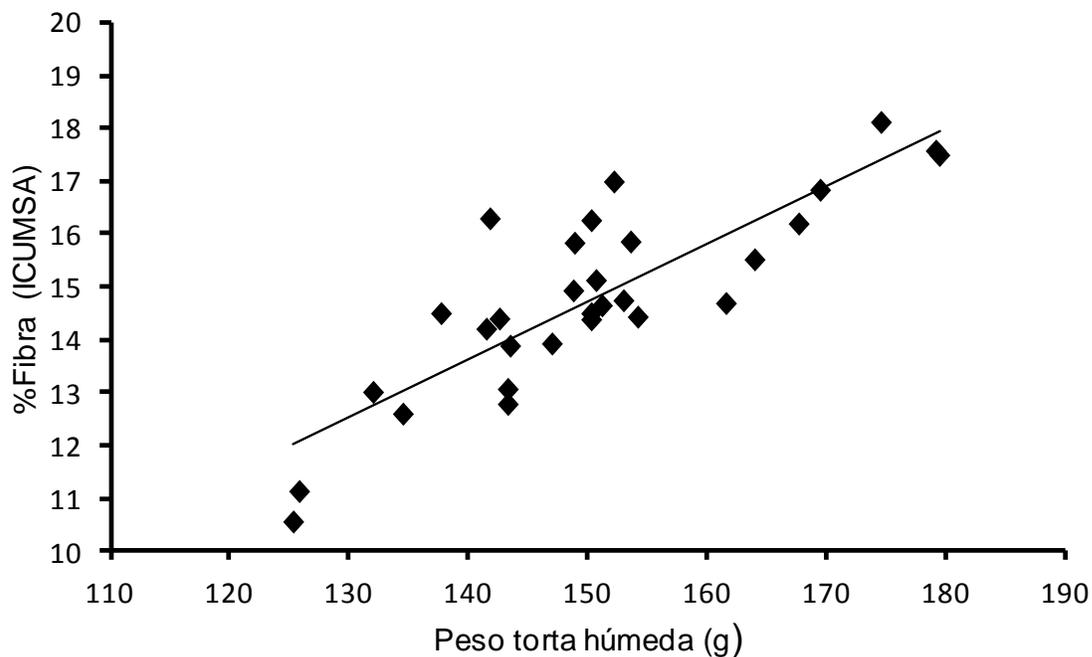
*A mayor valor calificación del factor más recomendable es el método. El valor 3 representa método recomendable; 2, moderadamente recomendable; 1, poco recomendable y 0, no recomendable.

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla XXV.

4.6. Propuesta de la modificación del método CONSECANA para la determinación del porcentaje de fibra en la caña

En esta sección se presentan los resultados de una propuesta de modificación del método de CONSECANA para la determinación en fibra de caña, por medio de un modelo de ecuación lineal. A su vez, en la figura 29 se expone la comparación de resultados del nuevo modelo con los métodos anteriormente estudiados. En la tabla XXVII, se presenta los resultados de la aplicación de un ANOVA para el nuevo modelo.

Figura 28. **Correlación entre el porcentaje de fibra y el peso de torta húmeda para el método modificado de CONSECANA**



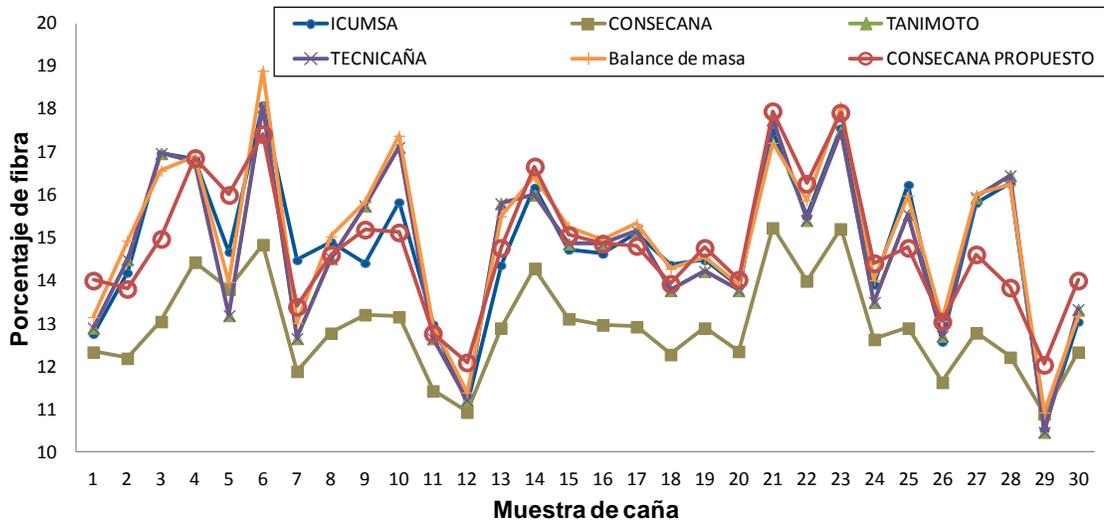
Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla LXXII.

Tabla XXVI. **Modelo de la correlación lineal entre el porcentaje de fibra y el peso de torta húmeda**

Curva	Valor de la pendiente	Valor del intercepto	Coefficiente de correlación de Pearson
% Fibra ICUMSA contra peso de torta húmeda	0,109	-1,613	0,7171

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla LXXII.

Figura 29. **Gráfica de los resultados de porcentaje de fibra obtenidos a través de los métodos aplicados junto con el método modificado de CONSECANA**



Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla LXXIV.

Tabla XXVII. **Análisis de varianza de datos emparejados para los métodos de determinación de fibra en la caña con el método propuesto de CONSECANA**

Fuente de varianza	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrado medio (MS)	F calculado	Significancia (α)	F crítico
Entre Métodos	29	440,25	15,18	44,32	0,05	2,45
Dentro de Métodos	4	1,37	0,34	1,18		
Residual	116	33,56	0,29			
Total	149	475,18				

Conclusión: *no existen diferencias significativas entre métodos ($F_{calc} < F_{crit}$)*

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla LXXVI.

4.7. Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos

Se realizó una evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos con el fin de monitorear el correcto funcionamiento de los equipos durante la operación analítica. En las tablas XXVIII y XXIX se resumen los resultados obtenidos para la evaluación del refractómetro y polarímetro respectivamente.

Tabla XXVIII. Evaluación de la respuesta instrumental del refractómetro empleado en la investigación

Variable	Concentración de sacarosa (%p/p)				
	0%	5%	10%	15%	20%
Valor teórico (^o Brix)	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00
Media	0,00	4,99	9,97	14,93	19,89
Desviación estándar (σ)	0,00	0,03	0,06	0,13	0,26
Coeficiente de variación (CV)	0,00%	0,62%	0,63%	0,86%	1,30%
No. observaciones	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Grados de libertad (gl)	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Nivel de significancia (α)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Estadístico t	0,00	1,58	1,94	2,10	1,70
Valor crítico t	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Conclusión	NDS	NDS	NDS	NDS	NDS

*NDS: No hay diferencias significativas.

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tablas LXXVIII, LXXIX, LXXX, LXXXI, LXXXII, LXXXIII, LXXXIV, LXXXV, y LXXXVI.

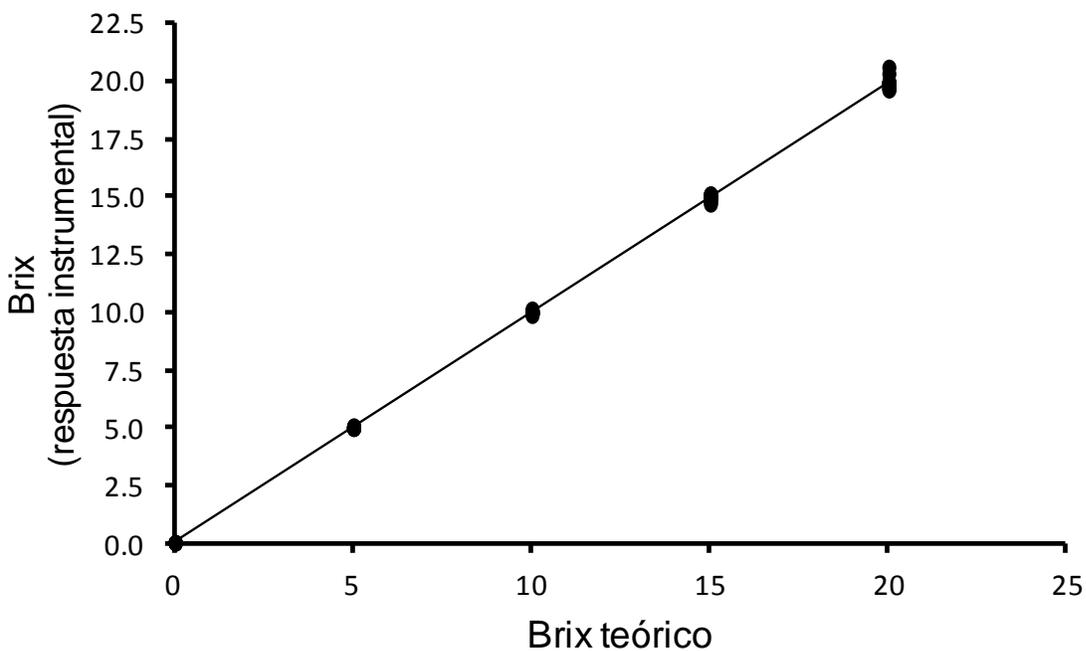
Tabla XXIX. Evaluación de la respuesta instrumental del polarímetro empleado en la investigación

Variable	Concentración de sacarosa (%p/p)				
	0%	5%	10%	15%	20%
Valor teórico (ISS)	0,00	19,56	39,90	61,06	83,08
Media (ISS)	0,00	19,49	39,72	60,77	82,62
Desviación estándar (σ)	0,00	0,13	0,32	0,53	1,37
Coeficiente de Variación (CV)	0,00%	0,66%	0,81%	0,87%	1,66%
No. observaciones	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Grados de libertad (gl)	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Nivel de significancia (α)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Estadístico t	0,00	2,11	2,12	2,11	1,28
Valor crítico t	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Conclusión	NDS	NDS	NDS	NDS	NDS

*NDS: No hay diferencias significativas.

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tablas LXXVIII, LXXIX, LXXX, LXXXI, LXXXII, LXXXIII, LXXXIV, LXXXV y LXXXVI.

Figura 30. **Linealidad del procedimiento refractométrico empleado en la investigación**



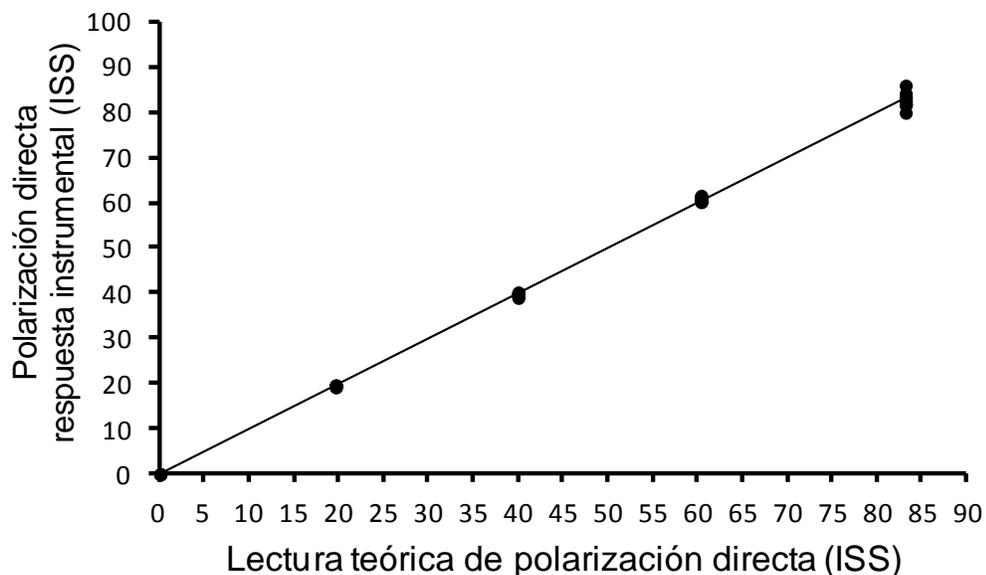
Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla LXXVII.

Tabla XXX. **Modelo de correlación para la linealidad del procedimiento refractométrico**

Curva	Valor de la pendiente	Valor del intercepto	Coefficiente de correlación de Pearson
Linealidad del método refractométrico	0,994	0,013	0,9997

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla LXXVII.

Figura 31. **Linealidad del procedimiento polarimétrico empleado en la investigación**



Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla LXXVII.

Tabla XXXI. **Modelo de correlación para la linealidad del procedimiento polarimétrico**

Curva	Valor de la pendiente	Valor del intercepto	Coefficiente de correlación de Pearson
Linealidad del método refractométrico	0,998	0,034	0,9999

Fuente: elaboración propia. Con datos presentados en la tabla LXXVII.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como se ha mencionado, 30 muestras de caña de azúcar fueron analizadas en orden para determinar el pol y porcentaje de fibra de caña por medio de la aplicación de cinco métodos de análisis directo, con el fin de recomendar un método preciso, económico y de rápida ejecución con base en uno de ellos de referencia. Tres de estos métodos pertenecen a la clasificación de métodos de prensa hidráulica, CONSECAN, TANIMOTO y TECNICAÑA; otro a los métodos de desintegración húmeda, ICUMSA, y un método que combina ambas metodologías, denominado modelo de balance de masa. El método de desintegración húmeda de ICUMSA fue considerado como el método de referencia. A continuación se discuten los resultados obtenidos.

5.1. Comparación estadística de los métodos para la determinación de pol de caña

En la figura 21, se observa en forma gráfica los resultados obtenidos de pol de caña de las 30 muestras examinadas a través de los cinco métodos de análisis. Visualmente, se observa que todos los métodos presentaron una tendencia similar entre ellos. De forma general, el método TECNICAÑA, presentó una leve tendencia de porcentajes de sacarosa mayores a los demás resultados, mientras que los resultados del análisis de TANIMOTO mostraron valores por debajo de los demás métodos.

La aplicación de un análisis de varianza unidireccional de medidas emparejadas a los resultados de pol de caña, como se muestra en la tabla XIX, dio como resultado una F calculada (40,90) mayor que la F tabulada (2,45), a

un 95% de confiabilidad, lo que evidenció la existencia de diferencias significativas entre los resultados de pol de caña de los métodos empleados.

Con el fin de establecer los métodos que presentaron precisión estadística entre sí, se utilizó una prueba post-ANOVA; específicamente el test de Tukey para datos emparejados, como lo muestra la tabla XX. Esta prueba estadística se basa en determinar cuál debería ser la diferencia máxima entre promedios para que los métodos sean estadísticamente equivalentes, por medio de un valor conocido como HSD (*Honestly Significant Difference*).

El valor HSD para las condiciones y resultados presentes fue de 0,15. La pareja de métodos que cumplió con estar por debajo este valor fueron ICUMSA-CONSECANA (0,03), ICUMSA-balance de masa (0,15) y CONSECANA-balance de masa (0,12). Siendo la pareja con mayor equivalencia, los métodos de ICUMSA y CONSECANA. Mientras tanto, respecto de los resultados de TANIMOTO y TECNICAÑA, presentaron diferencias estadísticas con los demás métodos.

En la figura 22, se muestra un diagrama de cajas construido con los valores de pol de caña obtenidos por cada método. Este diagrama proporciona una visión general de la distribución de cada conjunto de datos, y al combinarlo con las deducciones de la prueba de Tukey, es posible establecer los métodos que presentaron precisión entre sí. Con base en el gráfico representado, no se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los métodos de ICUMSA, CONSECANA y el modelo de balance de masa, por lo que estos métodos pueden ser aplicados sin presentar discordancia entre sus resultados. En cambio, el empleo de los métodos de TANIMOTO y TECNICAÑA proporcionó datos con una distribución significativamente diferente a lo establecido, y con diferencias significativas evidentes con las demás metodologías.

Al inicio de la investigación, el método ICUMSA fue establecido como el método de referencia por ser un método normalizado y riguroso. Con base en esta condición y en los resultados obtenidos para el pol de caña, puede afirmarse que los métodos de CONSECAN y balance de masa, presentan equivalencia estadística con el método de referencia, y por lo tanto su aplicación da resultados precisos estadísticamente, al método ICUMSA.

Cabe resaltar que los tres métodos de análisis de caña que resultaron ser equivalentes presentan metodologías totalmente diferentes entre ellas, lo que otorga una mayor confiabilidad a la equivalencia estadística entre dichos métodos.

5.2. Comparación estadística de los métodos para la determinación del porcentaje de fibra de caña

En lo referente a la determinación de porcentaje de fibra de caña, en la figura 23, se representa en forma gráfica los resultados de los porcentajes de fibra obtenidos por medio de la aplicación de los cinco métodos descritos. De forma general, se observa que todos los métodos presentaron valores muy similares y con la misma tendencia, exceptuando el método de CONSECAN, que exhibió valores por debajo de los demás.

En la tabla XXI, se resumen la información derivada de la aplicación del análisis de varianza de medidas repetidas a los valores de porcentaje de fibra. El valor de F calculado (68,60), fue mayor que la F tabulada a un 95% de confiabilidad (2,45), por lo que se concluyó que existían diferencias significativas entre los resultados de fibra de caña, calculada con las diferentes metodologías aplicadas.

El análisis de comparaciones múltiples de Tukey para los métodos de determinación de fibra, que se muestra en la tabla XXII, indica que las parejas de métodos que cumplieron con tener una diferencia de medias menor al HSD (0,38), son las siguientes: ICUMSA-TANIMOTO (0,02), ICUMSA-TECNICAÑA (0,02), ICUMSA-balance de masa (0,23), TANIMOTO-TECNICAÑA (0,00), TANIMOTO-balance de masa (0,25) y TECNICAÑA-balance de masa (0,25). Por lo tanto, todos los métodos se emparejan estadísticamente, exceptuando el de CONSECAN, para la determinación de fibra, que presentó diferencias significativas con las demás metodologías.

En el diagrama de cajas que se muestra en la figura 24 con los resultados de porcentaje de fibra de caña, se observa claramente la conclusión establecida en el párrafo anterior. Las distribuciones de datos de fibra de caña conseguidas con la metodología de ICUMSA, TANIMOTO, TECNICAÑA y el modelo de balance de masa, fueron muy similares; es decir no presentaron diferencias significativas, mientras que la distribución de datos del método CONSECAN difirió sustancialmente de las anteriores.

Con base en que el método de referencia establecido fue la metodología de ICUMSA y a los análisis estadísticos obtenidos, puede establecerse que los métodos de TANIMOTO, TECNICAÑA y el modelo de balance de masa dan resultados precisos estadísticamente, al método de referencia establecido, y por lo tanto proporcionan datos confiables al ser aplicados.

5.3. Comparación del tiempo de análisis de los métodos para determinar la calidad de la caña de azúcar

El tiempo de análisis para cada método se dividió en tres secciones siendo estos el tiempo para la toma de muestra, para el análisis de pol de caña y el necesario para el análisis de la fibra de caña. En la tabla XXIII se exponen los datos promedios obtenidos luego de que tres analistas distintos realizaran cada paso de los métodos. De la misma manera, la figura 25 es una representación gráfica de estos valores.

En lo que se refiere al tiempo de la toma de muestra, se ve claramente que los cinco métodos poseen el mismo tiempo de ejecución (6,1 min). Esto se debe a que se aplicó el mismo procedimiento de selección de muestra para todas las metodologías.

En cuanto al análisis de pol de caña, se observa que los métodos de prensado hidráulico CONSECAN, TANIMOTO y TECNICAÑA fueron los de menor tiempo de ejecución comparado con los demás. En cambio, los métodos de ICUMSA y balance de masa implicaron mayor tiempo de ejecución debido a que la desintegración húmeda ocupaba la mayor parte de tiempo del análisis. Por ejemplo, en el método ICUMSA, el 46% de este tiempo se consume en desintegrar la muestra durante 30 minutos.

Por otra parte, el tiempo necesario para efectuar el análisis de fibra de caña para los métodos de ICUMSA, TANIMOTO, TECNICAÑA y balance de masa fue muy similar entre ellos, ya que en cada uno implica someter una muestra de bagazo o caña en un horno de secado por aproximadamente tres horas (180 min).

En contraparte, en la tabla XXIII se aprecia que el método CONSECANA ostentó un tiempo de ejecución igual a cero; esto se debe a que su metodología se caracteriza por evitar el uso del horno de secado. El valor del porcentaje de fibra para este método, se extrae de la misma información obtenida del análisis del pol de caña. Por esta razón, se puede afirmar que dicha metodología fue la de menor tiempo de ejecución para analizar el porcentaje de fibra.

En la figura 25, se observa de manera clara, la comparación del tiempo total promedio para realizar cada uno de los métodos en estudio, desde el momento que se tomó la muestra hasta que se obtuvieron los datos necesarios para ser procesados. La metodología de ICUMSA y balance de masa fueron las que implicaron mayor tiempo de análisis, seguidas por las de TANIMOTO y TECNICAÑA. Como se aprecia, el mayor tiempo de análisis es consumido en determinar el porcentaje de fibra. En cambio, el método de CONSECANA, el cual no implica analizar el porcentaje de fibra por separado, por razones anteriormente mencionadas, fue el de menor tiempo de ejecución con un tiempo aproximado de 27 minutos por muestra.

