



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

**DETERMINACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO  
DE SACAROSA EN CAÑA MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS  
MÉTODOS DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA Y PRENSA HIDRÁULICA**

**Heydi Jeaneth Calderón Ambelis**

Asesorado por el Ing. Byron de Jesús López Maldonado

Guatemala, febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO  
DE SACAROSA EN CAÑA MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS  
MÉTODOS DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA Y PRENSA HIDRÁULICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**HEYDI JEANETH CALDERÓN AMBELIS**

ASESORADO POR EL ING. BYRON DE JESÚS LOPEZ MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2014

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. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

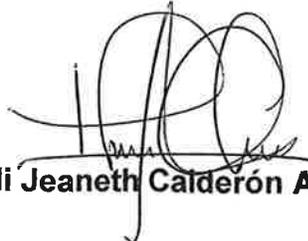
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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:

### **DETERMINACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE SACAROSA EN CAÑA MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA Y PRENSA HIDRÁULICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 02 de julio de 2013.



**Heydi Jeaneth Calderón Ambelis**

Guatemala, 28 de octubre de 2013

Ing. Víctor Monzón  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
USAC

Respetable Ing. Víctor Monzón,

Hago de su conocimiento que apruebo el informe final como asesor del proyecto titulado: DETERMINACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE SACAROSA EN CAÑA MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA Y PRENSA HIDRÁULICA, el cual fue desarrollado por la estudiante Heydi Jeaneth Calderón Ambelis, carnet 200412815 para optar al título de Ingeniera Química.

Atentamente,



**Byron de Jesús López Maldonado**  
Ingeniero Químico  
Colegiado 1066

Ingeniero Químico

Colegiado 1066



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

Guatemala, 18 de noviembre de 2013  
Ref. EI.Q.TG-IF.080.2013

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-067-2013-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Heydi Jeaneth Calderón Ambelis.**

Identificada con número de camé: **2004-12815.**

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA.**

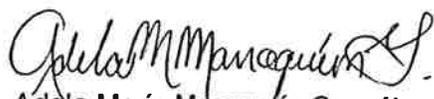
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DETERMINACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE SACAROSA EN CAÑA MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA Y PRENSA HIDRÁULICA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Byron de Jesús López Maldonado.**

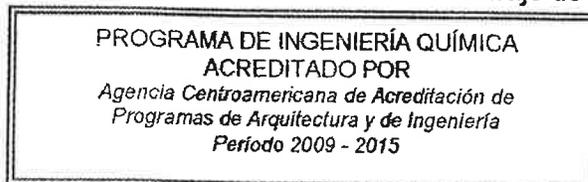
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

**"ID Y ENSEÑAD A TODOS"**

  
Inga. Adela María Marroquín González  
COORDINADORA DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



**ACAAI**

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica  
EIQD-REG-SG-004

Ref.EIQ.TG.017.2014

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 de la estudiante, **HEYDI JEANETH CALDERÓN AMBELIS** titulado: "**DETERMINACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE SACAROSA EN CAÑA MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA Y PRENSA HIDRÁULICA**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, febrero 2014

Cc: Archivo  
VMMV/ale



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

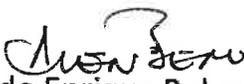


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 059.2014

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: **DETERMINACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE SACAROSA EN CAÑA MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DESINTEGRACIÓN HÚMEDA Y PRENSA HIDRÁULICA**, presentado por la estudiante universitaria: **Heydi Jeaneth Calderón Ambelis**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno  
Decano en Funciones

Guatemala, 13 de febrero de 2014

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- |  |   |
|--|---|
| <b>Dios Padre, Hijo y Espíritu Santo</b> | Quien ha manifestado su amor a lo largo de mi vida. Su mano me sostiene y me lleva siempre en victoria.   |
| <b>Mi Santísima Madre Virgen María</b>   | La estrella de la mañana que llena mi corazón de esperanza. De ti he aprendido a confiar en la Providencia Divina que nunca falla.                                      |
| <b>Santa Ana</b>                         | Tu nombre significa gracia y misericordia, y en esto se ha manifestado tu intercesión. Sé que cuento con tu auxilio y el de tu amada hija ante Dios.                    |
| <b>Mis padres</b>                        | Carlos Eduardo Calderón Cerón y Leticia Ambelis Lima. Yo soy fruto de su esfuerzo, y trabajo. Mi anhelo es ser reflejo de la rectitud de sus corazones.                 |
| <b>Mi hermana</b>                        | Quien me ha enseñado a soñar en grande y a esperar grandes cosas de la vida. Ver tu corazón puro y tus ojos siempre puestos en Dios y la Virgen María, fortalece mi fe. |

**Mis abuelos**

Nunca olvidaré sus enseñanzas y la ternura con la que siempre me amaron.

**Mi familia**

Nunca olvidaré su apoyo incondicional y los momentos de alegría que me llenaron siempre de ánimo

**Eduardo Castro**

Un regalo de Dios. Usted también es mi papá. Su amor lleno de ternura es uno de los motores de mi vida.

**Mis amigos**

Es una bendición contar con su amistad. Me llenan de fortaleza y llenan mi corazón de alegría.

**Mi país Guatemala**

El país de la eterna primavera, que me ha enseñado a dar frutos positivos a pesar de las dificultades.

A todos: gracias porque nunca han dejado de creer en mí.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Mi casa de estudios y segundo hogar durante mi formación académica.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Donde obtuve las herramientas para ser una mujer profesional de influencia positiva para el país. En especial a la escuela de Ingeniería Química donde inicié a trazar la meta que hoy alcanzo.
<b>Ingenio Santa Ana</b>	Por brindarme la oportunidad de desarrollo académico y profesional. Ser parte de su equipo de trabajo me motiva a renovar constantemente mi compromiso con la excelencia.
<b>Ing. Byron Maldonado</b>	Siempre he admirado la pasión con la que desempeña la carrera de Ingeniería Química. Gracias por asesorarme en mi vida académica y profesional. Su amistad sincera ha sido muy importante para mí.
<b>Mi familia y amigos</b>	Su apoyo me ha mantenido con los pies en la tierra y la vista en el cielo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis.....	XVI
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Caña de azúcar .....	5
2.1.1. Calidad de la caña de azúcar .....	6
2.1.2. Composición química de la caña .....	8
2.2. Control químico en un ingenio azucarero .....	10
2.2.1. Evaluación de la calidad de caña .....	10
2.2.1.1. Polarización .....	11
2.2.1.2. Sólidos disueltos.....	12
2.2.1.2.1. Índice de refracción .....	13
2.2.1.3. Azúcares reductores.....	13
2.2.2. Muestreo de caña .....	14
2.2.2.1. Core sampler .....	14
2.2.3. Análisis de caña.....	15
2.2.3.1. Método de prensa hidráulica.....	17
2.2.3.2. Método de desintegración húmeda.....	17

	2.2.3.3.	Relación entre los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica.....	19
3.		DISEÑO METODOLÓGICO.....	21
	3.1.	Variables .....	21
	3.2.	Recurso humano disponible.....	24
	3.3.	Recursos materiales disponibles.....	24
	3.3.1.	Reactivos y materiales .....	24
	3.3.2.	Equipo .....	25
	3.3.3.	Cristalería .....	25
	3.4.	Técnica cuantitativa.....	26
	3.4.1.	Diseño preliminar .....	27
	3.5.	Recolección y ordenamiento de la información .....	30
	3.5.1.	Muestreo .....	30
	3.5.2.	Diseño del tratamiento experimental .....	31
	3.6.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	34
	3.6.1.	Procesamiento de la información por desintegración vía húmeda .....	37
	3.6.1.1.	Porcentaje de fibra en caña.....	37
	3.6.1.2.	Porcentaje de sólidos en caña .....	37
	3.6.1.3.	Sacarosa en caña .....	38
	3.6.1.4.	Pureza del jugo de la caña.....	39
	3.6.2.	Procesamiento de la información por prensa hidráulica.....	40
	3.6.2.1.	Porcentaje de jugo absoluto en caña ...	40
	3.6.2.2.	Porcentaje de fibra en caña.....	40
	3.6.2.3.	Porcentaje sólidos en caña .....	40

3.6.2.4.	Porcentaje sacarosa en caña .....	40
3.6.3.	Procesamiento de la información para humedad de la caña .....	41
3.6.4.	Procesamiento de la información para determinar el modelo matemático.....	41
3.7.	Análisis estadístico .....	43
4.	RESULTADOS .....	49
4.1.	Relación de los valores de sacarosa obtenidos por HPLC y por polarimetría (pol aparente) .....	49
4.2.	Cálculo del factor C .....	52
4.3.	Correlación entre el porcentaje de fibra en caña y el factor C.....	54
4.4.	Modelo matemático propuesto .....	57
4.5.	Humedad en caña .....	59
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
	CONCLUSIONES .....	67
	RECOMENDACIONES .....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICE.....	73
	ANEXOS .....	97



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Formación de sacarosa a partir de glucosa y fructosa .....	6
2.	Características de la caña de azúcar de buena calidad .....	7
3.	Diseño general de la técnica cuantitativa .....	28
4.	Metodologías para análisis de la muestra en báscula .....	29
5.	Gráfico de distribución normal de la fibra en caña – prensa hidráulica .....	45
6.	Histograma de frecuencias del factor C.....	46
7.	Gráfico de distribución normal humedad caña – <i>core sampler</i> .....	47
8.	Gráfico de distribución normal humedad caña – caña preparada .....	48
9.	Sacarosa en caña HPLC en función de sacarosa en caña polarimetría .....	50
10.	Relación del factor C HPLC respecto al factor C polarimetría.....	53
11.	Factor C en función del porcentaje fibra en caña - polarimetría .....	55
12.	Factor C en función del porcentaje fibra en caña - HPLC .....	56

### TABLAS

I.	Promedio de la composición química de los tallos y de los jugos de la caña de azúcar.....	9
II.	Variables de la experimentación .....	21
III.	Variables respuesta o de salida .....	23
IV.	Actividades a desarrollar en la experimentación .....	32
V.	Planificación de toma de muestras durante un día laboral .....	33

VI.	Datos para identificación de la muestra .....	34
VII.	Datos del extracto de jugo por el método desintegración vía húmeda..	35
VIII.	Datos del extracto de jugo por el método prensa hidráulica .....	35
IX.	Datos para cálculo de la humedad en caña .....	36
X.	Error típico para la relación de la sacarosa en caña HPLC a partir de la sacarosa en caña polarimetría .....	43
XI.	Error típico para la relación del factor C HPLC a partir del factor C polarimétrico.. .....	43
XII.	Error típico para la relación del factor C a partir de la fibra en caña .....	44
XIII.	Error típico para los modelos matemáticos propuestos .....	44
XIV.	Análisis de correlación variables respuesta .....	46
XV.	Sacarosa en caña HPLC y sacarosa en caña pol - Valores promedio..	49
XVI.	Sacarosa en caña HPLC en función de sacarosa en caña polarimetría .....	51
XVII.	Factor C obtenido por los métodos de polarimetría y HPLC – Valores promedio .....	52
XVIII.	Relación del factor C HPLC respecto al factor C polarimetría .....	53
XIX.	Porcentaje de fibra en caña y el factores C – valores promedio .....	54
XX.	Factor C en función del porcentaje fibra en caña – polarimetría .....	55
XXI.	Factor C en función del porcentaje fibra en caña – HPLC .....	56
XXII.	Modelo matemático para el factor C en función del porcentaje fibra caña .....	57
XXIII.	Modelo matemático para la sacarosa en caña.....	58
XXIV.	Humedad en caña en <i>core sampler</i> y en caña preparada .....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>b</b>	Brix del extracto
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
<b>Z</b>	Confiabilidad
<b>R<sup>2</sup></b>	Correlación
<b>E</b>	Error estimado
<b>C</b>	Factor clave para determinar porcentaje sacarosa en caña a partir del método de prensa hidráulica
<b>°</b>	Grados
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>°Z</b>	Grados pol
<b>g</b>	Gramo
<b>h</b>	Hora
<b>M</b>	Humedad de la caña
<b>ID</b>	Identificación de dato de la muestra
<b>kgf</b>	Kilogramo fuerza
<b>gg</b>	Kilogramo masa
<b>psi</b>	Libras por pulgada cuadrada
<b>L</b>	Litro
<b>mL</b>	Mililitros
<b>mm</b>	Milímetros
<b>min</b>	Minutos
<b>w</b>	Peso de agua (g) tomada en el digestor
<b>c</b>	Peso de muestra de caña (g) tomada en el digestor