Comparando los resultados obtenidos con el método de referencia establecido, ICUMSA, se apreció que el tiempo de ejecución de método CONSECANA fue un 89,5%, menor al método ICUMSA. De igual forma, los métodos TANIMOTO y TECNICAÑA un 16,8% menor, mientras que el modelo de balance de masa implicó un 1,6% más en tiempo de aplicación que el de referencia. Esto conlleva a concluir que la aplicación recomendada en cuanto al factor tiempo, es inicialmente la metodología de CONSECANA, seguida por las de TANIMOTO y/o TECNICAÑA, posteriormente ICUMSA y por último el modelo de balance de masa, por ser la de mayor tiempo de ejecución.

5.4. Comparación económica de los métodos de análisis para determinar la calidad de la caña de azúcar

En la tabla XXIV, se muestran los resultados obtenidos de los costos variables por muestra que implicó la aplicación de cada método. El costo variable al que se refiere esta sección, solo considera los costos por energía eléctrica de los equipos de mayor consumo y los costos por reactivos químicos. Por lo tanto los valores obtenidos en esta sección son útiles solo para fines comparativos.

En base a la figura 26, el método con mayor costo unitario fue el de balance de masa (Q.6,23/muestra), seguido por el método ICUMSA (Q.5,55/muestra). El costo alto del método de balance de masa se debe a que emplea el equipo de prensado hidráulico y desintegración húmeda, mientras que las demás metodologías, hacen uso de solamente uno de ellos. Además para este método, se analizan dos soluciones líquidas por cada muestra, siendo estas el jugo obtenido de la prensa hidráulica y el extracto obtenido del desintegrador.

El método de menor costo variable por muestra analizada fue el de CONSECANA con un valor de Q.4,56/muestra, seguido por TANIMOTO y TECNICAÑA (Q.5,48/muestra).

El bajo costo de la metodología de CONSECANA, para la determinación de pol y fibra de caña, radica en el ahorro económico de no emplear el horno de secado, el cual es imprescindible en los demás técnicas de análisis.

5.5. Selección de un método de análisis para determinar la calidad de la caña de azúcar

Con base en los análisis anteriores, sobre comparación estadística, económica y de tiempo de ejecución, fue posible identificar una única metodología para determinar la calidad de la caña de azúcar, que fuera confiable estadísticamente y rentable, económicamente. Además se empleó otro factor comparativo, siendo este el de impacto ambiental de las diferentes metodologías, ya que algunos métodos que se utilizaron han sido objeto de controversia por el uso de determinados reactivos que ocasionan daño al medio ambiente, si no son manejados adecuadamente.

En la tabla XXV, se resumen las principales conclusiones de comparación obtenidas a través de las interpretaciones discutidas. Para recomendar la metodología más adecuada se estableció una escala relativa del 0 al 3, con la cual se calificó cada factor de comparación y cada método empleado; donde tres (3) representa el o los métodos recomendados con base en los resultados obtenidos, y el cero (0), el o los métodos no recomendados para ser aplicados bajo las condiciones estudiadas. En la figura 27, se presenta una comparación gráfica de los factores tomados en cuenta para una mejor visualización de los resultados.

Considerando la rentabilidad de los métodos, en cuanto a economía y tiempo, el método CONSECANA fue la metodología ideal para ser aplicada, con una evaluación tres (3) para ambos factores. Seguido por los métodos de TANIMOTO y TECNICAÑA. Por otra parte, los métodos de ICUMSA y balance de masa son muy precisos y rigurosos, pero poco rentables económicamente; esto se confirma con la evaluación baja en economía y tiempo de ejecución, y una evaluación alta en su confiabilidad estadística.

En cuanto al impacto ambiental, el uso de subacetato de plomo como clarificante en las soluciones de jugo de caña ha sido considerado como mala práctica ambiental, por la contaminación con plomo que provoca al medio ambiente. El subacetato de plomo figura como sustancia peligrosa en varias listas de organismos internacionales¹.

Los métodos como ICUMSA y balance de masa emplean este reactivo para la clarificación de las muestras de laboratorio, por lo tanto se evaluaron los factores de impacto ambiental con el valor de cero, para ambos métodos. Por otra parte, los métodos CONSECANA, TECNICAÑA y TANIMOTO, hacen uso del reactivo conocido como octapol para la clarificación de sustancias. El octapol es un reactivo que no contiene plomo y se recomienda a nivel ambiental, para la clarificación de sustancias azucaradas². Por este último hecho, se evaluaron los métodos mencionados con la máxima ponderación de tres.

Como se aprecia en la tabla XXV, en lo referente a la confiabilidad estadística, el método ICUMSA, seleccionado como método de referencia, fue el de mayor confiabilidad estadística. Cabe mencionar que de los métodos que fueron investigados, ICUMSA y el modelo de balance de masa fueron los únicos que aparecen confiables tanto para la determinación de la pol, como de la fibra de caña. Sin embargo, su aplicación no es muy rentable ejecutarla en los laboratorios de los ingenios por sus elevados costos y tiempos de ejecución. Por otra parte, los métodos de CONSECANA, TANIMOTO y TECNICAÑA, aparecen como confiables en solo uno de los dos análisis de calidad.

¹ OROZCO BAUTISTA, José. "Sustitución de subacetato de plomo como clarificante en los análisis de laboratorio en un ingenio azucarero". 2006.

² *Ibíd.*

Por lo tanto, al seleccionar un método de análisis que pueda ser aplicado en las condiciones estudiadas, se recomienda el de dos metodologías combinadas, siendo estas la de CONSECANA para la determinación de pol, y del método de TANIMOTO para la determinación de fibra. De este modo se seleccionó una metodología económica, de tiempo regular de aplicación y de bajo impacto ambiental; pero lo más importante, de confiabilidad estadística considerable.

Fue seleccionado el método de TANIMOTO sobre el método de TECNICAÑA para la determinación de fibra, debido a que TANIMOTO fue el primer sistema desarrollado en Hawai que empleaba una prensa hidráulica³. Por otra parte, el método de TECNICAÑA, que difiere únicamente en la forma de calcular los resultados con el anterior, es una aplicación del primer sistema en Colombia⁴.

La combinación del método completo de CONSECANA para la determinación de pol combinado con el método de TANIMOTO para la determinación de fibra, conlleva a que el tiempo de aplicación y costos unitarios sean de la misma magnitud que el mismo método de TANIMOTO por sí solo. Esto es debido a que la determinación de fibra por TANIMOTO, implica el uso de horno de secado, el cual no se emplea en la metodología CONSECANA.

³ BROKENSHEA, Michael; KING Steve. *“Evaluation of the press method for cane analysis under South African conditions”*. 1976, p. 212-219.

⁴ BUENAVENTURA, Carlos. *Manual de laboratorio para la industria azucarera TECNICAÑA*. 1989.

5.6. Propuesta de la modificación del método CONSECANA para la determinación del porcentaje de fibra en la caña

Debido a que la combinación de los métodos CONSECANA y TANIMOTO no implicó ser la metodología más económica y de menor tiempo de ejecución posible, por razones antes mencionadas, se propuso modificar el método de CONSECANA para la determinación de porcentaje de fibra. Con esto se pretendió establecer un método con menor tiempo de análisis y de menor costo.

A continuación se expone la propuesta del nuevo modelo de la ecuación de CONSECANA, para la determinación de fibra, pero que aplica únicamente para las 30 muestras analizadas. Por lo tanto, no puede ser empleada como sustitución de cualquiera de los cinco métodos estudiados, sino que se presenta para fines demostrativos para el inicio de una nueva investigación. Esto se debe a que la cantidad de muestras analizadas no tiene suficiente representatividad estadística comparada con el número de muestras analizadas durante un período de zafra.

Según Brokensha⁵, los métodos de prensado hidráulico para la determinación de fibra de caña, como el método de CONSECANA, establecen una relación entre el peso de la torta húmeda, que se refiere a la masa de bagazo que queda posterior al prensado, con el porcentaje de fibra en la caña. El peso de la torta húmeda y el porcentaje de fibra, puede ser relacionado por un análisis de regresión lineal mediante la ecuación 8, de forma general:

$$\% F = a \cdot M + b \quad (8)$$

Donde % F se refiere al porcentaje de fibra, M es el peso de la torta húmeda y a y b son constantes.

⁵ BROKENSHA, Michael; KING, Steve. "Evaluation of the press method for cane analysis under South African conditions". 1976, p. 212-219.

Con base en las normas CONSECANA-SP (2006), el porcentaje de fibra se calcula aplicando la ecuación 9.

$$\% F = 0,08 \cdot \text{PBU} + 0,876 \quad (9)$$

Donde PBU (por sus siglas en portugués, peso de bagaço úmido) es el peso de la torta húmeda. Esta última ecuación fue la que se empleó durante la investigación, para el método CONSECANA.

Para la propuesta de la ecuación modificada de CONSECANA, se graficó el porcentaje de fibra obtenido por medio del método de referencia, ICUMSA, contra el peso de la torta húmeda obtenida en la experimentación. En la figura 28 se muestra que la tendencia de esta correlación es ascendente. Aplicando un análisis de correlación lineal (tabla XXVI), se ve que el coeficiente de correlación obtenido fue de 0,717, y una ecuación de la forma:

$$\%F = 0,109 \cdot \text{PBU} - 1,613 \quad (10)$$

A partir de la ecuación 10, se recalcularon los valores de fibra de caña y se compararon con los demás métodos; se obtuvo un comportamiento como el de la figura 29. Como se observa, el método de CONSECANA propuesto para la determinación de fibra se asemejó de mejor manera a los métodos de ICUMSA, TANIMOTO, TECNICAÑA y el modelo de balance de masa.

Al aplicar un análisis de varianza de medidas emparejadas con un nivel de significancia del 0,05, a los cinco métodos de análisis para la determinación de fibra, sustituyendo al método CONSECANA por el propuesto, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla XXVII. El F calculado (1,18) fue menor al F crítico (2,45), por lo que se concluyó que no existían diferencias significativas entre los cinco métodos. Esta conclusión, evidencia que puede aplicarse el método CONSECANA propuesto para la determinación de fibra con un cierto grado de confiabilidad estadística.

5.7. Evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos

La evaluación de las lecturas instrumentales del refractómetro y polarímetro empleados durante la investigación, se realizó durante los días en que se analizaron y compararon los cinco métodos de análisis. Esta evaluación se hizo con el fin de monitorear el funcionamiento correcto de los equipos durante la operación analítica. El análisis de las soluciones estándares se llevó a cabo antes de iniciar la rutina de experimentación.

En la tabla XXVIII, se resumen los resultados obtenidos para la evaluación del refractómetro. La exactitud del procedimiento refractométrico se evaluó por medio de un t de student. En dicha tabla se observa que para el rango seleccionado de concentración de sacarosa (0-20%p/p), todos los valores del estadístico t están por debajo del valor crítico, a un nivel de confianza del 95%. Esto indica que no existen diferencias significativas entre las medias obtenidas y su valor teórico; por lo tanto, puede indicarse que las lecturas dadas por el refractómetro fueron exactas.

La precisión del procedimiento refractométrico se evaluó por medio del coeficiente de varianza (CV), obteniendo como resultado que el procedimiento fue preciso, ya que para todas las soluciones empleadas, no se superó el coeficiente de varianza preestablecido en la investigación (2%).

En lo que respecta al procedimiento polarimétrico, en la tabla XXIX se resumen los resultados del análisis estadístico utilizado. Se aprecia claramente, que el valor estadístico t calculado, es menor al valor crítico t a un nivel de confianza del 95%, por lo que se concluye que no existen diferencias significativas entre las medias de las lecturas obtenidas experimentalmente, con el valor real. Además el coeficiente de variación obtenido de cada solución no

sobrepasó al 2%, preestablecido en la investigación. Por lo tanto, se afirma que las lecturas obtenidas a través del polarímetro empleado fueron exactas y precisas.

Por último, se evaluó la linealidad de cada uno de los procedimientos. Los resultados demuestran que los métodos refractométricos y polarimétricos presentaron linealidad en el rango de concentraciones de sacarosa establecidas (0-20% p/p), ya que los valores obtenidos del coeficiente de correlación fueron muy cercanos a 1, siendo estos igual a 0,9997 y 0,9999, respectivamente (tablas XXX y XXXI).

CONCLUSIONES

1. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en los resultados de pol de caña obtenidos a través de los métodos de ICUMSA, CONSECANA, TANIMOTO, TECNICAÑA y el modelo de balance de masa.
2. Los resultados de pol de caña obtenidos con los métodos ICUMSA, CONSECANA y el modelo de balance de masa, no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$); lo que indica que dichos métodos son comparables y sustituibles entre sí.
3. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en los resultados de porcentaje de fibra de caña obtenidos a través de los métodos de ICUMSA, CONSECANA, TANIMOTO, TECNICAÑA y el modelo de balance de masa.
4. Los resultados de porcentaje de fibra de caña obtenidos con los métodos ICUMSA, TANIMOTO, TECNICAÑA y el modelo de balance de masa no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$); lo que indica que dichos métodos son comparables y sustituibles entre sí.
5. El método de menor tiempo de análisis fue el de CONSECANA, con un tiempo promedio de 26,8 minutos de ejecución por muestra de caña, el cual representa un 89,5% menos al tiempo para aplicar el método de referencia, ICUMSA (255,7 min).

6. El método CONSECANA tiene el menor costo variable por muestra de caña, comparado con los cinco métodos analizados. Su costo es menor a Q.0,99 por muestra, que el método de referencia, ICUMSA.
7. Los métodos más rentables en cuanto a economía y tiempo de ejecución fueron, en orden descendente: CONSECANA (Q.4,56/muestra y 26,8 min), TANIMOTO (Q.5,48/muestra y 212,8 min), TECNICAÑA (Q.5,48/muestra y 212,8 min), ICUMSA (Q.5.,55/muestra y 255,7 min) y el modelo de balance de masa (Q.6,23/muestra y 259,8 min).
8. El método para determinar el pol de caña que resultó ser equivalente estadísticamente con el método de referencia, ICUMSA, además de ser el más económico, de menor tiempo de ejecución y de menor impacto ambiental fue el de CONSECANA.
9. El método para determinar el porcentaje de fibra de caña que resultó ser equivalente estadísticamente con el método de referencia, ICUMSA, además de ser el más económico, de menor tiempo de ejecución y de menor impacto ambiental fue el de TANIMOTO.
10. El procedimiento refractométrico empleado durante la investigación cumplió los requisitos de exactitud (nivel de confianza del 95%), precisión y linealidad en el rango establecido de 0 a 20%, en peso de sacarosa.
11. El procedimiento polarimétrico empleado durante la investigación, cumplió los requisitos de exactitud (nivel de confianza del 95%), precisión y linealidad, en el rango establecido de 0 a 20% en peso de sacarosa.

RECOMENDACIONES

1. Emplear el método CONSECANA para la determinación del pol de caña, y conjuntamente a esta metodología aplicar el método de TANIMOTO para la determinación de la fibra de caña, para calcular el porcentaje de fibra.
2. Realizar una investigación sobre la evaluación del método de prensa hidráulica, CONSECANA, bajo las condiciones de la región. Esto implica la modificación y adaptación de todas las correlaciones del método, tanto para el cálculo de pol y porcentaje de fibra, tomando como referencia el método ICUMSA. El número de muestras que se vaya a analizar deberán ser lo suficientemente significativo con el número de muestras totales analizadas durante todo un período de zafra. Además, la investigación debería durar el tiempo de un período de zafra completo.
3. Evaluar los procedimientos refractométricos y polarimétricos con soluciones estándares de sacarosa grado reactivo, cada 200 muestras analizadas o el equivalente a cada 4 días de labor (esto representa al 2,67% de las muestras totales analizadas durante una zafra) para cerciorarse de que los equipos funcionan adecuadamente. En caso de encontrar desviaciones en la exactitud o precisión de los procedimientos, consultar con una institución competente, para el calibrado correspondiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. BERMÚDEZ, Luis; PESSOA Frank. *Caracterización de la materia prima comercial de caña de azúcar en Costa Rica, con respecto a sus componentes de polarización y contenido de fibra*. XI Congreso Nacional Agronómico. Costa Rica: 1999. 331 p.
2. BROKENSHA, Michael; KING, Steve. "Evaluation of the press method for cane analysis under South African conditions". *Proceedings of The South African Sugar Technologists Association*. Sudáfrica: junio, 1976. 219 p.
3. BUENAVENTURA, Carlos. *Manual de laboratorio para la industria azucarera TECNICAÑA*. Colombia: Graficalli de Occidente, 1989. 40 p.
4. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. México: Editorial Limusa, 2000. 645 p.
5. CLARK, Steve. "Validación de instrumentos". *Sugar Journal*. New York: octubre 1996, vol. 59, num. 5 . 1-11 p.
6. Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (CONSECANA-SP). *Manual de instruções*. 5ª ed. Brasil: Piracicaba-SP, 2006. 111 p.

7. DIEZ, Oscar, et al. "Control de calidad en la materia prima". En: *Manual del cañero*. 1ª ed. Argentina: Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, 2009. 217 p.
8. FERNÁNDEZ, Carlos. *Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar*. 2ª Ed. Brasil: Piracicaba, 2003. 240 p.
9. HERNÁN, Jaime. "El análisis directo de sacarosa en caña (DAC): una herramienta para verificar la precisión del balance de sacarosa". Carta Trimestral, Año 24, num.1. Colombia: CENICAÑA, 2002. 30 p.
10. HERNÁNDEZ, Sampieri; FERNÁNDEZ, Roberto; BAPTISTA, P. *Metodología de la investigación*. 4ª ed. México: McGraw Hill Interamericana, 2006. 265 p.
11. HUGOT, E. *Handbook of cane sugar engineering*. 3ª ed. Holanda: Elsevier Science Publishers, 1986. 1166 p.
12. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA). *Libro de métodos 2005*. New York: Bartens, The Sugar and Sweetener Publisher, 2005. 390 p.
13. The Jamaican Association of Sugar Technologists. *A manual of analytical methods for use in the control laboratories of raw sugar factories*. 2ª ed. Jamaica: University School of Printing, 1987.
14. LARRAHONDO, Jesús. "Calidad de la caña de azúcar". En: *CENICAÑA, el cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. Colombia: Centro de investigación de la caña de azúcar en Colombia,

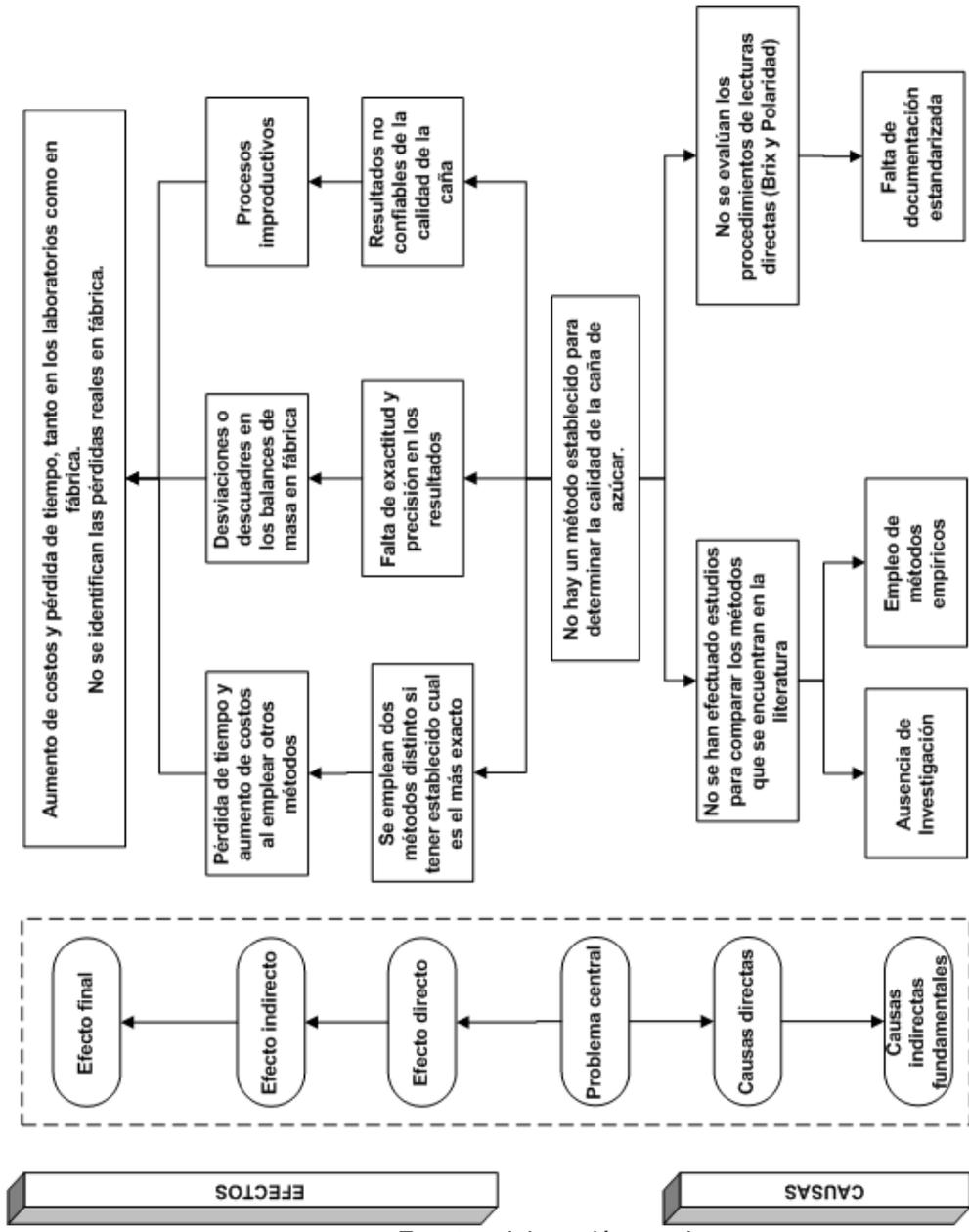
CENICAÑA, 1995. p. 337-354.

15. LAZOS, Rubén; HERNÁNDEZ Ignacio. *La validación de métodos: un enfoque práctico*. Simposio de metrología 2004. México: Centro Nacional de Metrología, 2004. 32 p.
16. MILLER, James. *Estadística y quimiometría para química analítica*. 4ª ed. Madrid: Pearson Education, 2002. 278. p.
17. MONCADA, José. *Estadística para ciencias del movimiento humano*. Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica, 2005. 198 p.
18. OROZCO BAUTISTA, José. *Sustitución de subacetato de plomo como clarificante en los análisis de laboratorio en un ingenio azucarero*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006. 106 p.
19. PÉREZ, José, et al. "Evaluación de variedades de caña de azúcar atendiendo a la calidad de sus jugos". Colombia: Centro Azúcar, 2000, No. 3, Año 27, 25 p.
20. REYES, Flavio. *Selección de un método estándar para evaluar la calidad de la caña de azúcar*. Trabajo de graduación de Ing. Agroindustrial. Escuintla, Guatemala, Centro Universitario del Sur (CONSUR), Universidad de San Carlos de Guatemala, 1999. 134 p.
21. ROMERO, Eduardo; DIGONZELLI, Patricia; SCANDALIARIS Jorge. *Manual del cañero*. Argentina: Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes, 2009. 248 p.

APÉNDICES

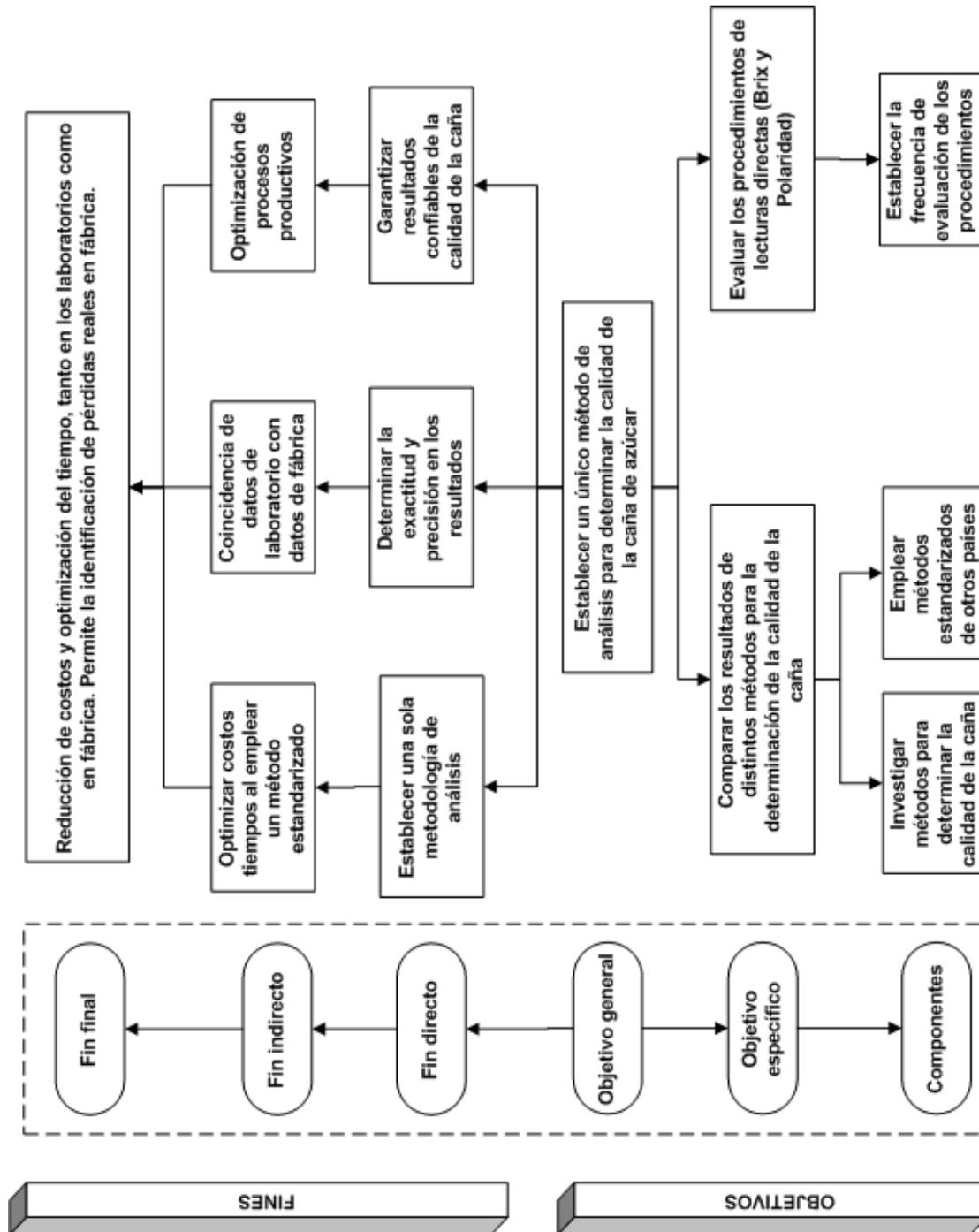
APÉNDICE I. Árbol de problemas

Figura 32. Árbol de problema



Fuente: elaboración propia.

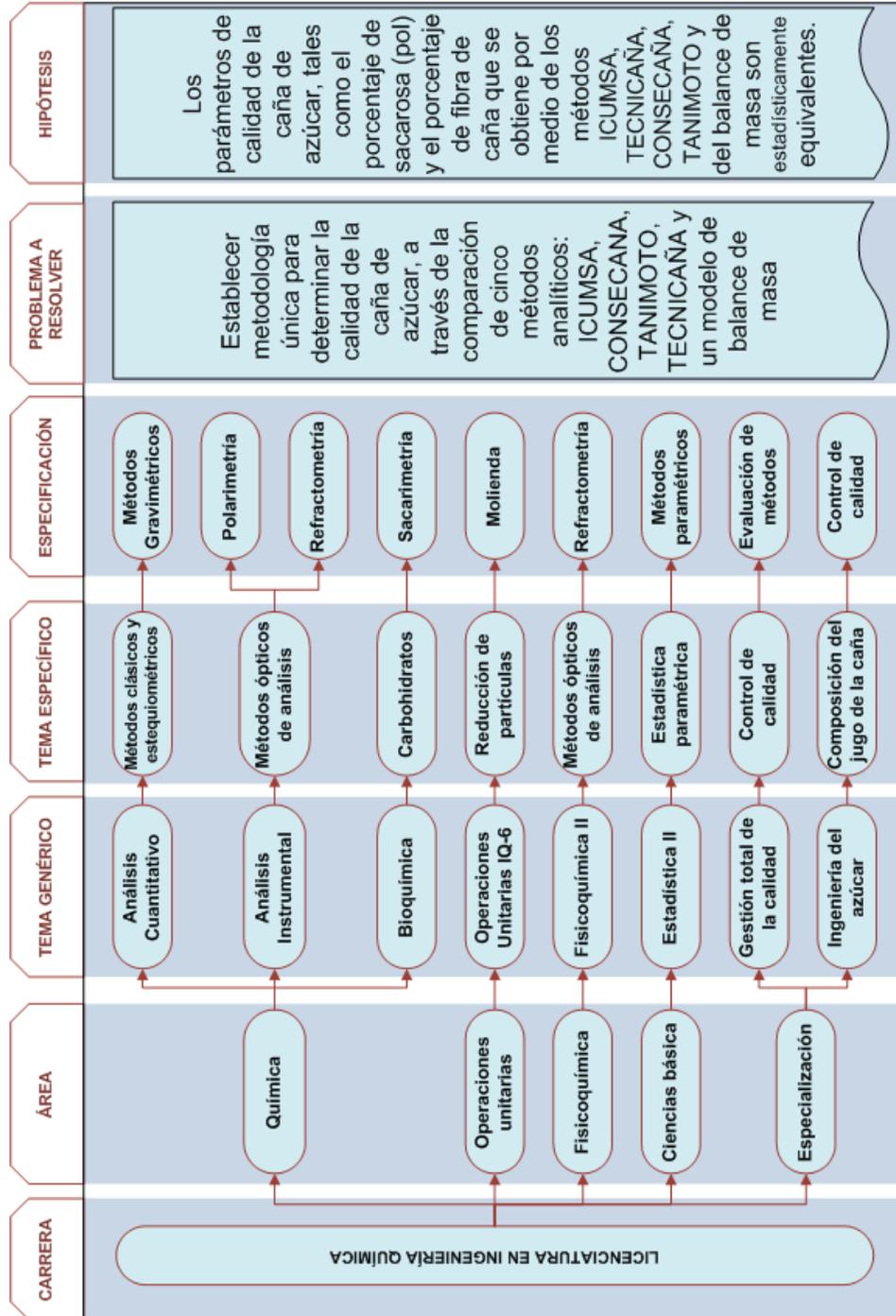
Figura 33. **Árbol de objetivos**



Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE II. Tabla de requisitos académicos

Figura 34. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE III. Datos calculados

Tabla XXXII. **Recolección de datos obtenidos de la aplicación del método de desintegración húmeda ICUMSA**

No.	DESINTEGRADOR		EXTRACTO		FIBRA (Secado)	
	Muestra de caña (g)	Cantidad de agua (g)	Brix extracto	Polarización directa del extracto (S)	Muestra fibra húmeda (g)	Muestra fibra seca (g)
1	400	1200	4,27	13,90	50,00	14,58
2	400	1200	4,09	13,54	50,00	14,91
3	400	1200	4,77	16,30	50,00	17,52
4	400	1200	4,26	14,75	50,00	16,48
5	400	1200	4,53	15,58	50,00	15,98
6	400	1200	4,68	15,14	50,00	17,88
7	400	1200	4,64	16,00	50,00	16,10
8	400	1200	4,83	15,35	100,00	33,33
9	400	1200	4,90	15,62	100,00	33,13
10	400	1200	4,17	13,64	100,00	31,69
11	400	1200	4,55	15,12	20,00	6,09
12	400	1200	4,40	15,55	20,00	5,62
13	400	1200	4,25	13,90	20,00	6,12
14	400	1200	3,74	12,10	50,00	15,19
15	400	1200	3,82	12,90	20,00	5,86
16	400	1200	4,86	15,15	50,00	16,59
17	400	1200	3,84	12,50	50,00	14,87
18	400	1200	3,88	13,08	50,00	14,60
19	400	1200	3,86	12,32	50,00	14,61
20	400	1200	3,60	11,42	50,00	13,82
21	400	1200	3,64	11,88	50,00	15,62
22	400	1200	3,81	12,58	50,00	15,00
23	400	1200	3,90	12,30	50,00	16,15
24	400	1200	4,75	14,67	50,00	16,04
25	400	1200	3,74	13,20	50,00	15,22
26	400	1200	4,05	13,63	50,00	14,07
27	400	1200	4,52	15,17	50,00	16,50
28	400	1200	4,10	12,51	100,00	31,84
29	400	1200	4,52	13,54	50,00	14,01
30	400	1200	4,69	14,75	50,00	15,52

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. Datos calculados para la obtención de resultados aplicando el método de desintegración húmeda ICUMSA

No	CÁLCULOS						RESULTADOS	
	%Humedad de la caña	Pol extracto calculado	Brix Extracto	Z (%Brix - agua libre)	φ	θ	Pol caña	%Fibra
1	70,84	3,56	4,27	25	220	80	13,68	12,76
2	70,18	3,47	4,09	25	220	80	13,27	14,19
3	64,96	4,17	4,77	25	220	80	15,79	16,97
4	67,04	3,78	4,26	25	220	80	14,33	16,82
5	68,04	3,99	4,53	25	220	80	15,22	14,67
6	64,24	3,87	4,68	25	220	80	14,62	18,10
7	67,80	4,09	4,64	25	220	80	15,64	14,48
8	66,67	3,93	4,83	25	220	80	14,97	14,91
9	66,87	3,99	4,90	25	220	80	15,25	14,41
10	68,31	3,50	4,17	25	220	80	13,30	15,84
11	69,55	3,87	4,55	25	220	80	14,85	12,99
12	71,90	3,98	4,40	25	220	80	15,38	11,11
13	69,40	3,56	4,25	25	220	80	13,61	14,36
14	69,62	3,11	3,74	25	220	80	11,80	16,18
15	70,70	3,31	3,82	25	220	80	12,64	14,72
16	66,82	3,87	4,86	25	220	80	14,79	14,63
17	70,26	3,21	3,84	25	220	80	12,23	15,11
18	70,80	3,36	3,88	25	220	80	12,83	14,38
19	70,78	3,16	3,86	25	220	80	12,08	14,48
20	72,36	2,93	3,60	25	220	80	11,23	13,86
21	68,76	3,05	3,64	25	220	80	11,54	17,48
22	70,00	3,23	3,81	25	220	80	12,29	15,50
23	67,70	3,16	3,90	25	220	80	11,93	17,56
24	67,92	3,75	4,75	25	220	80	14,36	13,91
25	69,56	3,39	3,74	25	220	80	12,87	16,24
26	71,86	3,50	4,05	25	220	80	13,43	12,58
27	67,00	3,88	4,52	25	220	80	14,77	15,81
28	68,16	3,21	4,10	25	220	80	12,18	16,27
29	71,98	3,47	4,52	25	220	80	13,41	10,54
30	68,96	3,77	4,69	25	220	80	14,48	13,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. Recolección de datos obtenidos de la aplicación de los métodos de prensa hidráulica CONSECANA, TANIMOTO y TECNICAÑA

CONSECANA, TANIMOTO, TECNICAÑA					TANIMOTO, TECNICAÑA	
No.	Prensa Hidráulica		JUGO		TORTA (Secado)	
	Peso muestra (g)	Peso torta húmeda (g)	Brix jugo	Polarización directa del jugo (S)	Muestra torta húmeda (g)	Muestra torta seca (g)
1	500	143,30	18,69	65,96	40,00	22,12
2	500	141,50	18,51	65,73	30,00	18,08
3	500	152,20	21,81	79,78	40,00	26,16
4	500	169,50	19,54	74,31	20,00	11,87
5	500	161,60	20,66	77,18	20,00	10,61
6	500	174,60	22,05	75,84	50,00	31,17
7	500	137,70	20,79	75,78	20,00	11,44
8	500	148,80	21,91	75,43	40,00	24,01
9	500	154,20	21,47	73,65	40,00	24,63
10	500	153,60	18,87	65,41	30,00	19,22
11	500	132,00	20,58	72,93	20,00	11,73
12	500	125,80	20,13	72,95	20,00	11,15
13	500	150,30	18,61	66,74	20,00	12,28
14	500	167,70	17,39	60,00	20,00	11,36
15	500	153,00	18,32	63,38	20,00	11,60
16	500	151,20	21,19	72,10	30,00	17,98
17	500	150,70	18,28	62,37	20,00	11,88
18	500	142,60	17,72	62,58	30,00	17,24
19	500	150,30	17,58	59,89	40,00	22,63
20	500	143,50	16,58	54,02	40,00	22,65
21	500	179,50	16,02	53,84	40,00	23,02
22	500	164,00	17,19	60,98	30,00	16,83
23	500	179,20	18,21	63,94	40,00	23,23
24	500	147,00	21,59	70,77	30,00	17,28
25	500	150,30	19,26	72,06	20,00	12,20
26	500	134,50	17,70	64,36	25,00	14,15
27	500	148,90	19,95	71,85	25,00	15,70
28	500	141,80	17,22	60,38	20,00	13,05
29	500	125,30	18,56	62,77	20,00	10,52
30	500	143,30	20,80	71,12	20,00	11,53

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Datos calculados para la obtención de resultados aplicando el método de prensa hidráulica CONSECANA**

No.	CÁLCULOS				RESULTADOS	
	Pol jugo calculado	Brix jugo	%Fibra	Coefficiente C	Pol caña	%Fibra
1	15,96	18,69	12,34	0,96	13,44	12,34
2	15,92	18,51	12,20	0,96	13,44	12,20
3	19,06	21,81	13,05	0,96	15,85	13,05
4	17,92	19,54	14,44	0,95	14,54	14,44
5	18,53	20,66	13,80	0,95	15,20	13,80
6	18,10	22,05	14,84	0,95	14,58	14,84
7	18,18	20,79	11,89	0,96	15,43	11,89
8	18,02	21,91	12,78	0,96	15,05	12,78
9	17,62	21,47	13,21	0,96	14,61	13,21
10	15,82	18,87	13,16	0,96	13,13	13,16
11	17,52	20,58	11,44	0,97	14,98	11,44
12	17,55	20,13	10,94	0,97	15,14	10,94
13	16,16	18,61	12,90	0,96	13,47	12,90
14	14,60	17,39	14,29	0,95	11,88	14,29
15	15,36	18,32	13,12	0,96	12,76	13,12
16	17,27	21,19	12,97	0,96	14,38	12,97
17	15,12	18,28	12,93	0,96	12,60	12,93
18	15,21	17,72	12,28	0,96	12,81	12,28
19	14,56	17,58	12,90	0,96	12,14	12,90
20	13,19	16,58	12,36	0,96	11,10	12,36
21	13,17	16,02	15,24	0,94	10,54	15,24
22	14,85	17,19	14,00	0,95	12,14	14,00
23	15,51	18,21	15,21	0,94	12,41	15,21
24	16,93	21,59	12,64	0,96	14,18	12,64
25	17,40	19,26	12,90	0,96	14,51	12,90
26	15,64	17,70	11,64	0,96	13,33	11,64
27	17,30	19,95	12,79	0,96	14,45	12,79
28	14,70	17,22	12,22	0,96	12,40	12,22
29	15,20	18,56	10,90	0,97	13,12	10,90
30	17,06	20,80	12,34	0,96	14,37	12,34

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Datos calculados para la obtención de resultados aplicando el método de prensa hidráulica TANIMOTO**

No.	CÁLCULOS				RESULTADOS	
	Peso torta seca calculado	Pol jugo calculado	Brix jugo	Humedad bagazo	Pol caña	%Fibra
1	79,24	15,96	18,69	44,70	13,31	12,90
2	85,28	15,92	18,51	39,73	12,90	14,50
3	99,54	19,06	21,81	34,60	14,78	16,97
4	100,60	17,92	19,54	40,65	13,94	16,77
5	85,73	18,53	20,66	46,95	15,37	13,19
6	108,85	18,10	22,05	37,66	13,76	18,05
7	78,76	18,18	20,79	42,80	15,22	12,66
8	89,32	18,02	21,91	39,98	14,60	14,53
9	94,95	17,62	21,47	38,43	13,97	15,75
10	98,41	15,82	18,87	35,93	12,23	17,11
11	77,42	17,52	20,58	41,35	14,66	12,65
12	70,13	17,55	20,13	44,25	15,07	11,22
13	92,28	16,16	18,61	38,60	12,79	15,80
14	95,25	14,60	17,39	43,20	11,52	16,00
15	88,74	15,36	18,32	42,00	12,37	14,87
16	90,62	17,27	21,19	40,07	13,91	14,87
17	89,52	15,12	18,28	40,60	12,11	15,17
18	81,95	15,21	17,72	42,53	12,48	13,78
19	85,03	14,56	17,58	43,43	11,86	14,22
20	81,26	13,19	16,58	43,37	10,83	13,78
21	103,30	13,17	16,02	42,45	10,07	17,75
22	92,00	14,85	17,19	43,90	11,84	15,41
23	104,07	15,51	18,21	41,92	11,91	17,47
24	84,67	16,93	21,59	42,40	13,96	13,50
25	91,68	17,40	19,26	39,00	13,84	15,54
26	76,13	15,64	17,70	43,40	13,08	12,71
27	93,51	17,30	19,95	37,20	13,66	15,94
28	92,52	14,70	17,22	34,75	11,50	16,45
29	65,91	15,20	18,56	47,40	13,21	10,47
30	82,61	17,06	20,80	42,35	14,12	13,33

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. Datos calculados para la obtención de resultados aplicando el método de prensa hidráulica TECNICAÑA