<b>%</b>	Porcentaje
<b>F</b>	Porcentaje fibra en caña
<b>Sc</b>	Porcentaje sacarosa caña
<b>Sc<sub>PH</sub></b>	Porcentaje sacarosa caña obtenido por el método de prensa hidráulica
<b>s</b>	Porcentaje sacarosa del extracto
<b>p</b>	Probabilidad de éxito
<b>q</b>	Probabilidad de fracaso
<b>N</b>	Tamaño de la muestra
<b>Sc<sub>Des</sub></b>	Sacarosa en caña obtenida por el método de desintegración húmeda
<b>SIE</b>	Sin mayor influencia en la experimentación objetivo
<b>RDS</b>	Sólidos disueltos refractométricos

## GLOSARIO

<b>Agua libre de Brix</b>	Agua que forma parte de la estructura celulósica de la caña y por tanto no se encuentra en el jugo extraído por los molinos. No puede ser separada de la fibra mecánicamente, pero se evapora a elevadas temperaturas.
<b>Azúcar</b>	Término para la sacarosa disacárida y productos de la industria azucarera, compuesta esencialmente por sacarosa.
<b>Azúcares invertidos</b>	Mezcla de partes aproximadamente iguales de glucosa y fructosa (monosacáridos) que resulta de la hidrólisis de la sacarosa (inversión).
<b>Azúcares reductores</b>	Generalmente se refiere y/o interpreta como azúcares invertidos, determinados midiendo el contenido de sustancias reductoras mediante análisis de laboratorio. Los ejemplos más comunes de azúcares reductores son los de la glucosa y la fructosa.
<b>Azúcares totales</b>	Es la suma de sacarosa y azúcares reductores presentes en una muestra azucarada, normalmente expresados como azúcares totales reductores o invertidos.

<b>Brix</b>	Medida de los sólidos disueltos en azúcar, jugo, licor o jarabe utilizando un refractómetro, también conocidos como sólidos secos refractométricos. Para soluciones que contienen únicamente azúcar y agua, Brix es igual al porcentaje en masa de azúcar.
<b>Contenido de cenizas</b>	Residuo sólido determinado gravimétricamente luego de incinerar en presencia de oxígeno.
<b>DAC</b>	Análisis directo de caña por sus siglas en inglés ( <i>Direct Analysis Cane</i> ).
<b>Extracción</b>	Proporción de azúcar extraído de la caña en la planta de extracción; corresponde a la masa de azúcar en jugo diluido como porcentaje de la masa de azúcar en caña.
<b>Fibra</b>	Estructura fibrosa insoluble seca de la caña. Generalmente es referida a todo el material insoluble que llega con la caña a la fábrica, incluyendo por lo tanto el suelo u otra materia extraña insoluble en caña.
<b>ICUMSA</b>	Comisión Internacional para la Unificación de Métodos para Análisis de Azúcar.
<b>Imbibición</b>	Proceso de añadir agua en la planta de extracción para aumentar la extracción. El agua añadida se denomina agua de imbibición.

<b>No azúcares</b>	Término común que denota los sólidos disueltos diferentes al azúcar contenidos en cualquier flujo del proceso.
<b>Pol</b>	Contenido de sacarosa aparente expresado como porcentaje de masa, medido a partir de la rotación óptica de luz polarizada al pasar por una solución azucarada. Este procedimiento es exacto únicamente para soluciones de sacarosa puras.
<b>Pol en caña</b>	Es la pol expresada en porcentaje de caña a través del cálculo utilizando la fibra porcentaje caña en una relación masa/masa. Es uno de los principales indicadores de la calidad de la caña de azúcar para su procesamiento industrial.
<b>Pureza</b>	La pureza real representa el contenido de sacarosa expresado como porcentaje de la sustancia seca o el contenido de sólidos disueltos. Los sólidos comprenden el azúcar y no sacarosas tales como invertidos, cenizas y elementos colorantes. La pureza aparente se expresa como la polarización dividida por los grados Brix refractométricos, multiplicada por 100.
<b>Rendimiento industrial</b>	Es la cantidad de azúcar (kg) por toneladas de caña procesada (kg azúcar / t caña). Este indicador de desempeño depende de la calidad de la materia

prima y la eficiencia operativa de la fábrica de azúcar.

**Sacarosa**

El compuesto químico puro  $C_{12}H_{22}O_{11}$  que es conocido como azúcar blanco, generalmente medido mediante polarización en caso de soluciones puras y con HPLC en caso de soluciones de baja pureza. El nombre químico es  $\beta$ -D-Fructofuranosil $\alpha$ -D-glucopiranosido.

**Sólidos disueltos**

Todo material soluto que está en solución, incluyendo la sacarosa, monosacáridos, cenizas y otras impurezas orgánicas.

**TECNICAÑA**

Asociación Colombiana de Técnicos de la caña de azúcar

## RESUMEN

Con el objetivo de establecer una ecuación que permita determinar la sacarosa en caña con mayor precisión y exactitud, se realizó la comparación de los métodos de análisis directo de caña prensa hidráulica y desintegración por vía húmeda para el tercer tercio de zafra. Al desarrollar este proyecto en un ingenio de Guatemala, se obtuvo una ecuación más ajustada a las condiciones locales que permitirá estimar un valor más exacto de la sacarosa en caña que ingresa a báscula. Además, se modificó el método desintegración húmeda para obtener un dato aún más exacto. Este estudio sentará las bases para que pueda determinarse una ecuación que tome en cuenta el período completo de zafra y que sea propia de cada ingenio.

Se tomaron 25 series de datos. Cada serie corresponde a dos muestras, una tomada en báscula a la caña que ingresa al ingenio, y la segunda en los conductores de caña preparada previo a su ingreso al molino 1. Con la comparación de estos dos puntos de muestreo se determinó el aporte de humedad del agua de lavado en las mesas del patio de caña. Cada muestra fue analizada por dos métodos: HPLC y polarimetría. La comparación estadística de los resultados permitió conocer la alta correlación entre estos métodos, para generar conclusiones respecto a su aplicación.

Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente para el diseño de la ecuación de determinación de sacarosa en caña. Se comprobó que existe una correlación entre los resultados de los métodos prensa hidráulica y desintegración húmeda que permite determinar un factor para obtener un resultado de sacarosa en caña más exacto utilizando el método prensa

hidráulica. Al finalizar el trabajo se determinó un modelo matemático lineal para el cálculo de sacarosa en caña, y se determinó el modelo matemático lineal para el cálculo del factor C.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Determinar un modelo matemático para el cálculo del contenido de sacarosa en caña, a partir de la relación entre los porcentajes de sacarosa obtenidos por los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica en un ingenio azucarero de Guatemala.

### **Específicos**

1. Comparar resultados de pol por polarimetría y sacarosa por HPLC para determinar su relación, a través del método de análisis de regresión y correlación de Pearson.
2. Determinar la relación entre el porcentaje de sacarosa en caña obtenido por el método prensa hidráulica y el porcentaje de sacarosa en caña obtenido por el método de desintegración húmeda (factor C).
3. Determinar la correlación entre el porcentaje de fibra en caña y el factor C, a través del método de análisis de regresión y correlación de Pearson.

## **Hipótesis**

Existe una correlación entre los resultados de los métodos prensa hidráulica y desintegración húmeda que permite determinar un factor para obtener un resultado de sacarosa en caña más exacto utilizando el método prensa hidráulica.

### **Hipótesis nula ( $H_0$ ):**

Los resultados de los métodos prensa hidráulica y desintegración húmeda no presentan una correlación que permita determinar un factor aplicable al método prensa hidráulica para obtener un resultado de sacarosa en caña más exacto.

### **Hipótesis alterna ( $H_a$ ):**

Los resultados de los métodos prensa hidráulica y desintegración húmeda presentan una correlación que permite determinar un factor aplicable al método prensa hidráulica para obtener un resultado de sacarosa en caña más exacto.

## INTRODUCCIÓN

El análisis de caña es muy importante en un ingenio azucarero debido a que es utilizado en los cálculos de balance, recuperación y rendimiento. La exactitud y confiabilidad de los datos es clave para obtener indicadores del desempeño de las labores agrícolas y del proceso industrial. Los factores que pueden restar exactitud a los datos son: el tiempo entre cosecha y molienda, el tiempo de resguardo de muestras, el lavado de caña, el método utilizado, el error humano aportado por los analistas, la dilución de los extractos de muestras, el error aportado por el equipo, entre otros.

En los ingenios azucareros de Guatemala, se utiliza para el análisis de caña el método de análisis directo de caña vía seca, DAC, conocido comúnmente como método de prensa hidráulica. Este es un método validado y reconocido por TECNICAÑA.

Otro método, propuesto por ICUMSA, es el análisis directo de caña vía húmeda, conocido también como método desintegración húmeda. A pesar que el método desintegración húmeda genera resultados más exactos, debido al grado de preparación y extracción de las muestras de caña, el aumento de costos y recursos que conlleva su aplicación, ha causado que los ingenios azucareros opten por continuar con el uso del método prensa hidráulica.

En países como Brasil y Colombia, se han realizado estudios para analizar el diseño de una ecuación propia, según las condiciones de cada ingenio, para determinar la cantidad de sacarosa en caña. Esto se plantea lograr en base a la relación de los resultados de los métodos prensa hidráulica y desintegración

húmeda. Al aplicar esta ecuación, el laboratorio de caña logrará generar datos con mayor exactitud, sin elevar los costos, ni perder la representatividad de las muestras.

## 1. ANTECEDENTES

La industria azucarera en Indonesia, específicamente en las islas de Java fue, probablemente, la primera en utilizar el concepto de “cristal recuperable” en la evaluación de la caña de azúcar. Tiempo después las industrias australiana y surafricana adoptaron el parámetro denominado “azúcar recuperable” con base en el denominado análisis directo vía húmeda (DAC) para caña de azúcar. Inicialmente este sistema analítico ayudó a determinar el pol y los sólidos totales solubles e insolubles; luego, con la implantación de sistemas de pago y controles de fábrica en dichos países se identificó que las determinaciones de no-sacarosa y fibra, suministradas también por el método DAC, proporcionaban un cálculo mejor y una aproximación más precisa al azúcar recuperable estimado (ARE) en los balances de fábrica. La metodología DAC ofrece un buen estimado de la cantidad de azúcar que se puede obtener (azúcar recuperable) al final del proceso fabril, teniendo en cuenta las determinaciones cuantitativas de:

- Sacarosa en la caña (sacarosa porcentaje caña)
- Fibra (fibra porcentaje caña)
- No-sacarosa (no-sacarosa porcentaje caña)

“La fibra porcentaje caña determina la cantidad de bagazo, y por tanto, las pérdidas de sacarosa en el proceso de extracción. Además, la no sacarosa en la caña incrementa en mayor o menor grado los niveles de miel final y por consiguiente las pérdidas de sacarosa cristalizable, afectando de esta forma la recuperación de azúcar comercial.”<sup>1</sup>

En Brasil se han establecido ecuaciones basadas en los análisis directo (DAC) que permiten un mejor cálculo de la sacarosa porcentaje caña (Sc) a partir de los datos de sacarosa porcentaje jugo (Sj) y fibraporcentajecaña (F).

$$Sc = Sj \times (1 - 0,01 \times F) \times C$$
$$\text{Donde } C = 1,031 - 0,00575 \times F$$

El factor C es clave para determinación de sacarosa porcentaje caña y es necesario validarlo para cada ingenio o sector azucarero. El factor C depende del contenido y tipo de fibra, por lo que es un valor que varía en base al porcentaje de fibra de caña (F). El modelo matemático se ha obtenido a través del análisis de regresión lineal.