No	CÁLCULOS								RESULTADOS	
	Peso torta seca calculado	Pol Jugo calculado	Brix jugo	% Torta	% Humedad torta	%Fibra en bagazo	%Fibra en caña	% jugo absoluto	Pol caña	%Fibra
1	79,24	15,96	18,69	28,66	44,70	45,03	12,90	87,10	13,90	12,90
2	85,28	15,92	18,51	28,30	39,73	51,24	14,50	85,50	13,61	14,50
3	99,54	19,06	21,81	30,44	34,60	55,75	16,97	83,03	15,83	16,97
4	100,60	17,92	19,54	33,90	40,65	49,48	16,77	83,23	14,92	16,77
5	85,73	18,53	20,66	32,32	46,95	40,82	13,19	86,81	16,08	13,19
6	108,85	18,10	22,05	34,92	37,66	51,69	18,05	81,95	14,84	18,05
7	78,76	18,18	20,79	27,54	42,80	45,97	12,66	87,34	15,88	12,66
8	89,32	18,02	21,91	29,76	39,98	48,81	14,53	85,47	15,40	14,53
9	94,95	17,62	21,47	30,84	38,43	51,07	15,75	84,25	14,85	15,75
10	98,41	15,82	18,87	30,72	35,93	55,71	17,11	82,89	13,11	17,11
11	77,42	17,52	20,58	26,40	41,35	47,94	12,65	87,35	15,30	12,65
12	70,13	17,55	20,13	25,16	44,25	44,60	11,22	88,78	15,58	11,22
13	92,28	16,16	18,61	30,06	38,60	52,57	15,80	84,20	13,60	15,80
14	95,25	14,60	17,39	33,54	43,20	47,71	16,00	84,00	12,26	16,00
15	88,74	15,36	18,32	30,60	42,00	48,58	14,87	85,13	13,08	14,87
16	90,62	17,27	21,19	30,24	40,07	49,16	14,87	85,13	14,70	14,87
17	89,52	15,12	18,28	30,14	40,60	50,32	15,17	84,83	12,83	15,17
18	81,95	15,21	17,72	28,52	42,53	48,31	13,78	86,22	13,11	13,78
19	85,03	14,56	17,58	30,06	43,43	47,31	14,22	85,78	12,49	14,22
20	81,26	13,19	16,58	28,70	43,37	48,00	13,78	86,22	11,37	13,78
21	103,30	13,17	16,02	35,90	42,45	49,45	17,75	82,25	10,83	17,75
22	92,00	14,85	17,19	32,80	43,90	46,99	15,41	84,59	12,56	15,41
23	104,07	15,51	18,21	35,84	41,92	48,74	17,47	82,53	12,80	17,47
24	84,67	16,93	21,59	29,40	42,40	45,93	13,50	86,50	14,64	13,50
25	91,68	17,40	19,26	30,06	39,00	51,70	15,54	84,46	14,70	15,54
26	76,13	15,64	17,70	26,90	43,40	47,27	12,71	87,29	13,65	12,71
27	93,51	17,30	19,95	29,78	37,20	53,53	15,94	84,06	14,54	15,94
28	92,52	14,70	17,22	28,36	34,75	58,02	16,45	83,55	12,28	16,45
29	65,91	15,20	18,56	25,06	47,40	41,80	10,47	89,53	13,61	10,47
30	82,61	17,06	20,80	28,66	42,35	46,53	13,33	86,67	14,79	13,33

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Recolección de datos obtenidos de la aplicación del método de balance de masa**

No.	PRENSA HIDRAÚLICA		JUGO		TORTA					
	Peso muestra (g)	Peso torta húmeda (g)	Brix jugo	Polarización directa del jugo (S)	Muestra torta desintegrador (g)	Agua desintegrador (g)	Brix torta	Polarización directa de torta (S)	Muestra torta húmeda (g)	Muestra torta seca (g)
1	500	143,30	18,69	65,96	100	1000	0,89	2,65	40,00	22,12
2	500	141,50	18,51	65,73	100	1000	0,71	2,40	30,00	18,08
3	500	152,20	21,81	79,78	100	1000	1,04	3,29	40,00	26,16
4	500	169,50	19,54	74,31	100	1000	0,90	2,76	20,00	11,87
5	500	161,60	20,66	77,18	100	1000	0,93	2,91	20,00	10,61
6	500	174,60	22,05	75,84	100	1000	0,78	2,20	50,00	31,17
7	500	137,70	20,79	75,78	100	1000	0,94	3,14	20,00	11,44
8	500	148,80	21,91	75,43	100	1000	0,90	2,72	40,00	24,01
9	500	154,20	21,47	73,65	100	1000	0,97	2,74	40,00	24,63
10	500	153,60	18,87	65,41	100	1000	0,71	2,27	30,00	19,22
11	500	132,00	20,58	72,93	100	1000	0,91	2,52	20,00	11,73
12	500	125,80	20,13	72,95	100	1000	0,99	3,06	20,00	11,15
13	500	150,30	18,61	66,74	100	1000	0,93	2,48	20,00	12,28
14	500	167,70	17,39	60,00	100	1000	0,74	2,24	20,00	11,36
15	500	153,00	18,32	63,38	100	1000	0,77	2,53	20,00	11,60
16	500	151,20	21,19	72,10	100	1000	0,99	2,85	30,00	17,98
17	500	150,70	18,28	62,37	100	1000	0,81	2,46	20,00	11,88
18	500	142,60	17,72	62,58	100	1000	0,70	2,33	30,00	17,24
19	500	150,30	17,58	59,89	100	1000	0,78	2,23	40,00	22,63
20	500	143,50	16,58	54,02	100	1000	0,78	2,20	40,00	22,65
21	500	179,50	16,02	53,84	100	1000	0,91	1,88	40,00	23,02
22	500	164,00	17,19	60,98	100	1000	0,73	2,22	30,00	16,83
23	500	179,20	18,21	63,94	100	1000	0,73	2,25	40,00	23,23
24	500	147,00	21,59	70,77	100	1000	0,94	2,59	30,00	17,28
25	500	150,30	19,26	72,06	100	1000	0,74	2,18	20,00	12,20
26	500	134,50	17,70	64,36	100	1000	0,76	2,30	25,00	14,15
27	500	148,90	19,95	71,85	100	1000	0,86	2,56	25,00	15,70
28	500	141,80	17,22	60,38	100	1000	0,76	2,15	20,00	13,05
29	500	125,30	18,56	62,77	100	1000	0,85	2,83	20,00	10,52
30	500	143,30	20,80	71,12	100	1000	1,11	2,74	20,00	11,53

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XXXIX. Datos calculados para la obtención de resultados
aplicando el método de balance de masa**

No.	CÁLCULOS								RESULTADOS	
	Peso torta seca calculado	Pol jugo calculado	Brix jugo	Brix torta	Pol torta	% torta	% jugo	% Humedad bagazo	Pol caña	%Fibra
1	79,24	15,96	18,69	9,39	7,27	28,7%	71,3%	44,70	13,47	13,16
2	85,28	15,92	18,51	7,49	6,58	28,3%	71,7%	39,73	13,28	14,94
3	99,54	19,06	21,81	10,97	9,02	30,4%	69,6%	34,60	16,01	16,57
4	100,60	17,92	19,54	9,50	7,57	33,9%	66,1%	40,65	14,41	16,90
5	85,73	18,53	20,66	9,81	7,98	32,3%	67,7%	46,95	15,12	13,97
6	108,85	18,10	22,05	8,23	6,03	34,9%	65,1%	37,66	13,89	18,90
7	78,76	18,18	20,79	9,92	8,61	27,5%	72,5%	42,80	15,55	13,02
8	89,32	18,02	21,91	9,50	7,46	29,8%	70,2%	39,98	14,88	15,04
9	94,95	17,62	21,47	10,23	7,52	30,8%	69,2%	38,43	14,51	15,83
10	98,41	15,82	18,87	7,49	6,23	30,7%	69,3%	35,93	12,87	17,38
11	77,42	17,52	20,58	9,60	6,91	26,4%	73,6%	41,35	14,72	12,95
12	70,13	17,55	20,13	10,44	8,39	25,2%	74,8%	44,25	15,25	11,40
13	92,28	16,16	18,61	9,81	6,80	30,1%	69,9%	38,60	13,35	15,51
14	95,25	14,60	17,39	7,81	6,14	33,5%	66,5%	43,20	11,76	16,43
15	88,74	15,36	18,32	8,12	6,94	30,6%	69,4%	42,00	12,79	15,26
16	90,62	17,27	21,19	10,44	7,82	30,2%	69,8%	40,07	14,41	14,97
17	89,52	15,12	18,28	8,55	6,75	30,1%	69,9%	40,60	12,60	15,33
18	81,95	15,21	17,72	7,39	6,39	28,5%	71,5%	42,53	12,69	14,28
19	85,03	14,56	17,58	8,23	6,12	30,1%	69,9%	43,43	12,02	14,53
20	81,26	13,19	16,58	8,23	6,03	28,7%	71,3%	43,37	11,13	13,89
21	103,30	13,17	16,02	9,60	5,15	35,9%	64,1%	42,45	10,29	17,21
22	92,00	14,85	17,19	7,70	6,09	32,8%	67,2%	43,90	11,98	15,87
23	104,07	15,51	18,21	7,70	6,17	35,8%	64,2%	41,92	12,16	18,05
24	84,67	16,93	21,59	9,92	7,10	29,4%	70,6%	42,40	14,04	14,02
25	91,68	17,40	19,26	7,81	5,98	30,1%	69,9%	39,00	13,97	15,99
26	76,13	15,64	17,70	8,02	6,31	26,9%	73,1%	43,40	13,13	13,07
27	93,51	17,30	19,95	9,07	7,02	29,8%	70,2%	37,20	14,24	16,00
28	92,52	14,70	17,22	8,02	5,90	28,4%	71,6%	34,75	12,20	16,23
29	65,91	15,20	18,56	8,97	7,77	25,1%	74,9%	47,40	13,34	10,93
30	82,61	17,06	20,80	11,66	7,52	28,7%	71,3%	42,35	14,33	13,18

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Resultados de pol de caña obtenidos al aplicar los cinco métodos de análisis**

No.	POL DE CAÑA				
	ICUMSA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance de masa
1	13,68	13,44	13,31	13,90	13,47
2	13,27	13,44	12,90	13,61	13,28
3	15,79	15,85	14,78	15,83	16,01
4	14,33	14,54	13,94	14,92	14,41
5	15,22	15,20	15,37	16,08	15,12
6	14,62	14,58	13,76	14,84	13,89
7	15,64	15,43	15,22	15,88	15,55
8	14,97	15,05	14,60	15,40	14,88
9	15,25	14,61	13,97	14,85	14,51
10	13,30	13,13	12,23	13,11	12,87
11	14,85	14,98	14,66	15,30	14,72
12	15,38	15,14	15,07	15,58	15,25
13	13,61	13,47	12,79	13,60	13,35
14	11,80	11,88	11,52	12,26	11,76
15	12,64	12,76	12,37	13,08	12,79
16	14,79	14,38	13,91	14,70	14,41
17	12,23	12,60	12,11	12,83	12,60
18	12,83	12,81	12,48	13,11	12,69
19	12,08	12,14	11,86	12,49	12,02
20	11,23	11,10	10,83	11,37	11,13
21	11,54	10,54	10,07	10,83	10,29
22	12,29	12,14	11,84	12,56	11,98
23	11,93	12,41	11,91	12,80	12,16
24	14,36	14,18	13,96	14,64	14,04
25	12,87	14,51	13,84	14,70	13,97
26	13,43	13,33	13,08	13,65	13,13
27	14,77	14,45	13,66	14,54	14,24
28	12,18	12,40	11,50	12,28	12,20
29	13,41	13,12	13,21	13,61	13,34
30	14,48	14,37	14,12	14,79	14,33

Fuente: elaboración propia. Con datos de las tablas XXXIII, XXXV, XXXVI, XXXVII y XXXIX.

Tabla XLI. Datos calculados para la aplicación del ANOVA de los métodos de determinación de pol de caña

No. Muestra (i)	MÉTODOS					Conteo (K)	$\sum X_i$	$\frac{\sum X_i^2}{K}$
	ICUM SA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance de Masa			
1	13,68	13,44	13,31	13,90	13,47	5	67,80	919,49
2	13,27	13,44	12,90	13,61	13,28	5	66,50	884,51
3	15,79	15,85	14,78	15,83	16,01	5	78,26	1224,84
4	14,33	14,54	13,94	14,92	14,41	5	72,14	1040,95
5	15,22	15,20	15,37	16,08	15,12	5	77,00	1185,84
6	14,62	14,58	13,76	14,84	13,89	5	71,69	1027,86
7	15,64	15,43	15,22	15,88	15,55	5	77,72	1208,00
8	14,97	15,05	14,60	15,40	14,88	5	74,89	1121,72
9	15,25	14,61	13,97	14,85	14,51	5	73,19	1071,27
10	13,30	13,13	12,23	13,11	12,87	5	64,64	835,67
11	14,85	14,98	14,66	15,30	14,72	5	74,51	1110,37
12	15,38	15,14	15,07	15,58	15,25	5	76,41	1167,80
13	13,61	13,47	12,79	13,60	13,35	5	66,83	893,15
14	11,80	11,88	11,52	12,26	11,76	5	59,22	701,44
15	12,64	12,76	12,37	13,08	12,79	5	63,63	809,81
16	14,79	14,38	13,91	14,70	14,41	5	72,19	1042,37
17	12,23	12,60	12,11	12,83	12,60	5	62,36	777,86
18	12,83	12,81	12,48	13,11	12,69	5	63,93	817,29
19	12,08	12,14	11,86	12,49	12,02	5	60,59	734,18
20	11,23	11,10	10,83	11,37	11,13	5	55,66	619,50
21	11,54	10,54	10,07	10,83	10,29	5	53,27	567,64
22	12,29	12,14	11,84	12,56	11,98	5	60,81	739,67
23	11,93	12,41	11,91	12,80	12,16	5	61,21	749,37
24	14,36	14,18	13,96	14,64	14,04	5	71,17	1013,15
25	12,87	14,51	13,84	14,70	13,97	5	69,88	976,73
26	13,43	13,33	13,08	13,65	13,13	5	66,62	887,77
27	14,77	14,45	13,66	14,54	14,24	5	71,67	1027,21
28	12,18	12,40	11,50	12,28	12,20	5	60,57	733,84
29	13,41	13,12	13,21	13,61	13,34	5	66,69	889,48
30	14,48	14,37	14,12	14,79	14,33	5	72,08	1039,17
Conteo (n)	30	30	30	30	30	150		
$\sum X_i$	408,78	407,96	394,89	417,16	404,38			
$\frac{\sum X_i^2}{K}$	5569,98	5547,65382	5197,923	5800,689	5450,64			
$\sum X_i^2$	5622,72	5599,59775	5250,809	5855,46	5504,22			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Resultados del ANOVA de medidas emparejadas de los métodos para determinar el pol de caña**

Fuente de varianza	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrado medio (MS)	F calculado	Significancia (α)	F crítico
Entre métodos	29	259,77	8,96	169,00		
Dentro de métodos	4	8,67	2,17	40,90	0,05	2,45
Residual	116	6,15	0,05			
Total	149	274,59				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Cálculo de HSD para la aplicación de la prueba de Tukey a los métodos para determinar el pol de caña**

Grados de libertad (gl)	Significancia	Valor α de Tukey	MS residual	N	HSD
4	0,05	3,68	---	30	0,15
116	0,05	3,68	0,053	30	0,15

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Desglose de las diferencias de medias globales de pol de caña de los métodos para la aplicación de la prueba de Tukey**

	Métodos	ICUMSA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance de masa
Métodos	Media global	13,63	13,60	13,16	13,91	13,48
ICUMSA	13,63	---	0,03	0,46	0,28	0,15
CONSECANA	13,60	0,03	---	0,44	0,31	0,12
TANIMOTO	13,16	0,46	0,44	---	0,74	0,32
TECNICAÑA	13,91	0,28	0,31	0,74	---	0,43
Balance de masa	13,48	0,15	0,12	0,32	0,43	---

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Análisis de percentiles para la construcción del diagrama de cajas de la comparación de pol de caña entre métodos**

POL DE CAÑA					
	ICUMSA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance de masa
	11,23	10,54	10,07	10,83	10,29
	11,54	11,10	10,83	11,37	11,13
	11,80	11,88	11,50	12,26	11,76
	11,93	12,14	11,52	12,28	11,98
	12,08	12,14	11,84	12,49	12,02
	12,18	12,40	11,86	12,56	12,16
	12,23	12,41	11,91	12,80	12,20
	12,29	12,60	12,11	12,83	12,60
	12,64	12,76	12,23	13,08	12,69
	12,83	12,81	12,37	13,11	12,79
	12,87	13,12	12,48	13,11	12,87
	13,27	13,13	12,79	13,60	13,13
	13,30	13,33	12,90	13,61	13,28
	13,41	13,44	13,08	13,61	13,34
	13,43	13,44	13,21	13,65	13,35
	13,61	13,47	13,31	13,90	13,47
	13,68	14,18	13,66	14,54	13,89
	14,33	14,37	13,76	14,64	13,97
	14,36	14,38	13,84	14,70	14,04
	14,48	14,45	13,91	14,70	14,24
	14,62	14,51	13,94	14,79	14,33
	14,77	14,54	13,96	14,84	14,41
	14,79	14,58	13,97	14,85	14,41
	14,85	14,61	14,12	14,92	14,51
	14,97	14,98	14,60	15,30	14,72
	15,22	15,05	14,66	15,40	14,88
	15,25	15,14	14,78	15,58	15,12
	15,38	15,20	15,07	15,83	15,25
	15,64	15,43	15,22	15,88	15,55
	15,79	15,85	15,37	16,08	16,01
Min	11,23	10,54	10,07	10,83	10,29
Q1	12,38	12,64	12,14	12,89	12,62
Mediana	13,52	13,45	13,26	13,78	13,41
Q3	14,78	14,57	13,97	14,84	14,41
Max	15,79	15,85	15,37	16,08	16,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Resultados de porcentaje de fibra de caña obtenidos al aplicar los cinco métodos de análisis**

No.	%FIBRA DE CAÑA				
	ICUMSA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance de masa
1	12,76	12,34	12,90	12,90	13,16
2	14,19	12,20	14,50	14,50	14,94
3	16,97	13,05	16,97	16,97	16,57
4	16,82	14,44	16,77	16,77	16,90
5	14,67	13,80	13,19	13,19	13,97
6	18,10	14,84	18,05	18,05	18,90
7	14,48	11,89	12,66	12,66	13,02
8	14,91	12,78	14,53	14,53	15,04
9	14,41	13,21	15,75	15,75	15,83
10	15,84	13,16	17,11	17,11	17,38
11	12,99	11,44	12,65	12,65	12,95
12	11,11	10,94	11,22	11,22	11,40
13	14,36	12,90	15,80	15,80	15,51
14	16,18	14,29	16,00	16,00	16,43
15	14,72	13,12	14,87	14,87	15,26
16	14,63	12,97	14,87	14,87	14,97
17	15,11	12,93	15,17	15,17	15,33
18	14,38	12,28	13,78	13,78	14,28
19	14,48	12,90	14,22	14,22	14,53
20	13,86	12,36	13,78	13,78	13,89
21	17,48	15,24	17,75	17,75	17,21
22	15,50	14,00	15,41	15,41	15,87
23	17,56	15,21	17,47	17,47	18,05
24	13,91	12,64	13,50	13,50	14,02
25	16,24	12,90	15,54	15,54	15,99
26	12,58	11,64	12,71	12,71	13,07
27	15,81	12,79	15,94	15,94	16,00
28	16,27	12,22	16,45	16,45	16,23
29	10,54	10,90	10,47	10,47	10,93
30	13,04	12,34	13,33	13,33	13,18

Fuente: elaboración propia. Con datos de las tablas XXXIII, XXXV, XXXVI, XXXVII y XXXIX.

Tabla XLVII. Datos calculados para la aplicación del ANOVA de los métodos de determinación de porcentaje de fibra de caña

	FIBRA DE CAÑA					Conteo (K)	$\sum X_i$	$\frac{\sum X_i^2}{K}$
	ICUMSA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balace de Masa			
1	12,76	12,34	12,90	12,90	13,16	5	64,07	820,93
2	14,19	12,20	14,50	14,50	14,94	5	70,32	988,97
3	16,97	13,05	16,97	16,97	16,57	5	80,53	1297,07
4	16,82	14,44	16,77	16,77	16,90	5	81,70	1334,92
5	14,67	13,80	13,19	13,19	13,97	5	68,84	947,74
6	18,10	14,84	18,05	18,05	18,90	5	87,94	1546,57
7	14,48	11,89	12,66	12,66	13,02	5	64,71	837,53
8	14,91	12,78	14,53	14,53	15,04	5	71,78	1030,45
9	14,41	13,21	15,75	15,75	15,83	5	74,96	1123,75
10	15,84	13,16	17,11	17,11	17,38	5	80,61	1299,50
11	12,99	11,44	12,65	12,65	12,95	5	62,68	785,84
12	11,11	10,94	11,22	11,22	11,40	5	55,89	624,77
13	14,36	12,90	15,80	15,80	15,51	5	74,38	1106,42
14	16,18	14,29	16,00	16,00	16,43	5	78,90	1245,10
15	14,72	13,12	14,87	14,87	15,26	5	72,83	1060,90
16	14,63	12,97	14,87	14,87	14,97	5	72,30	1045,45
17	15,11	12,93	15,17	15,17	15,33	5	73,70	1086,19
18	14,38	12,28	13,78	13,78	14,28	5	68,50	938,37
19	14,48	12,90	14,22	14,22	14,53	5	70,36	989,98
20	13,86	12,36	13,78	13,78	13,89	5	67,66	915,67
21	17,48	15,24	17,75	17,75	17,21	5	85,43	1459,72
22	15,50	14,00	15,41	15,41	15,87	5	76,19	1161,05
23	17,56	15,21	17,47	17,47	18,05	5	85,76	1470,94
24	13,91	12,64	13,50	13,50	14,02	5	67,56	912,97
25	16,24	12,90	15,54	15,54	15,99	5	76,21	1161,57
26	12,58	11,64	12,71	12,71	13,07	5	62,71	786,52
27	15,81	12,79	15,94	15,94	16,00	5	76,48	1169,94
28	16,27	12,22	16,45	16,45	16,23	5	77,63	1205,43
29	10,54	10,90	10,47	10,47	10,93	5	53,32	568,56
30	13,04	12,34	13,33	13,33	13,18	5	65,24	851,13
Conteo (n)	30	30	30	30	30	150		
$\sum X_i$	443,88	387,71	443,39	443,39	450,82			
$\frac{\sum X_i^2}{K}$	6567,51	5010,6865	6553,149	6553,149	6774,55			
$\sum X_i^2$	6660,84	5046,76528	6659,598	6659,598	6875,16			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Resultados del ANOVA de medidas emparejadas de los métodos, para determinar el porcentaje de fibra de caña**

Fuente de varianza	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrado medio (MS)	F calculado	Significancia (α)	F crítico
Entre métodos	29	404,88	13,96	42,58		
Dentro de métodos	4	89,97	22,49	68,60	0,05	2,45
Residual	116	38,03	0,33			
Total	149	532,88				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Cálculo de HSD para la aplicación de la prueba de Tukey a los métodos, para determinar el porcentaje de fibra caña**

Grados de libertad (gl)	Significancia	Valor α de Tukey	MS residual	N	HSD
4	0,05	3,68	---	30	0,38
116	0,05	3,68	0,330	30	0,38

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Desglose de las diferencias de medias globales de porcentaje de fibra de caña, de los métodos para la aplicación de la prueba de Tukey**

	Métodos	ICUMSA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance de masa
Métodos	Promedio global	14,80	12,92	14,78	14,78	15,03
ICUMSA	14,80	---	1,87	0,02	0,02	0,23
CONSECANA	12,92	1,87	---	1,86	1,86	2,10
TANIMOTO	14,78	0,02	1,86	---	0,00	0,25
TECNICAÑA	14,78	0,02	1,86	0,00	---	0,25
Balance de masa	15,03	0,23	2,10	0,25	0,25	---

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Análisis de percentiles para la construcción del diagrama de cajas de la comparación de fibra de caña entre métodos**

% FIBRA DE CAÑA					
	ICUMSA	CONSECANA	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance de masa
	10,54	10,90	10,47	10,47	10,93
	11,11	10,94	11,22	11,22	11,40
	12,58	11,44	12,65	12,65	12,95
	12,76	11,64	12,66	12,66	13,02
	12,99	11,89	12,71	12,71	13,07
	13,04	12,20	12,90	12,90	13,16
	13,86	12,22	13,19	13,19	13,18
	13,91	12,28	13,33	13,33	13,89
	14,19	12,34	13,50	13,50	13,97
	14,36	12,34	13,78	13,78	14,02
	14,38	12,36	13,78	13,78	14,28
	14,41	12,64	14,22	14,22	14,53
	14,48	12,78	14,50	14,50	14,94
	14,48	12,79	14,53	14,53	14,97
	14,63	12,90	14,87	14,87	15,04
	14,67	12,90	14,87	14,87	15,26
	14,72	12,90	15,17	15,17	15,33
	14,91	12,93	15,41	15,41	15,51
	15,11	12,97	15,54	15,54	15,83
	15,50	13,05	15,75	15,75	15,87
	15,81	13,12	15,80	15,80	15,99
	15,84	13,16	15,94	15,94	16,00
	16,18	13,21	16,00	16,00	16,23
	16,24	13,80	16,45	16,45	16,43
	16,27	14,00	16,77	16,77	16,57
	16,82	14,29	16,97	16,97	16,90
	16,97	14,44	17,11	17,11	17,21
	17,48	14,84	17,47	17,47	17,38
	17,56	15,21	17,75	17,75	18,05
	18,10	15,24	18,05	18,05	18,90
Min	10,54	10,90	10,47	10,47	10,93
Q1	13,98	12,30	13,38	13,38	13,91
Mediana	14,65	12,90	14,87	14,87	15,15
Q3	16,09	13,20	15,99	15,99	16,17
Max	18,10	15,24	18,05	18,05	18,90

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Recolección de datos de tiempo de ejecución, para el método de desintegración húmeda ICUMSA**

Descripción		TIEMPO DE EJECUCIÓN (min)		
		Analista 1	Analista 2	Analista 3
TOMA DE MUESTRA	Toma muestra	3,4	2,9	3,3
	Desfibrado	1,2	1,5	1,3
	Homogenizado	1,5	1,4	1,9
	SUBTOTAL	6,1	5,8	6,5
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	Pesado de la muestra de caña y agua	2,6	3,0	2,4
	Preparar digestor	1,8	2,4	2,0
	Desintegrar	30,0	30,0	30,0
	Extraer y filtrar la muestra	4,1	3,8	4,5
	Enfriar	8,3	7,6	6,1
	Tomar dos muestras de 100 ml	0,6	0,5	0,5
	Clarificar el extracto	4,5	3,8	2,0
	Filtrado	11,3	10,2	9,7
	Medición de brix	1,5	1,2	0,8
	Medición de polarización	2,5	4,0	3,2
	SUBTOTAL	67,2	66,5	61,2
	ANÁLISIS DE FIBRA DE CAÑA	Toma de muestra	1,0	0,8	1,1
Pesar muestra e introducirla al horno		3,0	2,2	2,4
Secado		180,0	180,0	180,0
Pesado de la muestra seca		1,1	0,9	1,3
SUBTOTAL		185,1	183,9	184,8
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN		258,4	256,2	252,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. Datos calculados para la obtención de los tiempos promedios de análisis aplicando el método de desintegración húmeda ICUMSA

Descripción		TIEMPO DE EJECUCIÓN (min)			
		Analista 1	Analista 2	Analista 3	Promedio
TOMA DE MUESTRA	Toma muestra	3,4	2,9	3,3	3,2
	Desfibrado	1,2	1,5	1,3	1,3
	Homogenizado	1,5	1,4	1,9	1,6
	SUBTOTAL	6,1	5,8	6,5	6,1
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	Pesado de la muestra de caña y agua	2,6	3,0	2,4	2,7
	Preparar digestor	1,8	2,4	2,0	2,1
	Desintegrar	30,0	30,0	30,0	30,0
	Extraer y filtrar la muestra	4,1	3,8	4,5	4,1
	Enfriar	8,3	7,6	6,1	7,3
	Tomar dos muestras de 100 ml	0,6	0,5	0,5	0,5
	Clarificar el extracto	4,5	3,8	2,0	3,4
	Filtrado	11,3	10,2	9,7	10,4
	Medición de brix	1,5	1,2	0,8	1,2
	Medición de polarización	2,5	4,0	3,2	3,2
	SUBTOTAL	67,2	66,5	61,2	65,0
ANÁLISIS DE FIBRA DE CAÑA	Toma de muestra	1,0	0,8	1,1	1,0
	Pesar muestra e introducirla al horno	3,0	2,2	2,4	2,5
	Secado	180,0	180,0	180,0	180,0
	Pesado de la muestra seca	1,1	0,9	1,3	1,1
	SUBTOTAL	185,1	183,9	184,8	184,6
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN		258,4	256,2	252,5	255,7

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. **Recolección de datos de tiempo de ejecución para el método de prensa hidráulica CONSECANA**

Descripción		TIEMPO DE EJECUCIÓN (min)		
		Analista 1	Analista 2	Analista 3
TOMA DE MUESTRA	Toma muestra (Corel sampler)	3,4	2,9	3,3
	Desfibrado	1,2	1,5	1,3
	Homogenizado	1,5	1,4	1,9
	SUBTOTAL	6,1	5,8	6,5
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	Prensado	3,8	3,6	4,4
	Pesado Torta húmeda	1	0,7	0,8
	Preparación del jugo con clarificante	1,3	1,3	1,2
	Filtrado	9,1	10,6	12
	Medición de brix	1,1	1,3	1,7
	Medición de polarización	3,4	1,9	2,7
	SUBTOTAL	19,7	19,4	22,8
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN		25,8	25,2	29,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Datos calculados para la obtención de los tiempos promedios de análisis aplicando el método de prensa hidráulica CONSECANA**

Descripción		TIEMPO DE EJECUCIÓN (min)			
		Analista 1	Analista 2	Analista 3	Promedio
TOMA DE MUESTRA	Toma muestra (Corel sampler)	3,4	2,9	3,3	3,2
	Desfibrado	1,2	1,5	1,3	1,3
	Homogenizado	1,5	1,4	1,9	1,6
	SUBTOTAL	6,1	5,8	6,5	6,1
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	Prensado	3,8	3,6	4,4	3,9
	Pesado torta húmeda	1	0,7	0,8	0,8
	Preparación del jugo con clarificante	1,3	1,3	1,2	1,3
	Filtrado	9,1	10,6	12	10,6
	Medición de brix	1,1	1,3	1,7	1,4
	Medición de polarización	3,4	1,9	2,7	2,7
	SUBTOTAL	19,7	19,4	22,8	20,6
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN		25,8	25,2	29,3	26,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Recolección de datos de tiempo de ejecución para los métodos de prensa hidráulica TANIMOTO y TECNICAÑA**

Descripción		TIEMPO DE EJECUCIÓN (min)		
		Analista 1	Analista 2	Analista 3
TOMA DE MUESTRA	Toma muestra	3,4	2,9	3.3
	Desfibrado	1,2	1,5	1.3
	Homogenizado	1,5	1,4	1.9
	SUBTOTAL	6,1	5,8	6.5
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	Prensado	3,8	3,6	4.4
	Pesado Torta húmeda	1	0,7	0.8
	Preparación del jugo con clarificante	1,3	1,3	1.2
	Filtrado	9,1	10,6	12
	Medición de brix	0,6	1,3	1.5
	Medición de polarización	2,5	2,9	3.2
	SUBTOTAL	18,3	20,4	23.1
ANÁLISIS DE FIBRA DE CAÑA	Desmenuzado	2,2	1,5	2.5
	Pesar muestra e introducirla al horno	2,9	2,5	3.1
	Secado	180	180	180
	Pesado de la muestra seca	1,4	1,3	0.9
	SUBTOTAL	186,5	185,3	186.5
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN		210.9	211,5	216,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. Datos calculados para la obtención de los tiempos promedios de análisis aplicando los métodos de prensa hidráulica TANIMOTO y TECNICAÑA

Descripción		TIEMPO DE EJECUCIÓN (min)			
		Analista 1	Analista 2	Analista 3	Promedio
TOMA DE MUESTRA	Toma muestra	3,4	2,9	3,3	3,2
	Desfibrado	1,2	1,5	1,3	1,3
	Homogenizado	1,5	1,4	1,9	1,6
	SUBTOTAL	6,1	5,8	6,5	6,1
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	Prensado	3,8	3,6	4,4	3,9
	Pesado torta húmeda	1	0,7	0,8	0,8
	Preparación del jugo con clarificante	1,3	1,3	1,2	1,3
	Filtrado	9,1	10,6	12	10,6
	Medición de brix	0,6	1,3	1,5	1,1
	Medición de polarización	2,5	2,9	3,2	2,9
	SUBTOTAL	18,3	20,4	23,1	20,6
ANÁLISIS DE FIBRA DE CAÑA	Desmenuzado	2,2	1,5	2,5	2,1
	Pesar muestra e introducirla al horno	2,9	2,5	3,1	2,8
	Secado	180	180	180	180,0
	Pesado de la muestra seca	1,4	1,3	0,9	1,2
	SUBTOTAL	186,5	185,3	186,5	186,1
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN		210,9	211,5	216,1	212,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Recolección de datos de tiempo de ejecución para el método de balance de masa**

Descripción		TIEMPO DE EJECUCIÓN (min)				
		Analista 1	Analista 2	Analista 3		
TOMA DE MUESTRA	Toma muestra	3,4	2,9	3,3		
	Desfibrado	1,2	1,5	1,3		
	Homogenizado	1,5	1,4	1,9		
	SUBTOTAL	6,1	5,8	6,5		
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	Jugo prensado	Prensado	3,8	3,6	4.4	
		Pesado torta húmeda	1,0	0,7	0.8	
		Preparación del jugo con clarificante	1,3	1,3	1.2	
		Filtrado	11,3	10,6	12.0	
		Medición de brix jugo	0,9	1,3	1.5	
		Medición de polarización jugo	2,5	1,9	2.3	
	Extracto desintegrador	Desmenuzado	0,9	1,5	1.1	
		Pesado de la muestra de fibra y agua	2,6	3,0	2.4	
		Preparar digestor	1,8	2,4	2.0	
		Desintegrar	15,0	15,0	15.0	
		Extraer y filtrar la muestra	4,1	3,8	4.5	
		Enfriar	5,3	4,6	4.3	
		Tomar dos muestras de 100ml	0,6	0,5	0.5	
		Clarificar el extracto	4,5	3,8	2.0	
		Filtrado	11,3	10,2	9.7	
		Medición de brix torta	1,5	1,2	0.8	
		Medición de polarización torta	2,2	3,1	2.4	
		SUBTOTAL	70,6	68,5	66.9	
		ANÁLISIS DE FIBRA DE CAÑA	Toma de muestra	1,0	0,8	1,1
			Pesar muestra e introducirla al horno	2,9	2,5	3,1
Secado	180,0		180,0	180,0		
Pesado de la muestra seca	1,4		1,3	0,9		
SUBTOTAL	185,3		184,6	185,1		
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN		262.0	258,9	258,5		

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. Datos calculados para la obtención de los tiempos promedios de análisis aplicando el método de balance de masa

Descripción		TIEMPO DE EJECUCIÓN (min)				
		Analista 1	Analista 2	Analista 3	Promedio	
TOMA DE MUESTRA	Toma muestra	3,4	2,9	3,3	3,2	
	Desfibrado	1,2	1,5	1,3	1,3	
	Homogenizado	1,5	1,4	1,9	1,6	
	SUBTOTAL	6,1	5,8	6,5	6,1	
ANÁLISIS DE POL DE CAÑA	Jugo prensado	Prensado	3,8	3,6	4,4	3,9
		Pesado torta húmeda	1,0	0,7	0,8	0,8
		Preparación del jugo con clarificante	1,3	1,3	1,2	1,3
		Filtrado	11,3	10,6	12,0	11,3
		Medición de brix jugo	0,9	1,3	1,5	1,2
		Medición de polarización jugo	2,5	1,9	2,3	2,2
	Extracto desintegrador	Desmenuzado	0,9	1,5	1,1	1,2
		Pesado de la muestra de fibra y agua	2,6	3,0	2,4	2,7
		Preparar digestor	1,8	2,4	2,0	2,1
		Desintegrar	15,0	15,0	15,0	15,0
		Extraer y filtrar la muestra	4,1	3,8	4,5	4,1
		Enfriar	5,3	4,6	4,3	4,7
		Tomar dos muestras de 100ml	0,6	0,5	0,5	0,5
		Clarificar el extracto	4,5	3,8	2,0	3,4
		Filtrado	11,3	10,2	9,7	10,4
		Medición de brix torta	1,5	1,2	0,8	1,2
	Medición de polarización torta	2,2	3,1	2,4	2,6	
	SUBTOTAL	70,6	68,5	66,9	68,7	
	ANÁLISIS DE FIBRA DE CAÑA	Toma de muestra	1,0	0,8	1,1	1,0
		Pesar muestra e introducirla al horno	2,9	2,5	3,1	2,8
Secado		180,0	180,0	180,0	180,0	
Pesado de la muestra seca		1,4	1,3	0,9	1,2	
SUBTOTAL		185,3	184,6	185,1	185,0	
TOTAL DE TIEMPO DE EJECUCIÓN		262,0	258,9	258,5	259,8	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LX. **Recolección de datos para estimar el costo variable unitario de la aplicación del método ICUMSA**

ENERGÍA ELÉCTRICA	Equipo	¿Se utiliza?	Potencia (HP)	Tiempo de operación (min)
	Corel Sampler	SÍ	60,0	3,2
	Desfibradora	SÍ	5,0	1,3
	Homogenizador	SÍ	3,0	1,6
	Prensa hidráulica	---	---	---
	Desintegrador	SÍ	3,4	30,0
	Horno de secado	SÍ	2,2	1440,0
	Precio KWh (Q.)	1.17		
REACTIVOS	Reactivo	¿Se utiliza?	Gramos utilizados por muestra	Precio (Q/g)
	Octapol	---	---	---
	Subacetato de plomo	SÍ	0,25	0,105
	Tierras Silíceas	SÍ	2	0,079

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Recolección de datos para estimar el costo variable unitario de la aplicación del método CONSECAN**

ENERGÍA ELÉCTRICA	Equipo	¿Se utiliza?	Potencia (HP)	Tiempo de operación (min)
	Corel Sampler	SÍ	60,0	3,2
	Desfibradora	SÍ	5,0	1,3
	Homogenizador	SÍ	3,0	1,6
	Prensa hidráulica	SÍ	5,0	3,9
	DeSIntegrador	---	---	---
	Horno de secado	---	---	---
	Precio KWh (Q.)	1,17		
REACTIVOS	Reactivo	¿Se utiliza?	Gramos utilizados por muestra	Precio (Q/g)
	Octapol	SÍ	8	0,164
	Subacetato de plomo	---	---	---
	Tierras Silíceas	---	---	---

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Recolección de datos para estimar el costo variable unitario de la aplicación de los métodos TANIMOTO y TECNICAÑA**

ENERGÍA ELÉCTRICA	Equipo	¿Se utiliza?	Potencia (HP)	Tiempo de operación (min)
	Corel Sampler	SÍ	60,0	3,2
	Desfibradora	SÍ	5,0	1,3
	Homogenizador	SÍ	3,0	1,6
	Prensa hidráulica	SÍ	5,0	3,9
	Desintegrador	---	---	---
	Horno de secado	SÍ	2,2	1440,0
	Precio KWh (Q.)	1.17		
REACTIVOS	Reactivo	¿Se utiliza?	Gramos utilizados por muestra	Precio (Q/g)
	Octapol	SÍ	8	0,164
	Subacetato de plomo	---	---	---
	Tierras Silíceas	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

Tabla LXIII. **Recolección de datos para estimar el costo variable unitario de la aplicación de del método de balance de masa**

ENERGÍA ELÉCTRICA	Equipo	¿Se utiliza?	Potencia (HP)	Tiempo de operación (min)
	Corel Sampler	SÍ	60,0	3,2
	Desfibradora	SÍ	5,0	1,3
	Homogenizador	SÍ	3,0	1,6
	Prensa hidráulica	SÍ	5,0	3,9
	Desintegrador	SÍ	3,4	15,0
	Horno de secado	SÍ	2,2	1440,0
	Precio KWh (Q.)	1.17		
REACTIVOS	Reactivo	¿Se utiliza?	Gramos utilizados por muestra	Precio (Q/g)
	Octapol	SÍ	8	0,164
	Subacetato de plomo	SÍ	0,1	0,105
	Tierras Silíceas	---	---	---

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIV. Datos calculados para determinar la energía eléctrica consumida por análisis para el método ICUMSA

Equipo	Potencia (HP)	Potencia (KW)	Tiempo de operación (min)	Tiempo de operación (h)	Muestras analizadas	Energía consumida (KWh)
Core Sampler	60,0	44,7	3,2	0,053	1	2,39
Desfibradora	5,0	3,7	1,3	0,022	1	0,08
Homogenizador	3,0	2,2	1,6	0,027	1	0,06
Desintegrador Húmedo	3,4	2,5	30,0	0,500	1	1,27
Horno de secado	2,2	1,6	1440,0	24,000	50	0,79
Energía consumida total por muestra (KWh)						4,58

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXV. Datos calculados para determinar el costo variable unitario para el método de ICUMSA

Descripción		Consumo por muestra	Costo unitario	Costo por muestra (Q)
Energía eléctrica		4,58 KWh	1,17 Q/KWH	5,36
Reactivos	Subacetato de plomo	0,25 g	0,105 Q/g	0,03
	Tierras silíceas	2,00 g	0,079 Q/g	0,16
COSTO VARIABLE UNITARIO (Q./muestra)				5,55

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVI. Datos calculados para determinar la energía eléctrica consumida por análisis para el método CONSECANA

Equipo	Potencia (HP)	Potencia (KW)	Tiempo de operación (min)	Tiempo de operación (h)	Muestras analizadas	Energía consumida (KWh)
Core Sampler	60	44,7	3,2	0,053	1	2,39
Desfibradora	5	3,7	1,3	0,022	1	0,08
Homogenizador	3	2,2	1,6	0,027	1	0,06
Prensa hidráulica	5	3,7	3,9	0,066	1	0,24
Energía consumida total por muestra (KWh)						2,77

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVII. **Datos calculados para determinar el costo variable unitario para el método de CONSECAN**

Descripción	Consumo por muestra	Costo unitario	Costo por muestra (Q)
Energía eléctrica	2,77 KWh	1,17 Q/KWH	3,24
Reactivos Octapol	8,00 G	0,164 Q/g	1,31
COSTO VARIABLE UNITARIO (Q./muestra)			4,56

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVIII. **Datos calculados para determinar la energía eléctrica consumida por análisis para los métodos TANIMOTO y TECNICAÑA**

Equipo	Potencia (HP)	Potencia (KW)	Tiempo de operación (min)	Tiempo de operación (h)	Muestras analizadas	Energía consumida (KWh)
Core Sampler	60,0	44,7	3,2	0,053	1	2,39
Desfibradora	5,0	3,7	1,3	0,022	1	0,08
Homogenizador	3,0	2,2	1,6	0,027	1	0,06
Prensa hidráulica	5,0	3,7	3,9	0,066	1	0,24
Horno de secado	2,2	1,6	1440,0	24,000	50	0,79
Energía consumida total por muestra (KWh)						3.56

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIX. **Datos calculados para determinar el costo variable unitario para los métodos TANIMOTO y TECNICAÑA**

Descripción	Consumo por muestra	Costo unitario	Costo por muestra (Q)
Energía eléctrica	3,56 KWh	1,17 Q/KWH	4,17
Reactivos Octapol	8,00 g	0,164 Q/g	1,31
COSTO VARIABLE UNITARIO (Q./muestra)			5,48

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXX. Datos calculados para determinar la energía eléctrica consumida por análisis para el método de balance de masa

Equipo	Potencia (HP)	Potencia (KW)	Tiempo de operación (min)	Tiempo de operación (h)	Muestras analizadas	Energía consumida (KWh)
Core Sampler	60,0	44,7	3,2	0,053	1	2,39
Desfibradora	5,0	3,7	1,3	0,022	1	0,08
Homogenizador	3,0	2,2	1,6	0,027	1	0,06
Prensa hidráulica	5,0	3,7	3,9	0,066	1	0,24
Desintegrador Húmedo	3,4	2,5	15,0	0,250	1	0,63
Horno de secado	2,2	1,6	1440,0	24,000	50	0,79
Energía consumida total por muestra (KWh)						4,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXI. Datos calculados para determinar el costo variable unitario para el método de balance de masa