Actualmente, en la agroindustria azucarera de Guatemala, el método utilizado para la determinación de sacarosa en caña es el método prensa hidráulica. También las muestras de pre cosecha se han realizado bajo este método.

---

<sup>1</sup>LARRAHONDO, Jesús E.; GARCÍA E., Oscar. *Análisis directo y determinación del azúcar recuperable de la caña de azúcar*. Colombia: CENICAÑA, 1997. *azúcar recuperable de la caña de azúcar*. Colombia: CENICAÑA, 1997. p 1.

Como en el caso de Brasil, también en los ingenios de Colombia, el programa de fábrica de CENICAÑA trabajó en el cálculo de los factores para la determinación de sacarosa en caña para el Ingenio Manuelita, situado en el Valle del Cauca.

En Guatemala, el 15 de mayo de 2011 inició el Programa de Investigación Industrial de CENGICAÑA. Dentro de sus líneas de investigación, se encuentra la recuperación de sacarosa y, la estandarización y normalización de métodos analíticos. Uno de sus objetivos es estudiar, comparar, investigar y proponer las mejores prácticas tecnológicas para reducir las pérdidas de sacarosa en el proceso de fabricación de azúcar y generar información más exacta y precisa para la toma de decisiones. En base a esto, CENGICAÑA ha impulsado la realización de esta investigación, siendo en Guatemala, esta la primera de su tipo. A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se espera extender la metodología a otros ingenios, para que cada uno obtenga una ecuación ajustada a sus propias condiciones.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Caña de azúcar

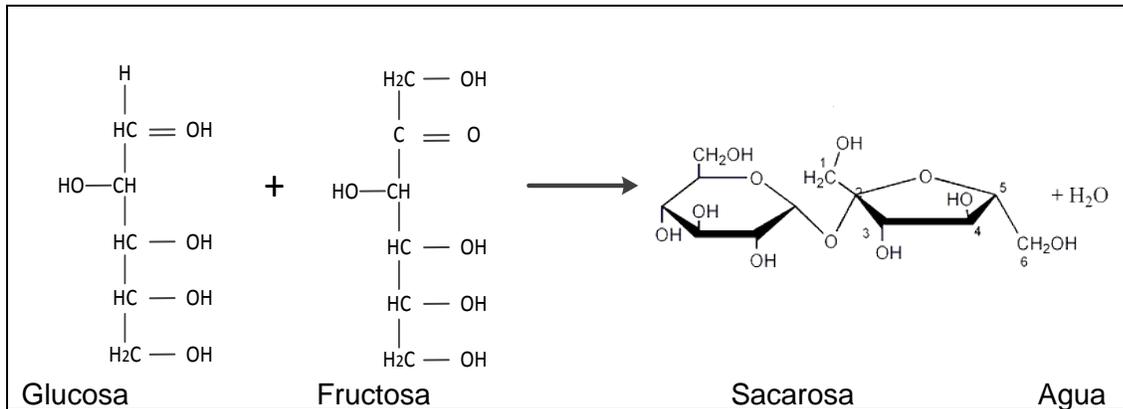
“La caña de azúcar es una planta herbácea de gran tamaño que se cultiva en países tropicales y subtropicales. Es un híbrido complejo de varias especies, derivadas principalmente del *Saccharum officinarum* y otras especies de *Saccharum*. La caña se propaga vegetativamente sembrando trozos de sus tallos. En el proceso de reproducción de la caña se desarrollan y ensayan continuamente nuevas variedades en búsqueda de nuevas y mejores plantas. Este procedimiento se ha constituido en un factor fundamental para el mejoramiento de la productividad en la industria de la caña de azúcar.”<sup>2</sup>

El principal objetivo al procesar la caña es recuperar el azúcar, que en su estado puro se conoce como el nombre químico de sacarosa. El proceso de formación de sacarosa en la caña consiste en la combinación de dos azúcares monosacáridos, fructosa y glucosa, lo cual se ilustra en la figura 1. La sacarosa tiene fórmula  $C_{12}H_{22}O_{11}$  y se designa como un disacárido por estar conformada a partir de dos unidades de monosacáridos. Estos azúcares son llamados monosacáridos debido a que no pueden ser hidrolizados hasta moléculas más pequeñas de carbohidratos mediante la acción de ácidos o enzimas.

---

<sup>2</sup> REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012. p 37-49.

Figura 1. **Formación de sacarosa a partir de glucosa y fructosa**



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania. Bartens. 2012. p. 37.

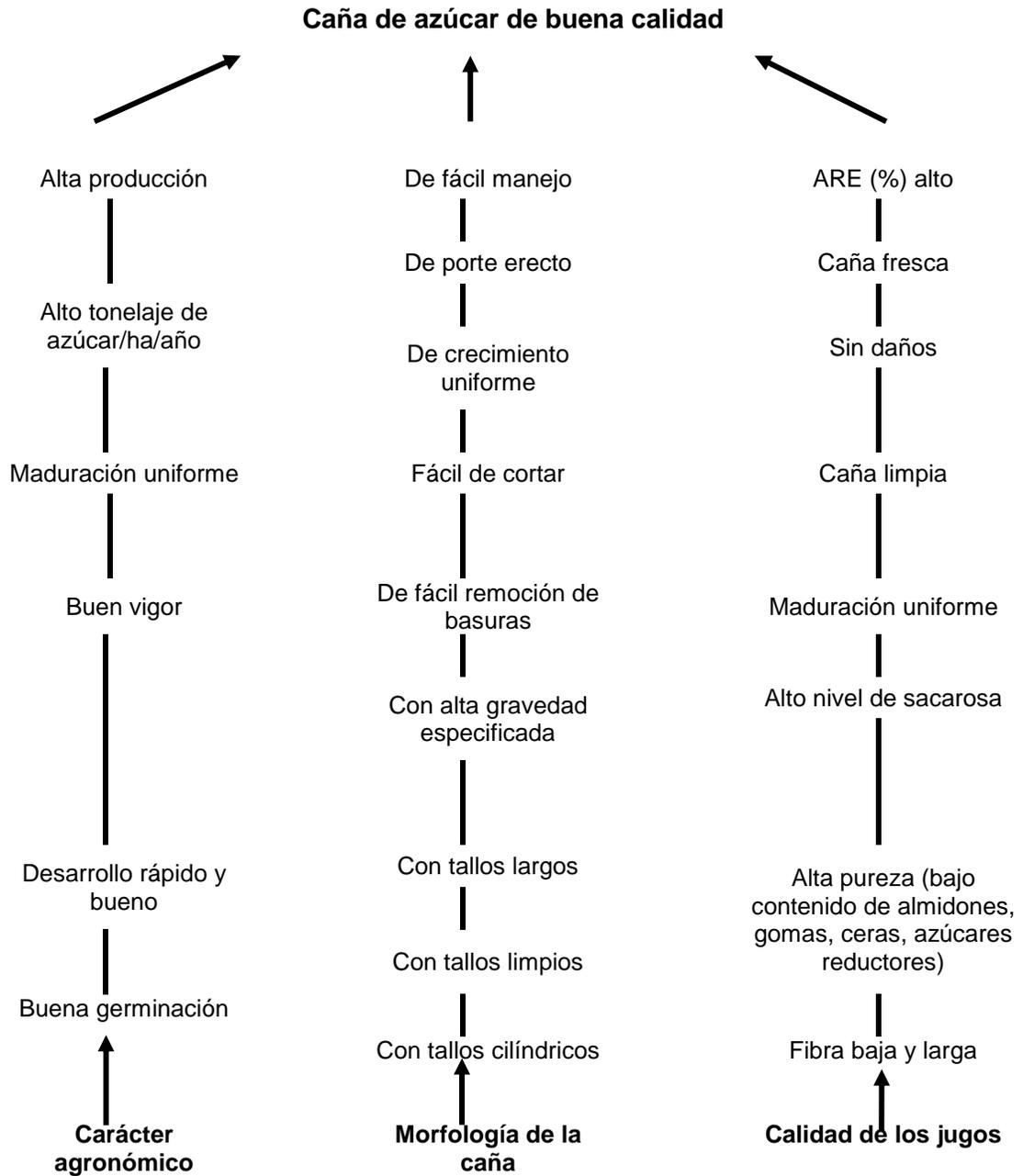
La reacción en el sentido opuesto se denomina inversión. En la primera etapa del proceso de producción de azúcar se extrae el jugo de la caña que es una solución de azúcares con agua junto a otros componentes solubles. Además del jugo, el tallo de la caña contiene como fase sólida 13 g de fibra vegetal por 100 g caña, que dan al tallo su rigidez estructural.

### 2.1.1. Calidad de la caña de azúcar

La calidad de la caña de azúcar depende de varias condiciones: la variedad de caña, el suelo en que se cultiva, las prácticas de manejo agrícola, edad de madurez, etc. Es en el campo donde se define la calidad de la caña que la fábrica procesará y el rendimiento que esta tendrá.

La calidad de caña se determina en el proceso de molienda por la cantidad de azúcar obtenida por tonelada de caña molida. En la figura 2 se resume las características que debe reunir la caña de azúcar de buena calidad.

Figura 2. **Características de la caña de azúcar de buena calidad**



Fuente: LARRAHONDO, Jesús E. Calidad de la caña de azúcar. p. 338.

### 2.1.2. Composición química de la caña

“En términos generales, la caña de azúcar está constituida por jugo y fibra. La fibra es la parte insoluble en agua y está formada principalmente por celulosa, la cual, a su vez, está constituida por azúcares sencillos como glucosa (dextrosa). El contenido porcentual de sólidos (sacarosa, azúcares reductores y otros constituyentes) solubles en agua se denomina comúnmente brix (expresado en porcentaje). La razón porcentual entre sacarosa y el brix se conoce como pureza del jugo. El contenido aparente de sacarosa, expresado como un porcentaje en peso y determinado mediante un método polarimétrico, se denomina pol. Los sólidos solubles diferentes de la sacarosa, que incluyen los azúcares reductores como la glucosa y otras sustancias orgánicas e inorgánicas, se denominan usualmente “no pol” o no sacarosas, los cuales porcentualmente resultan de la diferencia entre el brix y el pol.”<sup>3</sup>

En la tabla I, se presentan los rangos de los valores porcentuales de composición química de los tallos y de los jugos de la caña de azúcar. Se indica la presencia de azúcares reductores como la glucosa y fructosa, que se encuentran en concentraciones de 2 al 4 %. Los azúcares reductores afectan la calidad del azúcar, en términos del color y la dureza del grano.

En la caña, la humedad oscila entre valores de 73 y 76 %. Los sólidos totales solubles (brix % caña) varían entre 10 y 16 %, y la fibra (% de caña) oscila entre 11 y 16 %. Estos tres factores son las variables claves en base a las cuales se diseñará la ecuación para cálculo de sacarosa real.

---

<sup>3</sup>LARRAHONDO, Jesús E. *Calidad de la caña de azúcar*. Colombia: CENICAÑA, 1995. p. 339.

Tabla I. **Promedio de la composición química de los tallos y de los jugos de la caña de azúcar**

<b>Constituyente químico</b>	<b>Porcentaje* (%)</b>
<b>*En los tallos:</b>	
Agua	73 – 76
Sólidos	24 – 27
– Sólidos solubles (Brix)	10 – 16
– Fibra (seca)	11 – 16
<b>En los jugos</b>	
Azúcares	75 – 92
– Sacarosa	70 – 88
– Glucosa	02 – 04
– Fructosa	02 – 04
Sales	
– Inorgánicas	3,0 – 3,4
– Orgánicas	1,5 – 4,5
Ácidos orgánicos	1,0 – 3,0
Aminoácidos	1,5 – 5,5
Otros no azúcares orgánicos	1,5 – 2,5
– Proteína	0,5 – 0,6
– Almidones	0,001 – 0,050
– Gomas	0,3 – 0,6
– Grasas, ceras, etc.	0,15 – 0,50
– Compuestos fenólicos	0,10 – 0,80

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

Fuente: Meade y Chen, 1977.

La cristalización del azúcar (sacarosa) es afectada también por los oligosacáridos. Los oligosacáridos alteran el tamaño del cristal de sacarosa

debido a que causan un alargamiento en el eje “C” de la estructura cristalina. Entre los principales oligosacáridos, reconocidos en la caña de azúcar se encuentran: theanderosa, erlosa, gentianosa, cestosa y leucrosa.

En la caña de azúcar también hay elementos inorgánicos a los cuales se les denomina como ceniza.

## **2.2. Control químico en un ingenio azucarero**

El laboratorio de control de calidad de un ingenio azucarero, es el responsable de implementar un sistema que permita la medición, seguimiento y control del proceso de fabricación de azúcar. Este sistema debe realizarse a través de metodologías validadas y estandarizadas capaces de generar información que pueda ser utilizada como referencia para la toma de decisiones. El análisis de datos generados por el laboratorio permite estimar pérdidas y concluir mediante el rendimiento y eficiencia, el desempeño del proceso.

Si el objetivo general es recuperar la mayor cantidad de sacarosa, todas las mediciones deben dirigirse hacia la verificación del alcance de dicho objetivo y la información generada debe ser suficientemente exacta y confiable.

### **2.2.1. Evaluación de la calidad de caña**

El método básico para la evaluación de caña parte de su análisis total en términos de pol, fibra y sólidos disueltos o Brix. Al medir el Brix en caña se puede determinar la cantidad de azúcar suministrada a la fábrica, pero es necesario medir el contenido y la naturaleza de las impurezas en caña para determinar cuánto de este azúcar puede ser recuperado.

Al extraer el jugo de la caña, la recuperación de azúcar se determina en función de la pureza del jugo, que da la referencia de su contenido de no sacarosas o impurezas.

La cantidad de no sacarosas determina directamente la cantidad de miel final producida y la sacarosa perdida en miel es normalmente proporcional a la cantidad de miel. “Generalmente una caña fresca y limpia, analizada directamente del campo, tiene una pureza igual o mayor a 90 %. Debido a que la caña suministrada a la fábrica trae adheridas hojas y cogollos y ha experimentado una tardanza entre cosecha y molienda, la pureza del jugo de la misma caña está usualmente alrededor de 85 %. Mientras que esta es una reducción de 5 % en la pureza, en realidad representa un aumento de no-sacarosas del 50 %, pues su cantidad (100 – pureza) se incrementa de 10 a 15 unidades.”<sup>4</sup>

Como se mencionó previamente, los análisis que más se realizan son:

#### **2.2.1.1. Polarización**

La polarización es utilizada para medir el contenido de sacarosa de una solución. Se basa en medir la rotación óptica en el plano de la luz polarizada por una muestra que contiene azúcar. Es un método simple, rápido y altamente reproducible. Se define como “la concentración (en g/100 g de solución) de una solución de sacarosa pura en agua con la misma rotación óptica que la muestra a la misma temperatura. Para las soluciones que únicamente contienen sacarosa en agua la polarización (pol) es una medida real del contenido de sacarosa; para soluciones que contienen sacarosa y otras sustancias

---

<sup>4</sup>REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012. p. 44.

ópticamente activas, la pol representa la suma algebraica de las rotaciones de los compuestos presentes.”<sup>5</sup>

No existe una medición directa, simple y exacta de la sacarosa en soluciones impuras. Se ha determinado, que las soluciones de los productos de fábrica también contienen glucosa y fructosa. Estos azúcares también son ópticamente activos pero en dirección opuesta a la sacarosa, y por lo tanto, su presencia no permite tener una medición exacta del contenido de sacarosa presente en el jugo de caña o la melaza. A estos monosacáridos se les conoce como azúcares invertidos.

ICUMSA ha ratificado una escala, que es exacta para soluciones puras de sacarosa. Se toma como referencia una solución de 26 g de sacarosa disuelta en agua a un volumen final de 100 mL a 20 °C, a la cual se denomina solución normal y representa el punto 100 °Z, mientras que el agua pura representa el punto 0 °Z. Al valor numérico generalmente se le denomina pol, una forma corta de polarización, y es ampliamente utilizada como medición de la sacarosa en la industria del azúcar. En materiales azucarados de baja pureza, esta medición se vuelve inexacta y se recomienda el uso de otros métodos más exactos. La medición es dependiente de la temperatura y se realiza a 20 °C.

#### **2.2.1.2. Sólidos disueltos**

“El contenido de sólidos disueltos totales en una corriente de proceso se mide en el laboratorio de fábrica en la escala Brix, representando g de soluto por 100 g de solución; 0 °C y 100 ° en la escala Brix se refieren a agua pura y sacarosa pura, respectivamente. Esta escala se obtuvo originalmente de una medición de densidad de soluciones puras de sacarosa utilizando un

---

<sup>5</sup>REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012.p. 577.

hidrómetro, un método simple y confiable. Sin embargo, esto adolece de exactitud, es fuertemente afectado por impurezas y en corrientes de baja pureza se torna totalmente incierto. Esta medición ha sido ampliamente reemplazada por la medición del índice de refracción de manera similar que con la sacarosa. Se le denomina más comúnmente sólidos disueltos refractométricos o RDS, por sus siglas en inglés. También es dependiente de la temperatura y las mediciones debieran referirse a 20 °C. Es más exacto y confiable que el Brix hidrométrico y proporciona una aproximación más cercana a los sólidos totales. Sin embargo, en soluciones impuras es aún inexacto, dando un valor más alto que el valor real de sólidos disueltos.”<sup>6</sup>

#### **2.2.1.2.1. Índice de refracción**

La medida del índice de refracción puede ser utilizada como una determinación aproximada de la sustancia seca contenida en soluciones que consistan principalmente de sacarosa. El índice de refracción de soluciones acuosas de sacarosa depende de la cantidad de material disuelto, lo cual es válido solamente para soluciones de sacarosa pura; sin embargo, los no azúcares presentes en los productos azucarados influyen en el índice de refracción de igual forma que la sacarosa.

#### **2.2.1.3. Azúcares reductores**

“Los azúcares invertidos son determinados usualmente como las sustancias reductoras en la muestra mediante el método *Lane and Eynon*, que utiliza un procedimiento que involucra una titulación para determinar la

---

<sup>6</sup> REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012.p. 662.

reducción de una solución de *Fehling*. Es a partir de este método de medición que los azúcares invertidos han obtenido el nombre de azúcares reductores.”<sup>7</sup>

Este método también es un análisis aproximado, ya que sustancias como los oligosacáridos serán cuantificados como azúcares reductores.

## **2.2.2. Muestreo de caña**

Es fundamental tener un sistema de muestreo confiable y representativo para determinar rendimientos, eficiencias de fábrica y calcular el pago de la caña. Esta tarea se vuelve compleja ya que la caña no es un material homogéneo. En algunos casos la exactitud no se considera importante y la información sólo se genera como base de cálculo para la contabilidad de costos que corresponde a las áreas cultivadas. Sin embargo, al contar con información más exacta, se pueden generar mejoras valiosas para el proceso agrícola e industrial. En algunas industrias azucareras, aunque la caña es muestreada, la información que recibe mayor atención es la generada a partir del jugo de primera extracción para derivar el análisis de caña.

### **2.2.2.1. Core sampler**

El *core sampler*, se utiliza para extraer muestras de caña de vehículos de entrega justo antes de ser descargados. Consiste de un tubo rotativo de 150 a 200 mm en diámetro con dientes cortantes en su extremo libre. El tubo penetra a la caña en la jaula del vehículo desde arriba o desde un lado, cortando una muestra cilíndrica y profunda de caña que es descargada del tubo una vez que este ha sido retirado. Para lograr un corte limpio de la caña, es importante que la sonda se conserve en buenas condiciones, con las cuchillas afiladas. La

---

<sup>7</sup>REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012.p. 578.

consecuencia de una sonda desafilada será de empujar suciedad dentro de ella, lo que alterará la muestra y causará errores en la extracción de jugo que será analizado.

Usualmente, se prefiere la sonda que entra por arriba de la jaula de caña, con una inclinación de aproximadamente  $45^{\circ}$ , ya que la muestra que suministra es más representativa. Cuando no se cuenta con una sonda inclinada, el muestreo se realiza tomando 5 secciones de caña de diferentes puntos de la jaula, a manera de que los puntos muestreados formen una letra *M*.

### **2.2.3. Análisis de caña**

El análisis de caña generalmente consiste en tomar una muestra de caña con el *core sampler* en la bascula de ingreso al patio de caña. Hay que tomar en cuenta que si la caña no es molida inmediatamente, estará sujeta a descomposición y la muestra no representará la composición de la caña al momento de ser molida. En otros casos, para que la muestra sea representativa de la caña a ser procesada, el punto de muestreo se establece después de la etapa de preparación de caña. En cuanto a exactitud se refiere, los métodos actualmente utilizados se alejan de lo ideal, sin embargo, en algunos laboratorios el sistema de muestreo se fortalece para evitar la mayor variabilidad posible.

En algunos ingenios, el análisis de la caña es utilizado en los cálculos de balance y recuperación. Esto puede estar sujeto a errores debido a los retrasos entre el muestreo/análisis y la molienda. Si se realiza lavado de caña, la diferencia entre el análisis de caña y lo que está realmente en proceso se vuelve mucho mayor.

La razón de pol calculada comparada con la pol por análisis directo y la masa de caña se le denomina Factor Pol y su valor es utilizado para señalar problemas de medición o de degradación de la sacarosa:

$$\text{Factor pol} = \frac{100 \times (\text{pol calculado del balance de masa})}{(\text{pol de la masa de caña y del análisis directo})}$$

Para el análisis de caña se presentan los siguientes métodos como alternativa:

- Análisis directo de caña (DAC) vía seca, también conocido como método de prensa hidráulica
- Análisis directo de caña (DAC) vía húmeda, que también se conoce como método de desintegración por vía húmeda.

Los principales resultados obtenidos del análisis directo de caña en las muestras recolectadas por *core sampler*, analizados por los dos métodos son:

- Fibra porcentaje caña
- Pol de caña
- Pureza de jugo
- Pureza de la caña

A continuación se describen los dos métodos.

### **2.2.3.1. Método de prensa hidráulica**

“Este método utiliza una prensa hidráulica para exprimir el jugo de la muestra de caña preparada a una presión estándar durante un tiempo determinado. El jugo exprimido se analiza para determinar pol y azúcares reductores, mientras que el residuo de fibra se pesa y analiza para determinar la humedad. Con unos pocos supuestos, la composición de la caña puede ser entonces calculada.

Con este método se obtienen resultados satisfactorios. Sin embargo, *Madsen et al. (2003)* mostraron que de manera consistente el contenido de pol en caña del método prensa es ligeramente más alto que el obtenido por análisis de desintegración vía húmeda. También mostraron que el método de la prensa subvalora severamente al contenido de fibra cuando el contenido de suelo es elevado.

Una prensa automática puede extraer el jugo de 20 o más muestras por hora de trabajo, con una presión y tiempo constantes. La desventaja de este método es la necesidad de usar factores de transformación o coeficientes en el cálculo de los parámetros en porcentaje de caña.”<sup>8</sup>

### **2.2.3.2. Método de desintegración húmeda**

“Este método es generalmente considerado como el más exacto, pero ha sido calificado como muy costoso como para realizarse de manera rutinaria. Este método es utilizado en Suráfrica y se le conoce como Análisis Directo de Caña (DAC), que involucra la desintegración de una cantidad determinada de caña en una cantidad estándar de agua. Existen varios diseños disponibles de

---

<sup>8</sup> REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012. p. 61.

desintegradores vía húmeda. Esencialmente el desintegrador consiste de un tazón de acero inoxidable, preferiblemente refrigerado con agua, en el cual cuchillas agudas de acero endurecido giran a alta velocidad. Luego de veinte minutos, la muestra está completamente desintegrada, obteniéndose una mezcla de jugo y fibras finamente desintegradas. Una muestra del extracto se remueve y cuela para luego determinar la pol y azúcares reductores. Una sub-muestra de la caña preparada es secada en un horno hasta peso constante para determinar el contenido de humedad. El contenido de fibra se determina por diferencia.