Descripción		Consumo por muestra	Costo unitario	Costo por muestra (Q)
Energía eléctrica		4,19 KWh	1,17 Q/KWH	4,91
Reactivos	Octapol	8,00 g	0,164 Q/g	1,31
	Subacetato de plomo	0,10 g	0,105 Q/g	0,01
COSTO VARIABLE UNITARIO (Q./muestra)				6,23

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXII. Relación entre el peso de torta húmeda obtenida por el método de prensa hidráulica y el porcentaje de fibra obtenido por medio del método ICUMSA

No.	Peso torta húmeda (g)	%Fibra de caña (ICUMSA)
1	143,30	12,76
2	141,50	14,19
3	152,20	16,97
4	169,50	16,82
5	161,60	14,67
6	174,60	18,10
7	137,70	14,48
8	148,80	14,91
9	154,20	14,41
10	153,60	15,84
11	132,00	12,99
12	125,80	11,11
13	150,30	14,36
14	167,70	16,18
15	153,00	14,72
16	151,20	14,63
17	150,70	15,11
18	142,60	14,38
19	150,30	14,48
20	143,50	13,86
21	179,50	17,48
22	164,00	15,50
23	179,20	17,56
24	147,00	13,91
25	150,30	16,24
26	134,50	12,58
27	148,90	15,81
28	141,80	16,27
29	125,30	10,54
30	143,30	13,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIII. Resultados de porcentaje de fibra de caña obtenidos al aplicar la propuesta de modificación del método CONSECANA

No.	Peso torta húmeda (g)	CONSECANA propuesto 0.109PBU - 1.613
1	143,30	14,01
2	141,50	13,81
3	152,20	14,98
4	169,50	16,86
5	161,60	16,00
6	174,60	17,42
7	137,70	13,40
8	148,80	14,61
9	154,20	15,20
10	153,60	15,13
11	132,00	12,78
12	125,80	12,10
13	150,30	14,77
14	167,70	16,67
15	153,00	15,06
16	151,20	14,87
17	150,70	14,81
18	142,60	13,93
19	150,30	14,77
20	143,50	14,03
21	179,50	17,95
22	164,00	16,26
23	179,20	17,92
24	147,00	14,41
25	150,30	14,77
26	134,50	13,05
27	148,90	14,62
28	141,80	13,84
29	125,30	12,04
30	143,30	14,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIV. Resultados de porcentaje de fibra de caña obtenidos al aplicar los cinco métodos de análisis y el método propuesto de CONSECANA

No.	%FIBRA DE CAÑA					
	ICUMSA	CONSECANA	CONSECANA propuesto	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balance de masa
1	12,76	12,34	14,01	12,90	12,90	13,16
2	14,19	12,20	13,81	14,50	14,50	14,94
3	16,97	13,05	14,98	16,97	16,97	16,57
4	16,82	14,44	16,86	16,77	16,77	16,90
5	14,67	13,80	16,00	13,19	13,19	13,97
6	18,10	14,84	17,42	18,05	18,05	18,90
7	14,48	11,89	13,40	12,66	12,66	13,02
8	14,91	12,78	14,61	14,53	14,53	15,04
9	14,41	13,21	15,20	15,75	15,75	15,83
10	15,84	13,16	15,13	17,11	17,11	17,38
11	12,99	11,44	12,78	12,65	12,65	12,95
12	11,11	10,94	12,10	11,22	11,22	11,40
13	14,36	12,90	14,77	15,80	15,80	15,51
14	16,18	14,29	16,67	16,00	16,00	16,43
15	14,72	13,12	15,06	14,87	14,87	15,26
16	14,63	12,97	14,87	14,87	14,87	14,97
17	15,11	12,93	14,81	15,17	15,17	15,33
18	14,38	12,28	13,93	13,78	13,78	14,28
19	14,48	12,90	14,77	14,22	14,22	14,53
20	13,86	12,36	14,03	13,78	13,78	13,89
21	17,48	15,24	17,95	17,75	17,75	17,21
22	15,50	14,00	16,26	15,41	15,41	15,87
23	17,56	15,21	17,92	17,47	17,47	18,05
24	13,91	12,64	14,41	13,50	13,50	14,02
25	16,24	12,90	14,77	15,54	15,54	15,99
26	12,58	11,64	13,05	12,71	12,71	13,07
27	15,81	12,79	14,62	15,94	15,94	16,00
28	16,27	12,22	13,84	16,45	16,45	16,23
29	10,54	10,90	12,04	10,47	10,47	10,93
30	13,04	12,34	14,01	13,33	13,33	13,18

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXV. Datos calculados para la aplicación del ANOVA de los métodos de determinación de porcentaje de fibra de caña con el método propuesto de CONSECANA

	FIBRA DE CAÑA					Conteo (K)	$\sum X_i$	$\frac{\sum X_i^2}{K}$
	ICUMSA	CONSECANA propuesto	TANIMOTO	TECNICAÑA	Balace de masa			
1	12,76	14,01	12,90	12,90	13,16	5	65,73	864,20
2	14,19	13,81	14,50	14,50	14,94	5	71,93	1034,91
3	16,97	14,98	16,97	16,97	16,57	5	82,46	1359,82
4	16,82	16,86	16,77	16,77	16,90	5	84,13	1415,40
5	14,67	16,00	13,19	13,19	13,97	5	71,04	1009,22
6	18,10	17,42	18,05	18,05	18,90	5	90,51	1638,45
7	14,48	13,40	12,66	12,66	13,02	5	66,22	876,92
8	14,91	14,61	14,53	14,53	15,04	5	73,61	1083,55
9	14,41	15,20	15,75	15,75	15,83	5	76,94	1183,99
10	15,84	15,13	17,11	17,11	17,38	5	82,57	1363,65
11	12,99	12,78	12,65	12,65	12,95	5	64,02	819,78
12	11,11	12,10	11,22	11,22	11,40	5	57,05	650,96
13	14,36	14,77	15,80	15,80	15,51	5	76,25	1162,75
14	16,18	16,67	16,00	16,00	16,43	5	81,28	1321,17
15	14,72	15,06	14,87	14,87	15,26	5	74,78	1118,42
16	14,63	14,87	14,87	14,87	14,97	5	74,20	1101,00
17	15,11	14,81	15,17	15,17	15,33	5	75,58	1142,36
18	14,38	13,93	13,78	13,78	14,28	5	70,14	984,03
19	14,48	14,77	14,22	14,22	14,53	5	72,23	1043,31
20	13,86	14,03	13,78	13,78	13,89	5	69,34	961,50
21	17,48	17,95	17,75	17,75	17,21	5	88,15	1554,03
22	15,50	16,26	15,41	15,41	15,87	5	78,46	1231,18
23	17,56	17,92	17,47	17,47	18,05	5	88,47	1565,30
24	13,91	14,41	13,50	13,50	14,02	5	69,34	961,55
25	16,24	14,77	15,54	15,54	15,99	5	78,08	1219,27
26	12,58	13,05	12,71	12,71	13,07	5	64,12	822,33
27	15,81	14,62	15,94	15,94	16,00	5	78,31	1226,57
28	16,27	13,84	16,45	16,45	16,23	5	79,26	1256,37
29	10,54	12,04	10,47	10,47	10,93	5	54,46	593,24
30	13,04	14,01	13,33	13,33	13,18	5	66,90	895,18
Conteo (n)	30	30	30	30	30	150		
$\sum X_i$	443,88	444,07	443,39	443,39	450,82			
$\frac{\sum X_i^2}{K}$	6567,51	6573,18631	6553,149	6553,149	6774,55			
$\sum X_i^2$	6660,84	6640,16319	6659,598	6659,598	6875,16			

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXVI. Resultados del ANOVA de medidas emparejadas de los métodos para determinar el porcentaje de fibra de caña junto con el método propuesto de CONSECANA

Fuente de varianza	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrado medio (MS)	F calculado	Significancia (α)	F crítico
Entre métodos	29	440,25	15,18	52,47		
Dentro de métodos	4	1,37	0,34	1,18	0,05	2,45
Residual	116	33,56	0,29			
Total	149	475,18				

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXVII. **Recolección de datos obtenidos en la evaluación de los procedimientos refractométricos y polarimétricos**

Día	Solución (% p/p)	Brix experimental	Lectura polarimétrica (°S)	Día	Solución (% p/p)	Brix experimental	Lectura polarimétrica (°S)
1	0	0	0	9	0	0	0
	5	4,95	19,34		5	4,95	19,4
	10	10,01	40,23		10	9,97	38,98
	15	14,81	60,28		15	15,09	61,42
	20	19,94	81,7		20	19,91	82,5
2	0	0	0	10	0	0	0
	5	4,97	19,2		5	5	19,68
	10	9,95	39,8		10	9,98	39,91
	15	14,66	60,41		15	14,96	61,44
	20	19,82	81,66		20	19,83	82,83
3	0	0	0	11	0	0	0
	5	4,99	19,55		5	4,98	19,56
	10	9,92	40		10	9,93	39,77
	15	14,86	60,51		15	14,99	61,33
	20	20,58	85,93		20	19,93	81,76
4	0	0	0	12	0	0	0
	5	4,96	19,65		5	4,96	19,55
	10	9,94	39,74		10	9,97	39,94
	15	14,86	60,15		15	15,06	60,26
	20	19,63	81,96		20	19,72	83,5
5	0	0	0	13	0	0	0
	5	5	19,56		5	5,02	19,43
	10	9,84	39,23		10	9,94	39,52
	15	14,72	60,26		15	14,98	61,34
	20	19,6	83,43		20	19,7	81,78
6	0	0	0	14	0	0	0
	5	5,04	19,51		5	4,97	19,42
	10	10,11	39,98		10	10,02	39,49
	15	14,89	60,61		15	15,03	60,27
	20	19,8	79,9		20	19,93	82,5
7	0	0	0	15	0	0	0
	5	4,97	19,44		5	5	19,47
	10	9,93	39,56		10	10,05	39,78
	15	15	61,06		15	14,95	60,56
	20	19,67	82,41		20	19,94	83,3
8	0	0	0				
	5	5,05	19,66				
	10	9,97	39,94				
	15	15,09	61,6				
	20	20,3	84,18				

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXVIII. Datos calculados para la evaluación de la precisión del procedimiento refractométrico y polarimétrico para las soluciones a 5% p/p de sacarosa grado reactivo

Solución (% p/p)	Brix experimental (°Brix)	Lectura polarimétrica (°S)
5	4,95	19,34
5	4,97	19,20
5	4,99	19,55
5	4,96	19,65
5	5,00	19,56
5	5,04	19,51
5	4,97	19,44
5	5,05	19,66
5	4,95	19,40
5	5,00	19,68
5	4,98	19,56
5	4,96	19,55
5	5,02	19,43
5	4,97	19,42
5	5,00	19,47
Promedio	4,99	19,49
Σ	0,03	0,13
CV	0,62%	0,66%

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIX. Datos calculados para la evaluación de la precisión del procedimiento refractométrico y polarimétrico para las soluciones a 10% p/p de sacarosa grado reactivo

Solución (% p/p)	Brix experimental (°Brix)	Lectura polarimétrica (°S)
10	10,01	40,23
10	9,95	39,80
10	9,92	40,00
10	9,94	39,74
10	9,84	39,23
10	10,11	39,98
10	9,93	39,56
10	9,97	39,94
10	9,97	38,98
10	9,98	39,91
10	9,93	39,77
10	9,97	39,94
10	9,94	39,52
10	10,02	39,49
10	10,05	39,78
Promedio	9,97	39,72
σ	0,06	0,32
CV	0,63%	0,81%

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXX. Datos calculados para la evaluación de la precisión del procedimiento refractométrico y polarimétrico para las soluciones a 15% p/p de sacarosa grado reactivo

Solución (% p/p)	Brix experimental (°Brix)	Lectura polarimétrica (°S)
15	14,81	60,28
15	14,66	60,41
15	14,86	60,51
15	14,86	60,15
15	14,72	60,26
15	14,89	60,61
15	15,00	61,06
15	15,09	61,60
15	15,09	61,42
15	14,96	61,44
15	14,99	61,33
15	15,06	60,26
15	14,98	61,34
15	15,03	60,27
15	14,95	60,56
Promedio	14,93	60,77
σ	0,13	0,53
CV	0,86%	0,87%

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXI. Datos calculados para la evaluación de la precisión del procedimiento refractométrico y polarimétrico para las soluciones a 20% p/p de sacarosa grado reactivo

Solución (% p/p)	Brix experimental (°Brix)	Lectura polarimétrica (°S)
20	19,94	81,70
20	19,82	81,66
20	20,58	85,93
20	19,63	81,96
20	19,60	83,43
20	19,80	79,90
20	19,67	82,41
20	20,30	84,18
20	19,91	82,50
20	19,83	82,83
20	19,93	81,76
20	19,72	83,50
20	19,70	81,78
20	19,93	82,50
20	19,94	83,30
Promedio	19,89	82,62
σ	0,26	1,37
CV	1,30%	1,66%

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXII. Datos calculados para la evaluación de la exactitud del procedimiento refractométrico y polarimétrico para las soluciones a 0% p/p de sacarosa grado reactivo

Variable estadística	Grados Brix (°Brix)	Lectura polarimétrica (°S)
Valor teórico	0,00	0,00
Media	0,00	0,00
desviación estándar	0,00	0,00
Coefficiente de variación	0,00%	0,00%
No. Observaciones	15	15
Grados de libertad	14	14
Nivel de significancia	0,05	0,05
Estadístico t	0,00	0,00
Valor crítico t	2,14	2,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXIII. Datos calculados para la evaluación de la exactitud del procedimiento refractométrico y polarimétrico para las soluciones a 5% p/p de sacarosa grado reactivo

Variable estadística	Grados brix (°Brix)	Lectura polarimétrica (°S)
Valor teórico	5,00	19,56
Media	4,99	19,49
desviación estándar	0,03	0,13
Coefficiente de variación	0,62%	0,66%
No. Observaciones	15	15
Grados de libertad	14	14
Nivel de significancia	0,05	0,05
Estadístico t	1,58	2,11
Valor crítico t	2,14	2,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXIV. Datos calculados para la evaluación de la exactitud del procedimiento refractométrico y polarimétrico para las soluciones a 10% p/p de sacarosa grado reactivo

Variable estadística	Grados brix (°Brix)	Lectura polarimétrica (°S)
Valor teórico	10,00	39,90
Media	9,97	39,72
desviación estándar	0,06	0,32
Coeficiente de variación	0,63%	0,81%
No. Observaciones	15	15
Grados de libertad	14	14
Nivel de significancia	0,05	0,05
Estadístico t	1,94	2,12
Valor crítico t	2,14	2,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXV. Datos calculados para la evaluación de la exactitud del procedimiento refractométrico y polarimétrico para las soluciones a 15% p/p de sacarosa grado reactivo

Variable estadística	Grados Brix (°Brix)	Lectura polarimétrica (°S)
Valor teórico	15,00	61,06
Media	14,93	60,77
desviación estándar	0,13	0,53
Coeficiente de variación	0,86%	0,87%
No, Observaciones	15	15
Grados de libertad	14	14
Nivel de significancia	0,05	0,05
Estadístico t	2,10	2,11
Valor crítico t	2,14	2,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXVI. Datos calculados para la evaluación de la exactitud del procedimiento refractométrico y polarimétrico para las soluciones a 20% p/p de sacarosa grado reactivo

Variable estadística	Grados Brix (°Brix)	Lectura polarimétrica (°S)
Valor teórico	20,00	83,08
Media	19,89	82,62
desviación estándar	0,26	1,37
Coefficiente de variación	1,30%	1,66%
No. Observaciones	15	15
Grados de libertad	14	14
Nivel de significancia	0,05	0,05
Estadístico t	1,70	1,28
Valor crítico t	2,14	2,14

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

ANEXO A. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

A continuación, se presenta y detallan las cinco metodologías de análisis de caña de azúcar utilizadas durante la investigación:

- **Determinación de la pol y porcentaje de fibra contenidos en la caña por el método desintegración húmeda GS5/7-1 (1994) ICUMSA**
 - Referencia: ICUMSA, 2005.¹
 - Objetivo: Este método se emplea para determinar la pol (polarización), Brix y fibra de los preparados de muestras de caña.
 - Equipo:
 - ✓ Desintegrador húmedo
 - ✓ Balanza
 - ✓ Polarímetro electrónico
 - ✓ Refractómetro electrónico
 - ✓ Horno de humedad convencional
 - Procedimiento:
 - ✓ Obtener 400 gramos con exactitud de 0,1 gramo de caña desfibrada y homogenizada. Transferirla a la jarra del desintegrador húmedo, al cual debe agregarse 1200 g de agua;

¹ INTERNATIONAL COMMISSION FOR UNIFORM METHODS OF SUGAR ANALYSIS (ICUMSA). Libro de métodos 2005. New York, Bartens, The Sugar and Sweetener Publisher, 2005.

- ✓ Desintegrar durante 30 minutos colocando un baño de agua fría en flujo circulable en el exterior de la jarra para evitar el calentamiento;
- ✓ Al terminar el tiempo, remover 300 mililitros del extracto y pasarlo a través de un tamiz de 400 micrómetros y recuperarlo en un erlenmeyer de 500 mL;
- ✓ Tapar el erlenmeyer y enfriarlo en un baño de agua a 20°C;
- ✓ Después que se ha enfriado, mezclar el contenido del erlenmeyer por agitación y transferirlo a dos beacker de 100 mililitros cada uno.

Determinación del brix:

- ✓ A 100 mililitros de la solución, agregar 2 gramos de coadyuvante de filtración (tierras silíceas) y pasar a través de un papel filtro (Whatman No. 06). Descartar los primeros 10 mililitros del filtrado, cubrir el embudo con un vidrio reloj;
- ✓ Determinar el grado brix del extracto con un refractómetro de precisión. El refractómetro debe calibrarse previamente a cero con agua destilada.

Determinación de la Pol:

- ✓ Clarificar los otros 100ml del extracto en un erlenmeyer con la menor cantidad posible de subacetato de plomo sólido (0,25 gramos aproximadamente), agitar y permitir que repose hasta que la floculación sea completa;
- ✓ Filtrar a través de un papel filtro (Whatman No. 91) y descartar los primeros 25 mililitros del filtrado, cubrir con un vidrio reloj el embudo de filtración;

- ✓ Polarizar el filtrado en un tubo de 200 milímetros, dentro del polarímetro

Determinación de la humedad:

- ✓ Pesar un recipiente vacío (bandeja de humedad), conociendo la masa del recipiente (tara) con una exactitud de 0,1 gramo (M_0);
- ✓ Colocar 1000 gramos de caña preparada al recipiente y anotar la masa del recipiente más la caña con una exactitud de 0,1 gramo (M_1);
- ✓ Colocar el recipiente con la caña en un horno de secado a 105 °C, hasta que la pérdida de la masa no sea menor de 2 gramos en 30 minutos;
- ✓ Pesar el contenido del recipiente con la muestra seca con una exactitud de 0,1 gramo (M_2).

- Cálculos:

$$\text{Humedad de la caña (\%): } w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

Para la determinación del pol, se deben determinar los siguientes valores:

$$\phi = \frac{\frac{x + y}{x} - (1 + z/100)}{1 + z/100}$$

$$\theta = \frac{100}{1 + \frac{z}{100}}$$

Donde:

x = masa de caña desintegrada

y = masa de agua en el desintegrador

z = %Brix – agua libre (generalmente emplea valores del 25%)

w= Humedad de la caña

Por último:

$$\text{Pol de la caña (\%)} = p \frac{\phi+w}{\theta-b}$$

Donde el valor de “p” debe determinarse por las tablas de Schmitz (Anexo B), empleando el Brix y las lecturas polarimétricas del extracto. “b” representa el brix de extracto. También puede emplear la ecuación de Horne, mostrada en los métodos posteriores.

$$\text{Brix de la caña} = b \frac{\phi+w}{\theta-b}$$

$$\% \text{Fibra en la caña} = \frac{100-w-b\left(\frac{x+y}{x}\right)}{100-b\left(1+\frac{z}{100}\right)} \times 100$$

- **Análisis de la caña por el método de la prensa hidráulica, sistema CONSECANA.**

- Referencia: CONSECANA-SP, 2006.²
- Objetivo: determinar los porcentajes de la fibra y la pol en la caña, por medio del jugo extraído de una prensa hidráulica.
- Equipo:
 - ✓ Prensa hidráulica
- Procedimiento:
 - ✓ Pesar exactamente 500 gramos de muestra de caña desfibrada y someterlos en la prensa a una presión mínima de 24,5 MPa durante el lapso de un minuto;
 - ✓ Pesar el jugo extraído y el bagazo que queda en la prensa y colocarlos en recipientes numerados. Al bagazo obtenido, se le denomina torta húmeda;
 - ✓ Determinar el contenido del brix del jugo extraído;
 - ✓ Tomar 100ml del jugo y clarificar con 8 a 10 gramos de octapol, filtrar y medir su polarización en el polarímetro.
- Cálculos:

El pol del jugo puede ser determinado por las tablas de Schmitz (Anexo B) o por medio de la ecuación de Horne, mostrada a continuación.

$$\text{Pol del jugo: } S = LP(0.2605 - 0.000982B)$$

² CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CONSECANA-SP). Manual de instruções. 5ª ed. Brasil, Piracicaba-SP, 2006.

También es necesario calcular:

Pureza del jugo: $Q = \frac{S}{B} \times 100$

Fibra de caña: $F = 0.08 \times \text{PBU} + 0.876$

Coefficiente C: $C = 1.0313 - 0.00575 \times F$

Pol de caña: $\text{PC} = S \times (1 - 0.01F) \times C$

Donde:

S: Pol del Jugo

LP: Lectura polarimétrica del jugo

B: Brix del jugo

Q: Pureza del jugo

F: Fibra de caña

PBU: peso de la torta húmeda

C: Coeficiente de fibra

PC: Pol de caña

- **Análisis de la caña por el método de la prensa hidráulica TECNICAÑA**
 - Referencia: Buenaventura, 1989.³
 - Objetivo: determinar los porcentajes de la fibra y la pol en la caña, por medio del jugo extraído de una prensa hidráulica.
 - Equipo:
 - ✓ Prensa hidráulica
 - ✓ Horno convencional

³ BUENAVENTURA, Carlos. Manual de laboratorio para la industria azucarera TECNICAÑA. Colombia, Graficalli de Occidente, 1989. p. 43-44.

- Procedimiento:
 - ✓ Pesar exactamente 500 gramos de muestra de caña desfibrada y someterlos en la prensa a una presión de 2,500 lbs/pulg² durante un minuto;
 - ✓ Pesar el jugo extraído y el bagazo que queda en la prensa y colocarlos en recipientes numerados (para evitar confusión de las muestras);
 - ✓ Determinar el peso del bagazo húmedo, el peso del bagazo seco (determinación de la humedad por el método de diferencia de peso por el horno convencional), el contenido de Brix , Pol (tomar 200 ml de jugo y adicionar 8 a 10 gramos de Octapol, filtrar y anotar la lectura polarimétrica) y la Pureza en el jugo extraído;
 - ✓ Reportar la masa del jugo extraído en gramos, la masa del bagazo, en gramos, el porcentaje de la humedad del bagazo, el porcentaje del Brix del jugo extraído y porcentaje de la Pol del jugo extraído.

- Cálculos:

El pol del jugo puede ser determinado por las tablas de Schmitz (Anexo B) o por medio de la ecuación de Horne, mostrada a continuación.

$$\text{Pol del jugo extraído: } S = LP(0.2605 - 0.000982B)$$

$$\% \text{ fibra en bagazo} = 100 - \frac{\% \text{ humedad bagazo}}{(1 - \text{Brix del jugo}/100)}$$

$$\% \text{ bagazo en caña} = \frac{\text{Peso del Bagazo}}{\text{masa de muestra}} \times 100$$

$$\% \text{ fibra en caña} = \% \text{ fibra en bagazo} \times \% \text{ bagazo en caña}$$

$$\% \text{ jugo absoluto en caña} = 100 - \% \text{ fibra en caña}$$

$$\% \text{ sólidos en caña} = \% \text{ jugo absoluto en caña} \times \text{Brix jugo} / 100$$

$$\% \text{ Sacarosa en caña (pol)} =$$

$$\frac{(\% \text{ jugo absoluto en caña}) (\text{pol del jugo extraído})}{100}$$

- **Análisis de la caña por el método de la prensa hidráulica, sistema TANIMOTO.**
 - Referencia: Fernández, 2000.⁴
 - Objetivo: determinar los porcentajes de la fibra y la pol en la caña, por medio del jugo extraído de una prensa hidráulica.
 - Equipo:
 - ✓ Prensa hidráulica
 - ✓ Horno de secado
 - Procedimiento:
 - ✓ Pesar exactamente 500 gramos de muestra de caña desfibrada y someterlos en la prensa a una presión de 2,500 lbs/pulg2 durante un período de un minuto;

⁴ FERNÁNDEZ, Carlos. Cálculos na Agroindústria da Cana-de-acúcar. Brasil, Piracicaba, 2000.

- ✓ Pesar el jugo extraído y el bagazo que queda en la prensa y colocarlos en recipientes numerados;
- ✓ Determinar el contenido de humedad de la caña el peso del bagazo húmedo, el peso del bagazo seco (determinación de la humedad), el contenido del Brix , la Pol en el jugo extraído (tomar 100 ml de jugo y adicionar 8 a 10 gramos de Octapol, filtrar y anotar la lectura polarimétrica).

○ Cálculos:

El pol del jugo puede ser determinado por las tablas de Schmitz (Anexo B) o por medio de la ecuación de Horne, mostrada a continuación.

Pol del jugo extraído: $S = LP(0.2605 - 0.000982B)$

Porcentaje de fibra en la caña: $\%Fibra = \frac{[(100 * PBS) - (PBU * Bj)]}{5 * (100 - Bj)}$

Porcentaje del jugo en la caña = 100 - porcentaje de fibra

Pol en caña =

$$Sj * (1 - 0.01 * \%fibra) * (1.0310 - (0.00575 * \%fibra))$$

Porcentaje de Brix en la caña = 100 - (%Fibra+%humedad en la caña)

Donde:

PBU = masa del bagazo húmedo

PBS = masa del bagazo seco

Bj = Brix del jugo

Sj = Pol del jugo

- **Método de análisis de la caña por balance de masa**

- Referencia: Reyes, 1999.⁵
- Objetivo: determinar los porcentajes de la fibra y la pol en la caña, por medio de un balance de masa de los métodos de prensa hidráulica y desintegración húmeda.
- Equipo:
 - ✓ Prensa hidráulica
 - ✓ Horno
 - ✓ Desintegrador húmedo
- Principio del método:

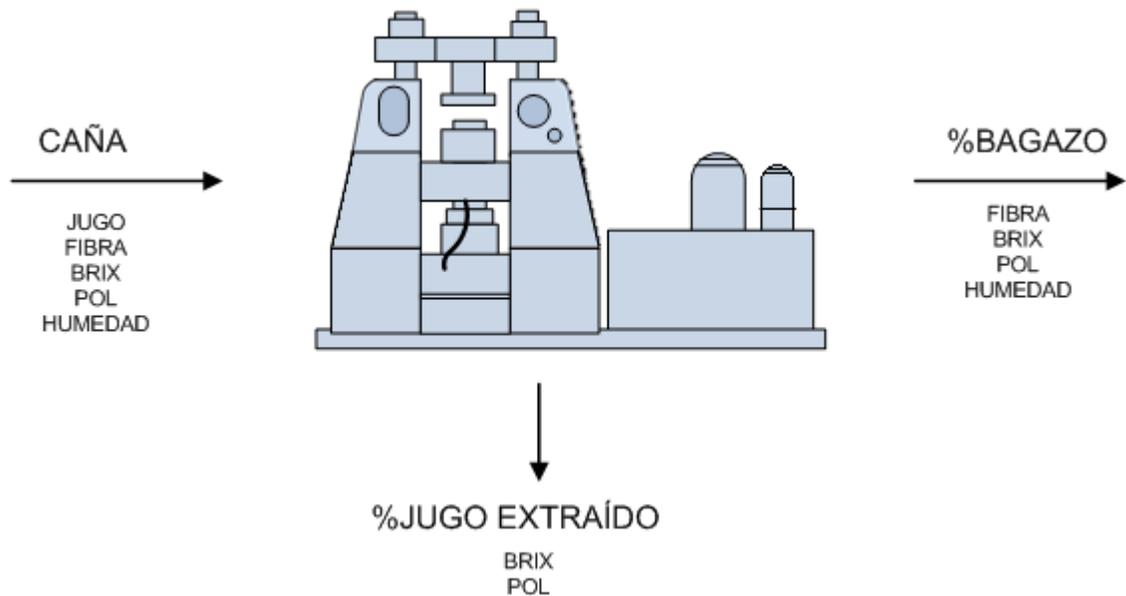
Este método tiene como base la ecuación fundamental en la extracción:

$$\text{Caña} = \text{jugo extraído} + \text{bagazo}$$

Con este balance de masa se puede realizar balances de componente, siendo estos el pol y el porcentaje de fibra de caña.

⁵ 8. REYES, Flavio. *Selección de un método estándar para evaluar la calidad de la caña de azúcar*. Trabajo de graduación (Ingeniero Agroindustrial). Escuintla, Guatemala, Centro Universitario del Sur (CONSUR), Universidad de San Carlos de Guatemala, 1999.

Figura 31. Diagrama esquemático del método de balance de masa



Fuente: elaboración propia.

- Procedimiento:
 - ✓ Pesar exactamente 500 gramos de muestra de caña desfibrada y someterlos en la prensa a una presión de 2,500 lbs/pulg² durante un período de un minuto;
 - ✓ Pesar el jugo extraído y el bagazo que queda en la prensa y colocarlos en recipientes;
 - ✓ Determinar el peso del bagazo húmedo, los contenidos del Brix y la Pol en el jugo. Para determinar la Pol en el jugo tomar 100 ml de jugo y adicionar 8 a 10 gramos de Octapol, filtrar y anotar la lectura polarimétrica;
 - ✓ Determinar el contenido de humedad de la caña, colocando 50 gramos de muestra en el horno de secado durante 3 horas, luego calcular por diferencia de peso;

- ✓ Tomar el bagazo extraído de la prensa, pesar 100 gramos en 1000 mililitros de agua fría, desintegrar durante 15 minutos, filtrar el extracto obtenido y luego realizar análisis del Brix y la Pol. Para realizar el análisis de la Pol, debe pesarse 100 gramos de nuestra y clarificar con aproximadamente 0,1 gramos de subacetato de plomo. Las lecturas de Brix y Pol se deben multiplicar por un factor de dilución que es 11.
- Cálculos:
El pol del jugo puede ser determinado por las tablas de Schmitz (Anexo B) o por medio de la ecuación de Horne, mostrada a continuación.

Pol del jugo extraído: $S_j = LP_j(0.2605 - 0.000982B_j)$

Además:

$$S_b = 11 * LP_b$$

$$B_b = 11 * B_b$$

$$\% \text{bagazo} = \frac{\text{Peso de la torta húmeda}}{\text{masa de muestra}} \times 100$$

$$\% \text{jugo} = \frac{\text{Masa de muestra} - \text{Peso de la torta húmeda}}{\text{masa de muestra}} \times 100$$

Por lo tanto:

$$\text{Brix caña} = (\% \text{Jugo})(B_j/100) + (\% \text{Bagazo})(B_b/100)$$

$$\text{Pol caña} = (\% \text{Jugo})(S_j/100) + (\% \text{Bagazo})(S_b/100)$$

$$\% \text{Fibra caña} = (\% \text{Bagazo})(1 - B_b/100 - W/100)$$

Donde:

LPj= Lectura polarimétrica del jugo

LPb= Lectura polarimétrica del extracto del bagazo

Bj = Brix del jugo

Bb = Brix del bagazo

Sj = Pol del jugo

Sb = Pol del bagazo

W = Humedad del bagazo

ANEXO B. TABLAS DE SCHMITZ

Fuente: ICUMSA. (2005).

**Tabla de Schmitz para la pol del jugo
empleando el método de disoluciones no diluidas y acetato básico de plomo en seco; peso normal 26,000 g**

Lectura del polarímetro	Brix																			
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5
1	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
2	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
3	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75	0,75	0,75	0,75
4	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00
5	1,30	1,30	1,29	1,29	1,29	1,29	1,28	1,28	1,28	1,28	1,27	1,27	1,27	1,27	1,26	1,26	1,26	1,25	1,25	1,25
6	1,56	1,56	1,55	1,55	1,55	1,54	1,54	1,54	1,53	1,53	1,53	1,53	1,52	1,52	1,52	1,51	1,51	1,51	1,50	1,50
7	1,82	1,81	1,81	1,81	1,80	1,80	1,80	1,79	1,79	1,78	1,78	1,78	1,77	1,77	1,77	1,76	1,76	1,75	1,75	1,75
8	...	2,07	2,07	2,07	2,06	2,06	2,05	2,05	2,05	2,04	2,04	2,03	2,03	2,02	2,02	2,01	2,01	2,01	2,01	2,00
9	...	2,33	2,33	2,32	2,32	2,32	2,31	2,31	2,30	2,30	2,29	2,29	2,28	2,28	2,27	2,27	2,27	2,26	2,26	2,25
10	2,59	2,58	2,58	2,57	2,57	2,56	2,56	2,55	2,55	2,54	2,54	2,53	2,53	2,52	2,52	2,51	2,51	2,50
11	2,85	2,84	2,83	2,83	2,82	2,82	2,81	2,81	2,80	2,80	2,79	2,79	2,78	2,77	2,77	2,76	2,76	2,75
12	3,10	3,09	3,09	3,08	3,07	3,07	3,06	3,06	3,05	3,04	3,04	3,03	3,03	3,02	3,01	3,01	3,00
13	3,36	3,35	3,34	3,34	3,33	3,32	3,32	3,31	3,30	3,30	3,29	3,29	3,28	3,27	3,27	3,26	3,25
14	3,61	3,60	3,59	3,59	3,58	3,57	3,57	3,56	3,55	3,54	3,54	3,53	3,52	3,52	3,51	3,50
15	3,87	3,86	3,85	3,84	3,84	3,83	3,82	3,81	3,81	3,80	3,79	3,78	3,78	3,77	3,76	3,75
16	4,12	4,11	4,10	4,09	4,08	4,08	4,07	4,06	4,05	4,04	4,04	4,03	4,02	4,01	4,00
17	4,37	4,36	4,36	4,35	4,34	4,33	4,32	4,31	4,30	4,30	4,29	4,28	4,27	4,26	4,25
18	4,62	4,61	4,60	4,59	4,58	4,58	4,57	4,56	4,55	4,54	4,53	4,52	4,51	4,50
19	4,88	4,87	4,86	4,85	4,84	4,83	4,82	4,81	4,80	4,79	4,78	4,77	4,76	4,75
20	5,12	5,11	5,10	5,09	5,08	5,07	5,06	5,05	5,04	5,03	5,02	5,01	5,00
21	5,38	5,37	5,36	5,35	5,34	5,33	5,32	5,31	5,30	5,29	5,28	5,26	5,25
22	5,63	5,61	5,60	5,59	5,58	5,57	5,56	5,55	5,54	5,53	5,52	5,50
23	5,88	5,87	5,86	5,85	5,84	5,82	5,81	5,80	5,79	5,78	5,77	5,75
24	6,13	6,11	6,10	6,09	6,08	6,07	6,05	6,04	6,03	6,02	6,01	6,00
25	6,38	6,37	6,36	6,34	6,33	6,32	6,31	6,29	6,28	6,27	6,26	6,25
26	6,62	6,61	6,60	6,58	6,57	6,56	6,54	6,53	6,52	6,51	6,50
27	6,88	6,86	6,85	6,84	6,82	6,81	6,80	6,78	6,77	6,76	6,75
28	7,12	7,10	7,09	7,08	7,06	7,05	7,03	7,02	7,01	7,00
29	7,37	7,36	7,34	7,33	7,31	7,30	7,29	7,27	7,26	7,25
30	7,61	7,60	7,58	7,57	7,55	7,54	7,52	7,51	7,50	7,49
31	7,87	7,85	7,83	7,82	7,80	7,79	7,77	7,76	7,75
32	8,10	8,09	8,07	8,05	8,04	8,02	8,01	8,00
33	8,36	8,34	8,32	8,31	8,29	8,27	8,26	8,25
34	8,59	8,58	8,56	8,54	8,52	8,51	8,50
35	8,84	8,83	8,81	8,79	8,77	8,76	8,75
36	9,08	9,06	9,04	9,03	9,01	9,00	8,99
37	9,33	9,31	9,29	9,28	9,26	9,25	9,24
38	9,56	9,55	9,53	9,51	9,50	9,49	9,48
39	9,82	9,80	9,78	9,76	9,75	9,74	9,73
40	10,05	10,03	10,01	10,00	9,99	9,98
41	10,30	10,28	10,26	10,25	10,24	10,23
42	10,53	10,51	10,50	10,49	10,48
43	10,78	10,76	10,75	10,74	10,73
44	11,01	11,00	10,99	10,98
45	11,26	11,25	11,24	11,23
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55

Tabla de Schmitz (continuación)

Lectura del polarímetro	°Brix																	
	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19	19,5
1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,49	0,49	0,49	0,49	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3	0,75	0,75	0,75	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	...	...	...	...	...	...	...	...
4	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	...	...	...	...	...	...	...	...
5	1,25	1,25	1,24	1,24	1,24	1,24	1,23	1,23	1,23	1,23	1,22	...	...	...	...	...	...	...
6	1,50	1,50	1,49	1,49	1,49	1,48	1,48	1,48	1,47	1,47	1,47	...	...	...	...	...	...	...
7	1,75	1,74	1,74	1,74	1,73	1,73	1,73	1,72	1,72	1,72	1,71	1,71	...	...	...	...	...	...
8	2,00	1,99	1,99	1,99	1,98	1,98	1,97	1,97	1,97	1,96	1,96	1,95	...	...	...	...	...	...
9	2,25	2,24	2,24	2,23	2,23	2,22	2,22	2,22	2,21	2,21	2,20	2,20	2,19	...	...	...	...	...
10	2,50	2,49	2,49	2,48	2,48	2,47	2,47	2,46	2,46	2,45	2,45	2,44	2,44	...	...	...	...	...
11	2,75	2,74	2,74	2,73	2,72	2,72	2,71	2,71	2,70	2,70	2,69	2,69	2,68	2,68	...	...	...	...
12	3,00	2,99	2,98	2,98	2,97	2,97	2,96	2,95	2,95	2,94	2,94	2,93	2,92	2,92	...	...	...	...
13	3,25	3,24	3,23	3,23	3,22	3,21	3,21	3,20	3,19	3,19	3,18	3,17	3,17	3,16	3,16	3,16	...	...
14	3,50	3,49	3,48	3,47	3,47	3,46	3,45	3,45	3,44	3,43	3,43	3,42	3,41	3,41	3,41	3,40	...	...
15	3,75	3,74	3,73	3,72	3,72	3,71	3,70	3,69	3,69	3,68	3,67	3,66	3,66	3,65	3,64	3,63	...	...
16	4,00	3,99	3,98	3,97	3,96	3,96	3,95	3,94	3,93	3,92	3,92	3,91	3,90	3,89	3,88	3,88	...	...
17	4,25	4,24	4,23	4,22	4,21	4,20	4,19	4,19	4,18	4,17	4,16	4,15	4,14	4,13	4,13	4,12	4,11	...
18	4,49	4,49	4,48	4,47	4,46	4,45	4,44	4,43	4,42	4,41	4,41	4,40	4,39	4,38	4,37	4,36	4,35	...
19	4,74	4,74	4,73	4,72	4,71	4,70	4,69	4,68	4,67	4,66	4,65	4,64	4,63	4,62	4,61	4,60	4,59	4,58
20	4,99	4,98	4,97	4,96	4,95	4,94	4,93	4,92	4,91	4,90	4,89	4,88	4,87	4,86	4,85	4,84	4,83	4,83
21	5,24	5,23	5,22	5,21	5,20	5,19	5,18	5,17	5,16	5,15	5,14	5,13	5,12	5,11	5,10	5,09	5,08	5,07
22	5,49	5,48	5,47	5,46	5,45	5,44	5,43	5,42	5,41	5,39	5,38	5,37	5,36	5,35	5,34	5,33	5,32	5,31
23	5,74	5,73	5,72	5,71	5,70	5,69	5,67	5,66	5,65	5,64	5,63	5,62	5,61	5,59	5,58	5,57	5,56	5,55
24	5,99	5,98	5,97	5,96	5,95	5,93	5,92	5,91	5,90	5,89	5,87	5,86	5,85	5,84	5,83	5,81	5,80	5,79
25	6,24	6,23	6,22	6,21	6,19	6,18	6,17	6,16	6,14	6,13	6,12	6,11	6,09	6,08	6,07	6,06	6,04	6,03
26	6,49	6,48	6,47	6,45	6,44	6,43	6,41	6,40	6,39	6,38	6,36	6,35	6,34	6,32	6,31	6,30	6,29	6,27
27	6,74	6,73	6,72	6,70	6,69	6,67	6,66	6,65	6,63	6,62	6,61	6,59	6,58	6,57	6,55	6,54	6,53	6,51
28	6,99	6,98	6,96	6,95	6,94	6,92	6,91	6,89	6,88	6,87	6,85	6,84	6,82	6,81	6,80	6,78	6,77	6,76
29	7,24	7,23	7,21	7,20	7,18	7,17	7,15	7,14	7,13	7,11	7,10	7,08	7,07	7,05	7,04	7,03	7,01	7,00
30	7,49	7,48	7,46	7,45	7,43	7,42	7,40	7,39	7,37	7,36	7,34	7,33	7,31	7,30	7,28	7,27	7,25	7,24
31	7,74	7,73	7,71	7,69	7,68	7,66	7,65	7,63	7,62	7,60	7,59	7,57	7,56	7,54	7,52	7,51	7,49	7,48
32	7,99	7,97	7,96	7,94	7,93	7,91	7,89	7,88	7,86	7,85	7,83	7,82	7,80	7,78	7,77	7,75	7,74	7,72
33	8,24	8,22	8,21	8,19	8,17	8,16	8,14	8,13	8,11	8,09	8,08	8,06	8,04	8,03	8,01	7,99	7,98	7,96
34	8,49	8,47	8,46	8,44	8,42	8,41	8,39	8,37	8,35	8,34	8,32	8,30	8,29	8,27	8,25	8,24	8,22	8,20
35	8,74	8,72	8,70	8,69	8,67	8,65	8,64	8,62	8,60	8,58	8,57	8,55	8,53	8,51	8,50	8,48	8,46	8,44
36	8,99	8,97	8,95	8,94	8,92	8,90	8,88	8,86	8,85	8,83	8,81	8,79	8,77	8,76	8,74	8,72	8,70	8,69
37	9,24	9,22	9,20	9,18	9,17	9,15	9,13	9,11	9,09	9,07	9,05	9,04	9,02	9,00	8,98	8,96	8,94	8,93
38	9,49	9,47	9,45	9,43	9,41	9,39	9,38	9,36	9,34	9,32	9,30	9,28	9,26	9,24	9,22	9,21	9,19	9,17
39	9,74	9,72	9,70	9,68	9,66	9,64	9,62	9,60	9,58	9,56	9,54	9,52	9,51	9,49	9,47	9,45	9,43	9,41
40	9,99	9,97	9,95	9,93	9,91	9,89	9,87	9,85	9,83	9,81	9,79	9,77	9,75	9,73	9,71	9,69	9,67	9,65
41	10,24	10,22	10,20	10,18	10,16	10,14	10,12	10,09	10,07	10,05	10,03	10,01	9,99	9,97	9,95	9,93	9,91	9,89
42	10,49	10,47	10,45	10,42	10,40	10,38	10,36	10,34	10,32	10,30	10,28	10,26	10,24	10,22	10,20	10,17	10,15	10,13
43	10,74	10,72	10,69	10,67	10,65	10,63	10,61	10,59	10,57	10,54	10,52	10,50	10,48	10,46	10,44	10,42	10,40	10,37
44	10,99	10,97	10,94	10,92	10,90	10,88	10,86	10,83	10,81	10,79	10,77	10,75	10,72	10,70	10,68	10,66	10,64	10,62
45	11,24	11,21	11,19	11,17	11,15	11,12	11,10	11,08	11,06	11,04	11,01	10,99	10,97	10,95	10,92	10,90	10,88	10,86
46	11,49	11,46	11,44	11,42	11,39	11,37	11,35	11,33	11,30	11,28	11,26	11,23	11,21	11,19	11,17	11,14	11,12	11,10
47	11,74	11,71	11,69	11,67	11,64	11,62	11,60	11,57	11,55	11,53	11,50	11,48	11,46	11,43	11,41	11,39	11,36	11,34
48	11,99	11,96	11,94	11,91	11,89	11,87	11,84	11,82	11,79	11,77	11,75	11,72	11,70	11,68	11,65	11,63	11,60	11,58
49	...	12,21	12,19	12,16	12,14	12,11	12,09	12,06	12,04	12,02	11,99	11,97	11,94	11,92	11,89	11,87	11,85	11,82
50	...	12,46	12,44	12,41	12,39	12,36	12,34	12,31	12,29	12,26	12,24	12,21	12,19	12,16	12,14	12,11	12,09	12,06
51	...	...	12,68	12,66	12,63	12,61	12,58	12,56	12,53	12,51	12,48	12,46	12,43	12,40	12,38	12,35	12,33	12,30
52	...	...	12,93	12,91	12,88	12,86	12,83	12,80	12,78	12,75	12,73	12,70	12,67	12,65	12,62	12,60	12,57	12,55
53	...	...	...	13,16	13,13	13,10	13,08	13,05	13,02	13,00	12,97	12,94	12,92	12,89	12,87	12,84	12,81	12,79
54	...	...	...	13,40	13,38	13,35	13,32	13,30	13,27	13,24	13,22	13,19	13,16	13,13	13,11	13,08	13,05	13,03
55	...	...	...	...	13,62	13,60	13,57	13,54	13,51	13,49	13,46	13,43	13,41	13,38	13,35	13,32	13,30	13,27