A otra muestra paralela de la caña desintegrada se le determina la humedad de caña, la cual será utilizada para el cálculo de contenido de fibra y, con este valor, transformar el análisis del extracto en porcentaje de caña.

El rendimiento medio de un desintegrador es de tres muestras por hora de trabajo. La ocurrencia de desperfectos mecánicos del equipo cuando está en uso continuo, representa una gran desventaja del método. El uso continuo provoca un calentamiento de su eje, el cual es transmitido para el extracto contenido en el tazón del desintegrador. Esto hace necesario la adopción de un sistema de enfriamiento del eje mediante un flujo de agua constante. La alta temperatura puede provocar inversión de la sacarosa y alterar los resultados. Otra desventaja del método es el tiempo que se necesita para realizarse, que es mayor al tiempo utilizado en el método de prensa hidráulica.

Una ventaja es el hecho de no utilizar factores de corrección. Sin embargo, por trabajar con extracto diluido, los resultados son reducidos a un tercio del valor original (1000 mL de agua en 500 g de caña), lo que genera la necesidad de utilizar equipos más sensibles y exactos.”<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012.p.62.

### 2.2.3.3. Relación entre los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica

“Diversos autores estudiaron la relación entre la sacarosa porcentaje caña ( $S_C$ ) obtenida por los métodos de desintegración húmeda y prensa hidráulica. El factor C es el resultado de la relación de  $S_C$  ( $C=S_C/S_{CPH}$ ) en diversas condiciones y épocas. Los resultados para el coeficiente C difieren, principalmente de acuerdo a la prensa utilizada para la extracción del jugo, la cantidad de caña prensada y el tiempo de prensado.

El valor del coeficiente C depende del contenido y tipo de fibra de caña, grado de homogeneidad de trituración de la muestra, la presión y el tiempo de prensado, el tipo de equipo de prensado, si es caña larga o corta, etc. Prácticamente, a excepción del contenido y tipo de fibra, los demás factores que interfieren pueden ser estandarizados, lo que hace posible la obtención de ecuaciones de coeficientes C para diferentes valores de fibra. Diversas ecuaciones de Fibra versus C han sido publicadas, específicamente para las condiciones bajo las cuales fueron obtenidas.

El valor de C, será naturalmente menor que uno, lo que equivale a decir que el pol del jugo de caña extraído de la prensa hidráulica, será siempre mayor que el pol del jugo obtenido por el desintegrador húmedo. En el sistema CONSECANA, cuando la fibra de la caña es igual a 16 %, entonces la C es igual a 0,94, y cuando la fibra caña es igual al 10 %, la C equivale a 0,97. Por tanto, para valores más bajos de fibra, los valores de sacarosa en caña de los dos métodos se aproximan más, pues el valor de C se acerca más a uno.”<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup>FERNANDES, Antonio Carlos. *Cálculos na agroindustria da cana-de-açúcar. 3a. ed. Brasil: Sociedade de técnicos azucareros y alcohólicos de Brasil, 2011.p 100.*



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

En la tabla II se describen las variables involucradas en el desarrollo de la experimentación del proyecto.

Tabla II. Variables de la experimentación

Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Factor perturbador	
		Constantes	Variables	Controlables	De ruido
<b>Humedad</b>					
1	Peso masa inicial muestra	g	X		
2	Peso crisol	g		X	
3	Temperatura del horno	°C	X		
4	Tiempo de secado	h	X		
5	Peso final (Crisol + torta base seca)	g		X	
6	Peso final base seca	g		X	
<b>Prensa hidráulica</b>					
7	Peso masa inicial muestra	g	X		
8	Presión hidráulica	kgf/cm <sup>2</sup>	X		
9	Tiempo de prensado	min	X		
10	Peso torta	g		X	
11	Brix extracto	%		X	
<b>Método polarimétrico</b>					
12	Brix extracto polarimétrico	%		X	
13	Pol extracto polarimétrico	%		X	

Continuación de la tabla II.

Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Factor perturbador	
		Constantes	Variables	Controlables	De ruido
<b>Método HPLC</b>					
14 Brix extracto HPLC	%		X		
14 Pol extracto HPLC	%		X		
<b>Desintegración vía húmeda</b>					
15 Peso masa inicial muestra	g	X			
16 Tiempo en desintegrador	psi	X			
17 Peso torta	g		X		
<b>Método polarimétrico</b>					
18 Brix extracto polarimétrico	%		X		
19 Pol extracto polarimétrico	%		X		
<b>Método HPLC</b>					
20 Brix extracto HPLC	%		X		
21 Pol extracto HPLC	%		X		
<b>Ambientales</b>					
22 Temperatura ambiente	°C				SIE
23 Presión atmosférica	psi				SIE
24 Humedad	%				SIE

SIE: Sin mayor influencia en la experimentación objetivo

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variables respuesta o de salida**

<b>No.</b>	<b>Variable</b>	<b>Dimensional</b>
<b>Humedad</b>		
	Humedad de caña	%
<b>Desintegración vía húmeda</b>		
	Fibra caña	%
	Brix en caña	%
	Sacarosa en caña polarimétrico	%
	Sacarosa en caña HPLC	%
	Pureza jugo caña polarimétrico	%
	Pureza jugo caña HPLC	
<b>Prensa hidráulica</b>		
	Fibra caña	%
	Jugo absoluto en caña	
	Brix en caña	%
	Sacarosa en caña polarimétrico	%
	Sacarosa en caña HPLC	%
	Pureza jugo caña polarimétrico	%
	Pureza jugo caña HPLC	
<b>Modelo matemático</b>		
	Factor C polarimétrico	%
	Factor C HPLC	%
	Sacarosa en caña calculada polarimétrico	%
	Sacarosa en caña calculada HPLC	%

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Recurso humano disponible**

Investigadora: Heydi Jeaneth Calderón Ambelis

Asesor de la investigación: Ing. Qco. Byron de Jesús López Maldonado

Auxiliar laboratorio de caña

Analistas especiales (2)

Ayudante de analista

### **3.3. Recursos materiales disponibles**

A continuación se detallan los diversos equipos y materiales que se necesitaron para llevar a cabo la fase experimental del presente informe.

#### **3.3.1. Reactivos y materiales**

- Octapol – Agente clarificador
- Solución Fehling A - Compuesto químico de Sulfato de Cobre
- Solución Fehling B - Compuesto químico de Tartrato de Sodio y potasio e hidróxido de Sodio
- Mezcla Oxalato y Fosfato - Compuesto químico de Oxalato y Fosfato
- Agua destilada
- Papel filtro whatman 91

### **3.3.2. Equipo**

- Muestreador de caña *core sampler* horizontal
- Homogeneizador de caña – Mezcladora industrial
- Desintegrador en húmedo – con camisa de agua y capaz de macerar 500 g de caña en 1 L de agua
- Tamiz – de 250 mm de diámetro y 400 mm de apertura de malla
- Prensa hidráulica con capacidad hasta 300 kgf/cm<sup>2</sup>, con sistema de control de tiempo.
- Balanza analítica para trabajo intenso – capaz de pesar 6 kg con resolución de 0,1 g
- Estufa de secado de tiro forzado - con capacidad de operar a 105 ± 3 °C
- Horno de mufla eléctrico – regulación a 525 °C ± 25 °C
- Estufa eléctrica magnética con calentamiento hasta 400°C
- Refractómetro – precisión 0,05 ° Brix
- Polarímetro – precisión 0,03 ° Z
- Cronómetro digital decimal de minutos
- Equipo de cómputo

### **3.3.3. Cristalería**

- Crisoles de porcelana con capacidad de 150 g
- Capsula de porcelana de 50 g
- Desecador de vidrio con tapa botón – capacidad de 14 L
- Beakers de 50, 100 y 500 mL
- Earlenmeyers de 250 mL
- Balón volumétrico de 250 mL
- Buretas de 50 mL

- Probeta de 1000 mL
- Embudos
- Goteros
- Recipientes para tomar muestras

### **3.4. Técnica cuantitativa**

La investigación será desarrollada utilizando técnicas cuantitativas, debido a que la recolección de datos se realizará mediante medición. Los datos serán obtenidos a partir de los métodos de prensa hidráulica utilizando una prensa, y por el método desintegración húmeda utilizando el equipo de digestor, que actualmente en el laboratorio de fábrica se utiliza para análisis de bagazo.

La medición se realizará siguiendo los siguientes métodos normalizados:

- Método ICUMSA GS5/7-1(1994) – Determinación de la pol (polarización), brix y fibra en caña y bagazo por el método de desintegración húmeda – Oficial
- Método de análisis directo utilizando prensa hidráulica - TECNICAÑA

A partir de los datos obtenidos se procederá a realizar la evaluación del grado de correlación entre los dos métodos.

### **3.4.1. Diseño preliminar**

El diseño preliminar consiste en tomar cuatro series de datos en un día laboral de ocho horas. El punto de muestreo es la caña en báscula de ingreso al ingenio como materia prima.

Cada muestra será analizada por el método prensa hidráulica y desintegración húmeda. A su vez cada uno de los jugos extraídos por los métodos indicados, serán analizados por dos metodologías: Polarimetría y Cromatografía de alto desempeño - HPLC. Al final, se obtendrán datos de sacarosa, pureza, y porcentaje de sólidos.

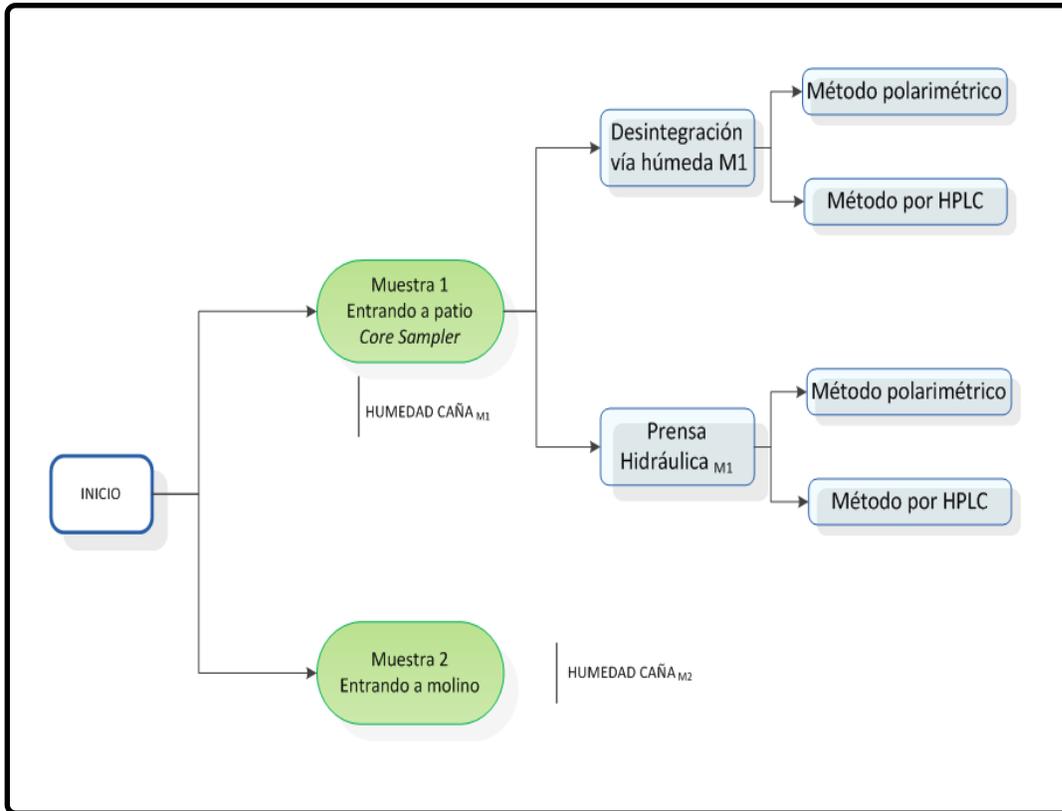
También se determinará humedad de caña y se tomará una muestra del mismo camión en molinos, cuando se encuentre como caña preparada para determinar diferencia de humedades en esos puntos.