Tabla de Schmitz (continuación)

Lectura del polarímetro	Brix																	
	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19	19,5
56	13,87	13,84	13,82	13,79	13,76	13,73	13,70	13,68	13,65	13,62	13,59	13,57	13,54	13,51
57	14,09	14,06	14,03	14,01	13,98	13,95	13,92	13,89	13,86	13,84	13,81	13,78	13,75
58	14,34	14,31	14,28	14,25	14,22	14,19	14,17	14,14	14,11	14,08	14,05	14,02	13,99
59	14,56	14,53	14,50	14,47	14,44	14,41	14,38	14,35	14,32	14,29	14,26	14,23
60	14,80	14,77	14,74	14,71	14,68	14,65	14,62	14,59	14,56	14,53	14,50	14,48
61	15,02	14,99	14,96	14,93	14,90	14,87	14,84	14,81	14,78	14,75	14,72
62	15,27	15,23	15,20	15,17	15,14	15,11	15,08	15,05	15,02	14,99	14,96
63	15,48	15,45	15,42	15,39	15,36	15,32	15,29	15,26	15,23	15,20
64	15,73	15,69	15,66	15,63	15,60	15,57	15,54	15,50	15,47	15,44
65	15,97	15,94	15,91	15,87	15,84	15,81	15,78	15,75	15,71	15,68
66	16,18	16,15	16,12	16,09	16,05	16,02	15,99	15,96	15,92
67	16,43	16,40	16,36	16,33	16,30	16,26	16,23	16,20	16,16
68	16,64	16,61	16,57	16,54	16,51	16,47	16,44	16,41
69	16,89	16,85	16,82	16,78	16,75	16,71	16,68	16,65
70	17,10	17,06	17,03	16,99	16,96	16,92	16,89
71	17,34	17,30	17,27	17,23	17,20	17,16	17,13
72	17,55	17,51	17,48	17,44	17,41	17,37
73	17,79	17,76	17,72	17,68	17,65
74	18,00	17,96	17,93	17,89
75	18,24	18,21	18,17	18,13
76	18,49	18,45	18,41	18,37	18,34
77	18,69	18,65	18,61	18,58
78	18,93	18,89	18,86	18,82
79	19,14	19,10	19,06
80	19,38	19,34	19,30
81	19,58	19,54
82	19,78	19,74
83	20,02
84	20,27
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110

Tabla de Schmitz (continuación)

Lectura del polarímetro	°Brix																	
	20	20,5	21	21,5	22	22,5	23	23,5	24	24,5	25	25,5	26	26,5	27	27,5	28	28,5
1	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
2	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
3	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
4	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
5	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
6	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
7	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
8	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
9	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
10	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
11	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
12	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
13	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
14	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
15	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
16	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
17	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
18	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
19	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
20	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
21	5,06	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
22	5,30	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
23	5,54	5,53	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
24	5,78	5,77	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
25	6,02	6,01	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
26	6,26	6,25	6,23	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
27	6,50	6,49	6,47	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
28	6,74	6,73	6,71	6,70	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
29	6,98	6,97	6,95	6,94	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
30	7,22	7,21	7,19	7,18	7,16	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
31	7,46	7,45	7,43	7,42	7,40	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
32	7,70	7,69	7,67	7,66	7,64	7,63	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
33	7,94	7,93	7,91	7,90	7,88	7,86	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
34	8,19	8,17	8,15	8,14	8,12	8,10	8,08	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
35	8,43	8,41	8,39	8,37	8,36	8,34	8,32	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
36	8,67	8,65	8,63	8,61	8,60	8,58	8,56	8,54	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
37	8,91	8,89	8,87	8,85	8,83	8,82	8,80	8,78	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
38	9,15	9,13	9,11	9,09	9,07	9,05	9,04	9,02	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
39	9,39	9,37	9,35	9,33	9,31	9,29	9,27	9,25	9,24	..	..	..	..	..	..	..	..	..
40	9,63	9,61	9,59	9,57	9,55	9,53	9,51	9,49	9,47	..	..	..	..	..	..	..	..	..
41	9,87	9,85	9,83	9,81	9,79	9,77	9,75	9,73	9,71	9,69	..	..	..	..	..	..	..	..
42	10,11	10,09	10,07	10,05	10,03	10,01	9,99	9,97	9,95	9,92	..	..	..	..	..	..	..	..
43	10,35	10,33	10,31	10,29	10,27	10,25	10,22	10,20	10,18	10,16	10,14	..	..	..	..	..	..	..
44	10,59	10,57	10,55	10,53	10,51	10,48	10,46	10,44	10,42	10,40	10,38	..	..	..	..	..	..	..
45	10,83	10,81	10,79	10,77	10,74	10,72	10,70	10,68	10,66	10,63	10,61	10,59	..	..	..	..	..	..
46	11,07	11,05	11,03	11,01	10,98	10,96	10,94	10,92	10,89	10,87	10,85	10,82	..	..	..	..	..	..
47	11,32	11,29	11,27	11,25	11,22	11,20	11,18	11,15	11,13	11,11	11,08	11,06	11,04	..	..	..	..	..
48	11,56	11,53	11,51	11,48	11,46	11,44	11,41	11,39	11,37	11,34	11,32	11,30	11,27	..	..	..	..	..
49	11,80	11,77	11,75	11,72	11,70	11,68	11,65	11,63	11,60	11,58	11,56	11,53	11,51	..	..	..	..	..
50	12,04	12,01	11,99	11,96	11,94	11,91	11,89	11,86	11,84	11,82	11,79	11,77	11,74	11,72	..	..	..	..
51	12,28	12,25	12,23	12,20	12,18	12,15	12,13	12,10	12,08	12,05	12,03	12,00	11,98	11,95	..	..	..	..
52	12,52	12,49	12,47	12,44	12,42	12,39	12,37	12,34	12,31	12,29	12,26	12,24	12,21	12,19	12,16	..	..	..
53	12,76	12,73	12,71	12,68	12,66	12,63	12,60	12,58	12,55	12,52	12,50	12,47	12,45	12,42	12,39	..	..	..
54	13,00	12,97	12,95	12,92	12,89	12,87	12,84	12,81	12,79	12,76	12,73	12,71	12,68	12,65	12,63	12,60	..	..
55	13,24	13,21	13,19	13,16	13,13	13,11	13,08	13,05	13,02	13,00	12,97	12,94	12,92	12,89	12,86	12,83	..	..

Tabla de Schmitz (continuación)

Lectura del polárimetro	°Brix																	
	20	20,5	21	21,5	22	22,5	23	23,5	24	24,5	25	25,5	26	26,5	27	27,5	28	28,5
56	13,48	13,45	13,43	13,40	13,37	13,34	13,32	13,29	13,26	13,23	13,21	13,18	13,15	13,12	13,10	13,07	13,04	...
57	13,72	13,69	13,67	13,64	13,61	13,58	13,55	13,53	13,50	13,47	13,44	13,41	13,39	13,36	13,33	13,30	13,27	...
58	13,96	13,94	13,91	13,88	13,85	13,82	13,79	13,76	13,73	13,71	13,68	13,65	13,62	13,59	13,56	13,53	13,51	...
59	14,20	14,18	14,15	14,12	14,09	14,06	14,03	14,00	13,97	13,94	13,91	13,88	13,86	13,83	13,80	13,77	13,74	13,71
60	14,45	14,42	14,39	14,36	14,33	14,30	14,27	14,24	14,21	14,18	14,15	14,12	14,09	14,06	14,03	14,00	13,97	13,94
61	14,69	14,66	14,63	14,60	14,57	14,54	14,51	14,48	14,44	14,41	14,38	14,35	14,32	14,29	14,26	14,23	14,20	14,17
62	14,93	14,90	14,87	14,83	14,80	14,77	14,74	14,71	14,68	14,65	14,62	14,59	14,56	14,53	14,50	14,47	14,44	14,41
63	15,17	15,14	15,11	15,07	15,04	15,01	14,98	14,95	14,92	14,89	14,86	14,83	14,79	14,76	14,73	14,70	14,67	14,64
64	15,41	15,38	15,34	15,31	15,28	15,25	15,22	15,19	15,16	15,12	15,09	15,06	15,03	15,00	14,97	14,93	14,90	14,87
65	15,65	15,62	15,58	15,55	15,52	15,49	15,46	15,42	15,39	15,36	15,33	15,30	15,26	15,23	15,20	15,17	15,14	15,10
66	15,89	15,86	15,82	15,79	15,76	15,73	15,69	15,66	15,63	15,60	15,56	15,53	15,50	15,47	15,43	15,40	15,37	15,34
67	16,13	16,10	16,06	16,03	16,00	15,96	15,93	15,90	15,87	15,83	15,80	15,77	15,73	15,70	15,67	15,63	15,60	15,57
68	16,37	16,34	16,30	16,27	16,24	16,20	16,17	16,14	16,10	16,07	16,04	16,00	15,97	15,94	15,90	15,87	15,83	15,80
69	16,61	16,58	16,54	16,51	16,48	16,44	16,41	16,37	16,34	16,31	16,27	16,24	16,20	16,17	16,14	16,10	16,07	16,03
70	16,85	16,82	16,78	16,75	16,71	16,68	16,65	16,61	16,58	16,54	16,51	16,47	16,44	16,40	16,37	16,34	16,30	16,27
71	17,09	17,06	17,02	16,99	16,95	16,92	16,88	16,85	16,81	16,78	16,74	16,71	16,67	16,64	16,60	16,57	16,53	16,50
72	17,33	17,30	17,26	17,23	17,19	17,16	17,12	17,09	17,05	17,01	16,98	16,94	16,91	16,87	16,84	16,80	16,77	16,73
73	17,58	17,54	17,50	17,47	17,43	17,39	17,36	17,32	17,29	17,25	17,21	17,18	17,14	17,11	17,07	17,04	17,00	16,96
74	17,82	17,78	17,74	17,71	17,67	17,63	17,60	17,56	17,52	17,49	17,45	17,41	17,38	17,34	17,30	17,27	17,23	17,20
75	18,06	18,02	17,98	17,95	17,91	17,87	17,83	17,80	17,76	17,72	17,69	17,65	17,61	17,58	17,54	17,50	17,47	17,43
76	18,30	18,26	18,22	18,18	18,15	18,11	18,07	18,03	18,00	17,96	17,92	17,88	17,85	17,81	17,77	17,74	17,70	17,66
77	18,54	18,50	18,46	18,42	18,39	18,35	18,31	18,27	18,23	18,20	18,16	18,12	18,08	18,04	18,01	17,97	17,93	17,89
78	18,78	18,74	18,70	18,66	18,62	18,59	18,55	18,51	18,47	18,43	18,39	18,36	18,32	18,28	18,24	18,20	18,16	18,13
79	19,02	18,98	18,94	18,90	18,86	18,82	18,79	18,75	18,71	18,67	18,63	18,59	18,55	18,51	18,47	18,44	18,40	18,36
80	19,26	19,22	19,18	19,14	19,10	19,06	19,02	18,98	18,94	18,90	18,87	18,83	18,79	18,75	18,71	18,67	18,63	18,59
81	19,50	19,46	19,42	19,38	19,34	19,30	19,26	19,22	19,18	19,14	19,10	19,06	19,02	18,98	18,94	18,90	18,86	18,82
82	19,74	19,70	19,66	19,62	19,58	19,54	19,50	19,46	19,42	19,38	19,34	19,30	19,26	19,22	19,18	19,14	19,10	19,05
83	19,98	19,94	19,90	19,86	19,82	19,78	19,74	19,70	19,65	19,61	19,57	19,53	19,49	19,45	19,41	19,37	19,33	19,29
84	20,22	20,18	20,14	20,10	20,06	20,02	19,97	19,93	19,89	19,85	19,81	19,77	19,73	19,68	19,64	19,60	19,56	19,52
85	20,46	20,42	20,38	20,34	20,30	20,25	20,21	20,17	20,13	20,09	20,04	20,00	19,96	19,92	19,88	19,84	19,79	19,75
86	20,70	20,66	20,62	20,58	20,53	20,49	20,45	20,41	20,36	20,32	20,28	20,24	20,20	20,15	20,11	20,07	20,03	19,98
87	20,95	20,90	20,86	20,82	20,77	20,73	20,69	20,64	20,60	20,56	20,52	20,47	20,43	20,39	20,34	20,30	20,26	20,22
88	...	21,14	21,10	21,06	21,01	20,97	20,93	20,88	20,84	20,80	20,75	20,71	20,67	20,62	20,58	20,54	20,49	20,45
89	...	21,38	21,34	21,30	21,25	21,21	21,16	21,12	21,08	21,03	20,99	20,94	20,90	20,86	20,81	20,77	20,73	20,68
90	...	...	21,58	21,53	21,49	21,45	21,40	21,36	21,31	21,27	21,22	21,18	21,13	21,09	21,05	21,00	20,96	20,91
91	...	...	21,82	21,77	21,73	21,68	21,64	21,59	21,55	21,50	21,46	21,41	21,37	21,32	21,28	21,24	21,19	21,15
92	...	...	...	22,01	21,97	21,92	21,88	21,83	21,79	21,74	21,70	21,65	21,60	21,56	21,51	21,47	21,42	21,38
93	...	...	...	22,25	22,21	22,16	22,11	22,07	22,02	21,98	21,93	21,89	21,84	21,79	21,75	21,70	21,66	21,61
94	...	...	...	22,49	22,44	22,40	22,35	22,31	22,26	22,21	22,17	22,12	22,07	22,03	21,98	21,94	21,89	21,84
95	...	...	...	22,68	22,64	22,59	22,54	22,50	22,45	22,40	22,36	22,31	22,26	22,22	22,17	22,12	22,08	22,03
96	...	...	...	...	22,92	22,88	22,83	22,78	22,73	22,69	22,64	22,59	22,54	22,50	22,45	22,40	22,36	22,31
97	...	...	...	...	23,11	23,07	23,02	22,97	22,92	22,87	22,83	22,78	22,73	22,68	22,64	22,59	22,54	22,50
98	...	...	...	...	23,35	23,30	23,25	23,21	23,16	23,11	23,06	23,01	22,97	22,92	22,87	22,82	22,77	22,73
99	...	...	...	...	23,54	23,49	23,44	23,39	23,35	23,30	23,25	23,20	23,15	23,10	23,05	23,00	22,95	22,91
100	...	...	...	...	23,78	23,73	23,68	23,63	23,58	23,53	23,48	23,43	23,38	23,34	23,29	23,24	23,19	23,15
101	...	...	...	...	...	23,97	23,92	23,87	23,82	23,77	23,72	23,67	23,62	23,57	23,52	23,47	23,42	23,38
102	...	...	...	...	...	24,20	24,15	24,10	24,05	24,00	23,95	23,90	23,85	23,80	23,75	23,70	23,65	23,60
103	...	...	...	...	...	24,44	24,39	24,34	24,29	24,24	24,19	24,14	24,09	24,04	23,99	23,94	23,89	23,84
104	...	...	...	...	...	24,63	24,58	24,52	24,47	24,42	24,37	24,32	24,27	24,22	24,17	24,12	24,07	24,02
105	...	...	...	...	...	24,86	24,81	24,76	24,71	24,66	24,61	24,55	24,50	24,45	24,40	24,35	24,30	24,25
106	...	...	...	...	...	...	...	25,05	25,00	24,94	24,89	24,84	24,79	24,74	24,68	24,63	24,58	24,53
107	...	...	...	...	...	...	...	25,29	25,23	25,18	25,13	25,07	25,02	24,97	24,92	24,86	24,81	24,76
108	...	...	...	...	...	...	...	...	25,47	25,41	25,36	25,31	25,26	25,20	25,15	25,10	25,05	25,00
109	...	...	...	...	...	...	...	...	25,70	25,65	25,60	25,54	25,49	25,44	25,38	25,33	25,28	25,23
110	...	...	...	...	...	...	...	...	25,94	25,89	25,83	25,78	25,72	25,67	25,62	25,56	25,51	25,46

Décimas de la lectura del polárimetro	Pol	Décimas de la lectura del polárimetro	Pol
0,1	0,02	0,6	0,14
0,2	0,05	0,7	0,17
0,3	0,07	0,8	0,19
0,4	0,09	0,9	0,21
0,5	0,12		

ANEXO C. TABLA DE TUKEY

Tabla LXXXVII. Valores de α para la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 0,05

Grados de libertad del error	Número de tratamientos								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	17,97	26,98	32,82	37,08	40,41	43,12	45,4	47,36	49,07
2	6,08	8,33	9,8	10,88	11,74	12,44	13,03	13,54	13,99
3	4,5	5,91	6,82	7,5	8,04	8,48	8,85	9,18	9,46
4	3,93	5,04	5,76	6,29	6,71	7,05	7,35	7,6	7,83
5	3,64	4,6	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,8	6,99
6	3,46	4,34	4,9	5,3	5,63	5,9	6,12	6,32	6,49
7	3,34	4,16	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	5,82	6,16
8	3,26	4,04	4,53	4,89	5,17	5,4	5,6	6	5,92
9	3,2	3,95	4,41	4,76	5,02	5,24	5,43	5,77	5,74
10	3,15	3,88	4,33	4,65	4,91	5,12	5,3	5,59	5,6
11	3,11	3,82	4,26	4,57	4,82	5,03	5,2	5,46	5,49
12	3,08	3,77	4,2	4,51	4,75	4,95	5,12	5,35	5,39
13	3,06	3,73	4,15	4,45	4,69	4,88	5,05	5,27	5,32
14	3,03	3,7	4,11	4,41	4,64	4,83	4,99	5,19	5,25
15	3,01	3,67	4,08	4,37	4,59	4,78	4,94	5,08	5,2
16	3	3,65	4,05	4,33	4,56	4,74	4,9	5,03	5,15
17	2,98	3,63	4,02	4,3	4,52	4,7	4,86	4,99	5,11
18	2,97	3,61	4	4,28	4,49	4,67	4,82	4,96	5,07
19	2,96	3,59	3,98	4,25	4,47	4,65	4,79	4,92	5,04
20	2,95	3,59	3,96	4,23	4,45	4,62	4,77	4,9	5,01
24	2,92	3,53	3,9	4,17	4,37	4,54	4,68	4,81	4,92
30	2,89	3,49	3,85	4,1	4,3	4,46	4,6	4,72	4,82
40	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23	4,39	4,52	4,63	4,73
60	2,83	3,4	3,74	3,98	4,16	4,31	4,44	4,55	4,65
120	2,8	3,36	3,68	3,92	4,1	4,24	4,36	4,47	4,56
inf	2,77	3,31	3,63	3,86	4,03	4,17	4,29	4,39	4,47

Fuente: Moncada, José. Estadística para ciencias del movimiento humano. p. 112.