El método desintegración húmeda se modifica respecto al método validado actual para obtener un método con mayor exactitud.

Todos los datos serán evaluados y analizados para el diseño de la ecuación de determinación de sacarosa en caña.

El diagrama general del diseño puede observarse en la figura 3.

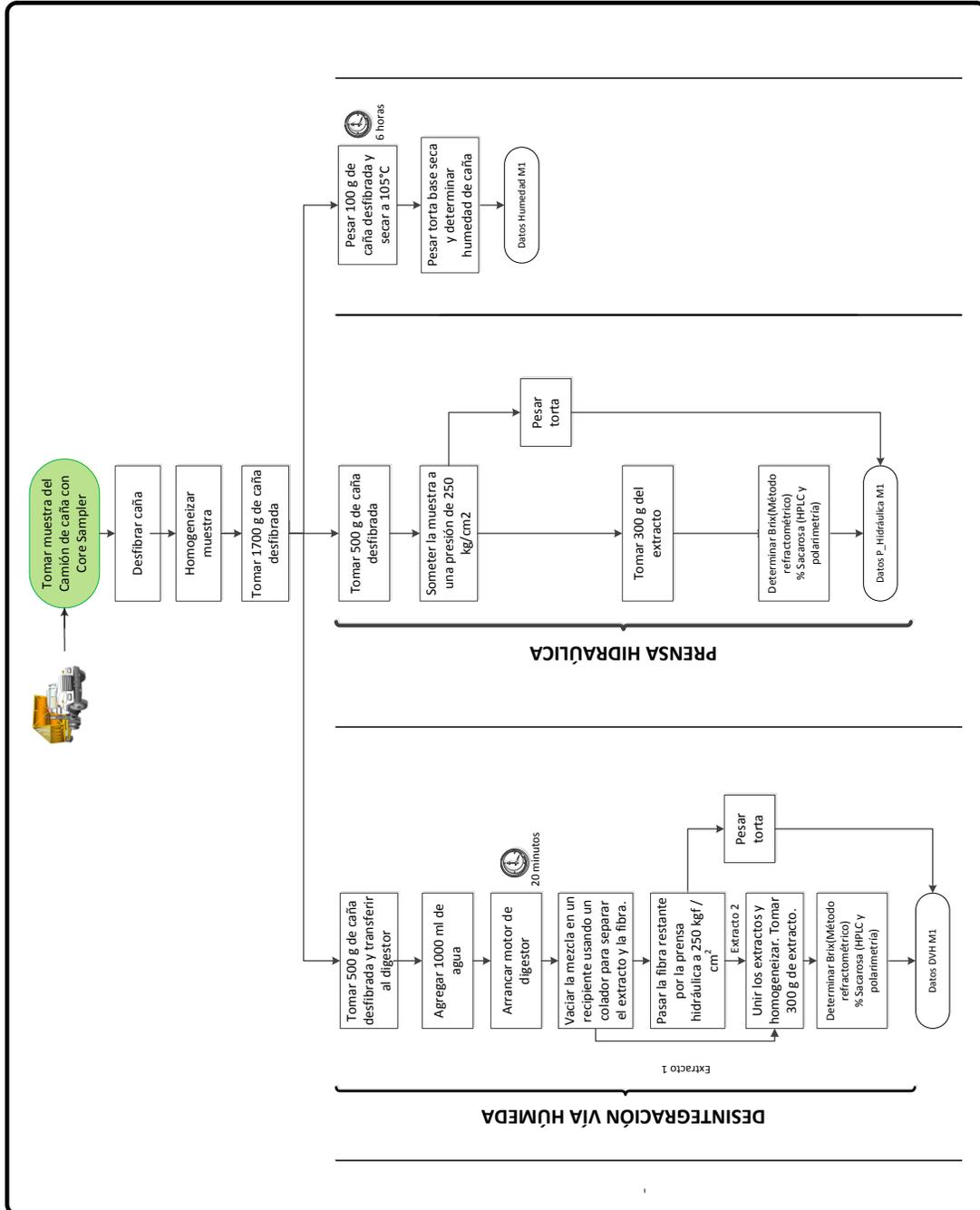
Figura 3. Diseño general de la técnica cuantitativa



Fuente: elaboración propia.

En la figura 4 se detallan los métodos aplicados a la muestra tomada con el *core sampler*.

Figura 4. Metodologías para análisis de la muestra en báscula



Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Recolección y ordenamiento de la información

Para obtener los mejores resultados, se determinó la mínima cantidad de datos necesarios para obtener resultados significativos así como la forma en que serían recolectados.

#### 3.5.1. Muestreo

Para obtener resultados satisfactorios con un mínimo de error se seleccionó un nivel de confianza de 95 %, un error esperado del 8,5 % y el 95 % de probabilidad de que los datos sean aceptados como correctos.

$$N = \frac{Z^2 pq}{E^2}$$

Donde:

Z = Confiabilidad

E = Error estimado

p = Probabilidad de éxito

q = Probabilidad de fracaso (1 - p)

N = Tamaño de la muestra

Para este caso, las variables en la ecuación, toman los siguientes valores:

Z = 1,96

E = 0,07

p = 0,95

q = 0,05

$$N = \frac{1,96^2(0,95)(0,05)}{(0,085)^2} = 25$$

Como mínimo deberán tomarse 25 datos para obtener un nivel de confianza del 95 %, un error esperado del 8,5 % y una probabilidad de aceptación del 95 %.

### **3.5.2. Diseño del tratamiento experimental**

Se evaluarán veinticinco muestras para la caña que ingresa al ingenio (*Core sampler*). A estas muestras se les realizará el análisis prensa hidráulica y desintegración vía húmeda. Las variables a determinar serán: humedad, sacarosa porcentaje caña, fibra porcentaje caña y pureza. Estas variables se obtendrán a partir de los métodos de brix por refractómetro, polarimetría, y HPLC. Los resultados de las purezas obtenidas por el HPLC serán más exactos que los obtenidos por polarimetría, por lo que se analizará la correlación entre estos dos métodos de caracterización de caña de azúcar.

En un segundo punto de muestreo, se evaluarán veinticinco muestras de caña preparada previo a entrar al molino industrial 1. Se garantizará que la muestra de caña preparada corresponda al mismo camión muestreado en báscula. De esta forma, se dará una trazabilidad a la caña en estos dos puntos para determinar la humedad que aporta el lavado de caña en la mesa.

Cada día se tomarán cuatro series de datos. Se analizarán las cuatro muestras tomadas en báscula (*Core sampler*) con las dos metodologías para cálculo de sacaros en caña, en total se obtendrán 8 extractos (jugo extraído de muestra de caña). A estos 8 extractos se les realizarán los análisis de Pol y sacarosa HPLC.

Las actividades a desarrollar se listan en la tabla IV.

Tabla IV. **Actividades a desarrollar en la experimentación**

<b>PASO</b>	<b>ACTIVIDAD A DESARROLLAR</b>
1	Tomar muestra en <i>core sampler</i>
2	Anotar nota de peso y número de camión
3	Desfibrar caña
4	Pesar muestra para:
4,1	Desintegrador (500 g)
4,2	Prensa Hidráulica (500 g)
4,3	Humedad (100 g) y meter al horno
5	Método prensa hidráulica
5,1	Brix extracto
5,2	Pol ICUMSA (52 g / 200 mL)
5,3	Pureza polarimétrico
5,4	Peso torta
5,5	Sacarosa HPLC
5,6	Pureza HPLC
6	Método desintegración húmeda
6,1	Llevar muestra a laboratorio fábrica (500 g)
6,2	Verter muestra en digestor (20 min)
6,3	Sacar muestra y llevar a laboratorio caña
6,4	Separar con colador el extracto 1
6,5	Prensar contenido solido
6,6	Se obtiene el extracto 2 y se mezcla con el extracto 1
6,7	Homogeneizar muestra
6,8	Pesar torta
6,9	Analizar jugo
6.9.1	Brix extracto
6.9.2	Pol ICUMSA (52 g / 200 mL)
6.9.3	Pureza polarimétrico
6.9.4	Peso torta
6.9.5	Sacarosa HPLC
6.9.6	Pureza HPLC
7	Tomar muestra en molino
8	Pesar muestra para
8,1	Humedad (100 g) y meter al horno
9	Sacar muestras del horno

Fuente: elaboración propia.



### 3.6. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los formatos utilizados para la tabulación y ordenamiento de datos se describen a continuación. Los resultados obtenidos para los análisis de polarimetría y HPLC en ambos métodos corresponden al extracto de jugo de caña de cada muestra. Estos datos tendrán que procesarse para la obtención de los resultados expresados en porcentaje caña.

Tabla VI. Datos para identificación de la muestra

Información de la muestra							
Día	Fecha	Hora	Muestra	Lugar	Nota de peso	Tándem	Tipo Caña
Lunes	15/04/2013	06:15	1,1	<i>Core sampler</i>	N <sub>1</sub>	A	Caña larga
		09:00	2,1	<i>Core sampler</i>	N <sub>2</sub>	B	Mecanizada
		13:30	3,1	<i>Core sampler</i>	N <sub>3</sub>	A	Caña larga
		15:30	4,1	<i>Core sampler</i>	N <sub>4</sub>	B	Mecanizada
Martes	16/04/2013	06:15	5,1	<i>Core sampler</i>	N <sub>5</sub>	A	Caña larga
		09:00	6,1	<i>Core sampler</i>	N <sub>6</sub>	B	Mecanizada
		13:30	7,1	<i>Core sampler</i>	N <sub>7</sub>	A	Caña larga
		15:30	8,1	<i>Core sampler</i>	N <sub>8</sub>	B	Mecanizada

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos del extracto de jugo por el método desintegración vía húmeda**

Información de la muestra				Desintegración vía húmeda					
Día	Fecha	Hora	Muestra	Polarimetría			HPLC		
				Brix	Pol	Pureza	Sacarosa	Pureza	Peso torta seca
Lunes	15/04/2013	06:15	1,1	B <sub>1,1</sub>	P <sub>1,1</sub>	PZ <sub>1,1</sub>	S <sub>HPLC1,1</sub>	PZ <sub>HPLC1,1</sub>	Ts <sub>1,1</sub>
		09:00	2,1	B <sub>2,1</sub>	P <sub>2,1</sub>	PZ <sub>2,1</sub>	S <sub>HPLC2,1</sub>	PZ <sub>HPLC2,1</sub>	Ts <sub>2,1</sub>
		13:30	3,1	B <sub>3,1</sub>	P <sub>3,1</sub>	PZ <sub>3,1</sub>	S <sub>HPLC3,1</sub>	PZ <sub>HPLC3,1</sub>	Ts <sub>3,1</sub>
		15:30	4,1	B <sub>4,1</sub>	P <sub>4,1</sub>	PZ <sub>4,1</sub>	S <sub>HPLC4,1</sub>	PZ <sub>HPLC4,1</sub>	Tsz <sub>4,1</sub>

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos del extracto de jugo por el método prensa hidráulica**

Información de la muestra				Prensa Hidráulica					
Día	Fecha	Hora	Muestra	Polarimetría			HPLC		
				Brix	Pol	Pureza	Sacarosa	Pureza	Peso torta seca
Lunes	15/04/2013	06:15	1.1	B <sub>1,1</sub>	P <sub>1,1</sub>	PZ <sub>1,1</sub>	S <sub>HPLC1,1</sub>	PZ <sub>HPLC1,1</sub>	Ts <sub>1,1</sub>
		09:00	2.1	B <sub>2,1</sub>	P <sub>2,1</sub>	PZ <sub>2,1</sub>	S <sub>HPLC2,1</sub>	PZ <sub>HPLC2,1</sub>	Ts <sub>2,1</sub>
		13:30	3.1	B <sub>3,1</sub>	P <sub>3,1</sub>	PZ <sub>3,1</sub>	S <sub>HPLC3,1</sub>	PZ <sub>HPLC3,1</sub>	Ts <sub>3,1</sub>
		15:30	4.1	B <sub>4,1</sub>	P <sub>4,1</sub>	PZ <sub>4,1</sub>	S <sub>HPLC4,1</sub>	PZ <sub>HPLC4,1</sub>	Tsz <sub>4,1</sub>

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Datos para cálculo de la humedad en caña

Información de la muestra				Humedad				
Día	Fecha	Hora	Muestra	Peso masa inicial muestra	Peso crisol (g)	Hora entrada Horno 105 °C	Hora salida Horno 105 °C	Peso final (Crisol + torta base seca)
Lunes	15/04/2013	06:15	1,1	Mi <sub>1,1</sub>	Pc <sub>1,1</sub>	He <sub>1,1</sub>	Hs <sub>1,1</sub>	Pf <sub>1,1</sub>
		7:00	1,2	Mi <sub>1,2</sub>	Pc <sub>1,2</sub>	He <sub>1,2</sub>	Hs <sub>1,2</sub>	Pf <sub>1,2</sub>
		09:00	2,1	Mi <sub>2,1</sub>	Pc <sub>2,1</sub>	He <sub>2,1</sub>	Hs <sub>2,1</sub>	Pf <sub>2,1</sub>
		9:45	2,2	Mi <sub>2,2</sub>	Pc <sub>2,2</sub>	He <sub>2,2</sub>	Hs <sub>2,2</sub>	Pf <sub>2,2</sub>
		13:30	3,1	Mi <sub>3,1</sub>	Pc <sub>3,1</sub>	He <sub>3,1</sub>	Hs <sub>3,1</sub>	Pf <sub>3,1</sub>
		14:15	3,2	Mi <sub>3,2</sub>	Pc <sub>3,2</sub>	He <sub>3,2</sub>	Hs <sub>3,2</sub>	Pf <sub>3,2</sub>
		15:30	4,1	Mi <sub>4,1</sub>	Pc <sub>4,1</sub>	He <sub>4,1</sub>	Hs <sub>4,1</sub>	Pf <sub>4,1</sub>
		16:15	4,2	Mi <sub>4,2</sub>	Pc <sub>4,2</sub>	He <sub>4,2</sub>	Hs <sub>4,2</sub>	Pf <sub>4,2</sub>

Fuente: elaboración propia.

### **3.6.1. Procesamiento de la información por desintegración vía húmeda**

A continuación se detalla cómo se obtienen los resultados para el método de desintegración por vía húmeda.

#### **3.6.1.1. Porcentaje de fibra en caña**

Calcular el porcentaje de fibra en caña usando la fórmula

$$\% \text{ fibra en caña} = \frac{(100 - M - 3b)}{(1 - 0,0125b)}$$

Donde:

M: porcentaje de humedad de la caña

b: Brix del extracto

Ejemplo:

M = 70,10

b = 6,13

$$\% \text{ fibra en caña} = \frac{(100 - 70,10 - (3 \times 6,13))}{(1 - (0,0125 \times 6,13))} = 12,47$$

#### **3.6.1.2. Porcentaje de sólidos en caña**

Calcular el porcentaje de sólidos en caña usando la fórmula:

$$\% \text{ sólidos en caña} = \frac{b}{100} \left[ 100 \times \frac{c + w}{c} - 1,25F \right]$$

Donde:

b: brix del extracto

c: peso de muestra de caña (g) tomada en el digestor

w: peso de agua (g) tomada en el digestor

F: porcentaje de fibra en caña

Como c es siempre 500 gramos y w es siempre 1000 gramos, la fórmula se reduce a:

$$\% \text{ sólidos en caña} = b[3 - 0,0125F]$$

Ejemplo:

$$b = 6,13$$

$$F = 12,47$$

$$\% \text{ sólidos en caña} = 6,13[3 - 0,0125 \times 12,47] = 17,43$$

### **3.6.1.3. Sacarosa en caña**

Calcular el porcentaje de sacarosa en caña de manera análoga al % de sólidos en caña:

s: porcentaje sacarosa del extracto

F: porcentaje fibra en caña

Ejemplo:

$$s = 5,23$$

$$F = 12,47$$

$$\% \text{ sacarosa en caña} = 5,23[3 - 0,0125 \times 12,47] = 14,87$$

#### 3.6.1.4. Pureza del jugo de la caña

La pureza del jugo de la caña es igual a la pureza del extracto.

$$\text{Pureza del jugo de la caña} = \frac{\% \text{ sac. del extracto}}{\text{Brix del extracto}} \times 100$$

Ejemplo:

$$\text{Pureza del jugo de la caña} = \frac{5,23}{6,13} \times 100 = 85,32$$

### **3.6.2. Procesamiento de la información por prensa hidráulica**

A continuación se detalla cómo se obtienen los resultados para el método de prensa hidráulica.

#### **3.6.2.1. Porcentaje de jugo absoluto en caña**

$$\% \text{ jugo absoluto en caña} = \frac{\% \text{ Humedad}}{1 - \frac{\text{Brix}}{100}}$$

#### **3.6.2.2. Porcentaje de fibra en caña**

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

#### **3.6.2.3. Porcentaje sólidos en caña**

$$\% \text{ sólidos en caña} = \frac{\% \text{ jugo absoluto en caña} \times \text{Brix del jugo extraído}}{100}$$

#### **3.6.2.4. Porcentaje sacarosa en caña**

$$\% \text{ sacarosa en caña} = \frac{\% \text{ jugo absoluto en caña} \times \% \text{ sacarosa del jugo extraído}}{100}$$

### 3.6.3. Procesamiento de la información para humedad de la caña

$$\% \text{ humedad de la caña} = \frac{(M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1)} \times 100$$

Ejemplo:

Canasta vacía $M_1$	=	350,2 g
Canasta más la caña, $M_2$	=	450,2 g
Canasta más la caña seca, $M_3$	=	380,1 g

$$\% \text{ humedad de la caña} = \frac{(450,2 - 380,1)}{(450,2 - 350,2)} \times 100 = 70,10$$

### 3.6.4. Procesamiento de la información para determinar el modelo matemático

Calcular Factor C:

$$C = \frac{Sc_{Des}}{Sc_{PH}} \times 100$$

Donde:

$Sc_{Des}$  = Sacarosa en caña obtenida por el método de desintegración húmeda

$Sc_{PH}$  = Sacarosa en caña obtenida por el método de prensa hidráulica.

Aplicar el método de regresión y correlación de Pearson para analizar la relación del factor C con el porcentaje de fibra de caña, obtenida por el método de prensa hidráulica.

Esta relación debe ajustarse a un modelo de regresión lineal de la siguiente forma:

$$C = a - b F$$

Donde:

a = Intercepto

b = Pendiente

F = porcentaje de fibra en caña

Al determinar la relación de estas dos variables, se tendrá el modelo matemático para el cálculo de sacarosa en caña a partir de valores de prensa hidráulica.

$$S_c = S_j \times (1 - 0,01 \times F) \times C$$

### 3.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó en base al error típico, histogramas de frecuencia, gráficos de distribución normal y un análisis de correlación.

Tabla X. **Error típico para la relación de la sacarosa en caña HPLC a partir de la sacarosa en caña polarimetría**

Método	Correlación	Error típico
Prensa Hidráulica	0,9978	0,08 %
Desintegración Vía Húmeda	0,9974	0,09 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Error típico para la relación del factor C HPLC a partir del factor C polarimétrico**

Correlación	Error típico
0,9865	0,0008 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Error típico para la relación del factor C a partir de la fibra en caña**

Método	Correlación	Error típico
Polarimétrico	0,7101	0,04 %
HPLC	0,7370	0,03 %

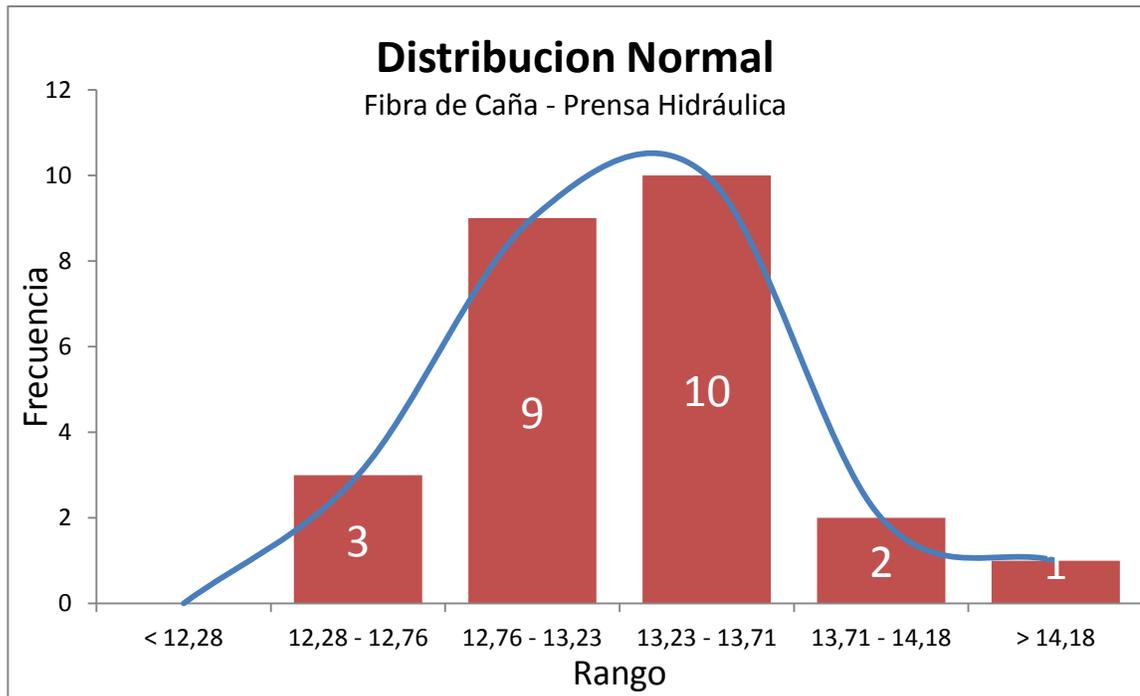
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Error típico para los modelos matemáticos propuestos**

	Método polarimétrico	Método HPLC
Factor C	$C = 2,426 - 0,115F$	$C = 2,438 - 0,117F$
$R^2$	0,71	0,74
Error típico	0,032 %	0,034 %

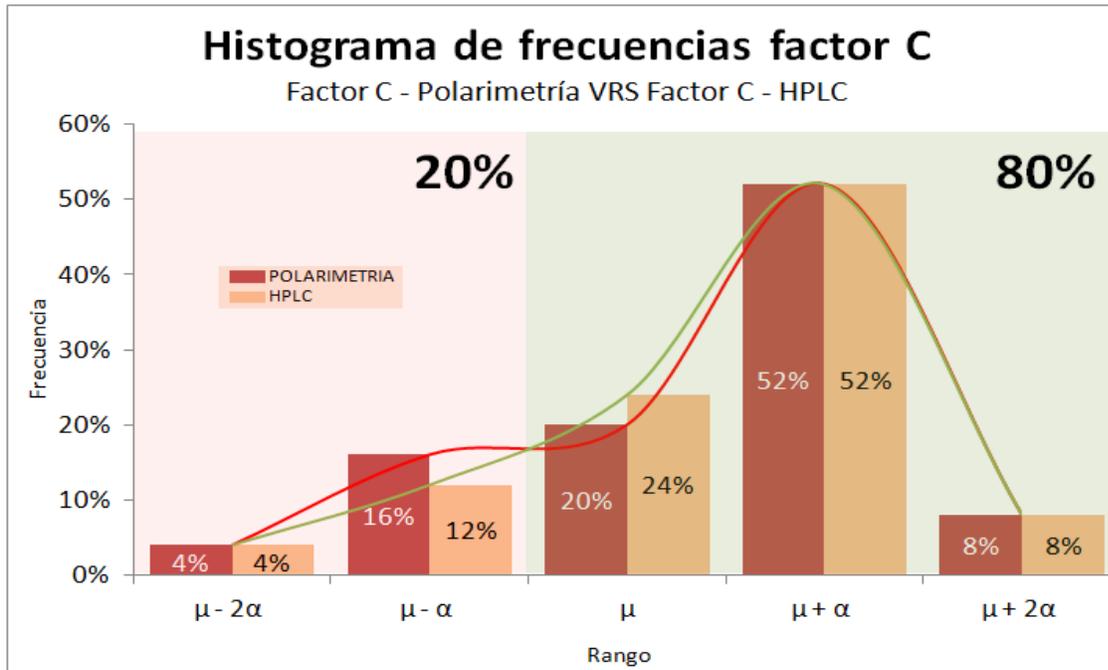
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Gráfico de distribución normal de la fibra en caña – prensa hidráulica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Histograma de frecuencias del factor C



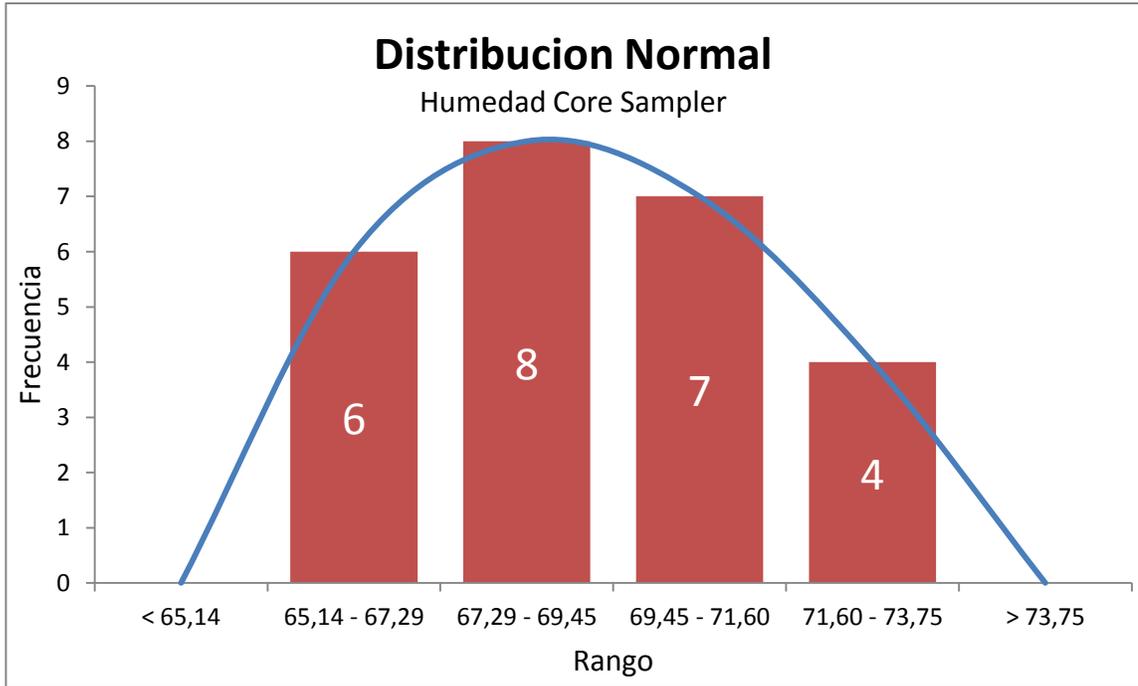
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Análisis de correlación variables respuesta

	Fibra en caña	Jugo Absoluto caña	Brix en caña	Sacarosa en Caña_Pol	Pureza jugo caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Pureza jugo caña_HPLC	SCM1 / SCM2
Fibra en caña	1,0000							
Jugo Absoluto caña	-1,0000	1,0000						
Brix en caña	0,1646	-0,1646	1,0000					
Sacarosa en Caña_Pol	0,0785	-0,0785	0,9611	1,0000				
Pureza jugo Caña_Pol	-0,1519	0,1519	0,4765	0,6992	1,0000			
Sacarosa en Caña_HPLC	0,0768	-0,0768	0,9551	0,9989	0,7110	1,0000		
Pureza jugo caña_HPLC	-0,1505	0,1505	0,4312	0,6598	0,9909	0,6776	1,0000	
SCM1 / SCM2	-0,8427	0,8427	-0,0854	0,0094	0,2298	0,0155	0,2369	1,0000

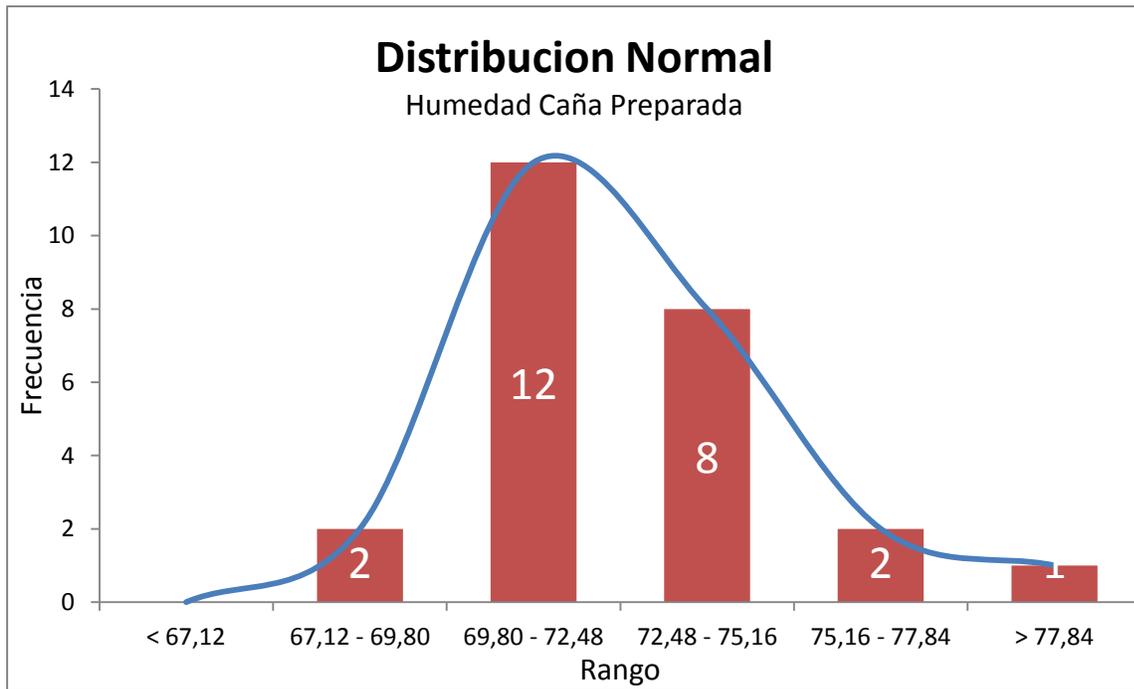
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Gráfico de distribución normal humedad caña – core sampler**



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Gráfico de distribución normal humedad caña – caña preparada**



Fuente: elaboración propia.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Relación de los valores de sacarosa obtenidos por HPLC y por polarimetría (pol aparente)

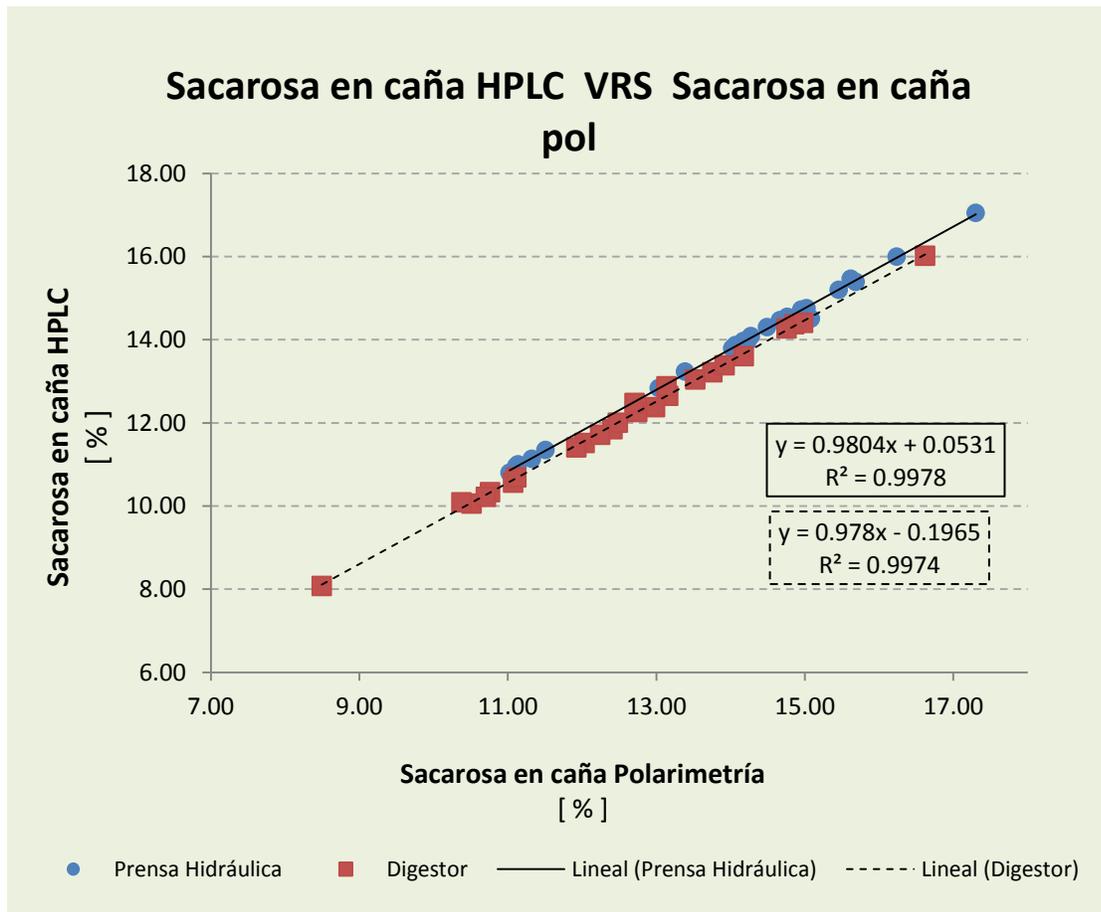
Se calculó para las 25 muestras los valores de sacarosa en caña con los métodos de prensa hidráulica y desintegración vía húmeda. En cada método se realizó el análisis por polarimetría y HPLC. A continuación, se presentan los valores promedio de sacarosa en caña obtenido por ambos métodos, que a su vez se comparan por polarimetría y HPLC.

Tabla XV. **Sacarosa en caña HPLC y sacarosa en caña pol - Valores promedio**

	Desintegración vía húmeda		Prensa Hidráulica	
	Sacarosa en Caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Sacarosa en Caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC
Promedio	12,62	12,14	14,03	13,81
Desviación estándar	1,80	1,76	1,68	1,65

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Sacarosa en caña HPLC en función de sacarosa en caña polarimetría



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Sacarosa en caña HPLC en función de sacarosa en caña polarimetría**

Método	Modelo Matemático	Correlación	Error típico	Intervalo de Validez
Prensa Hidráulica	$y = 0,9804x - 0,0531$	0,9978	0,08 %	[ 11,02 % , 17,30 % ]
Desintegración Vía Húmeda	$y = 0,9780x - 0,1965$	0,9974	0,09 %	[ 8,49 % , 16,62 % ]

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Cálculo del factor C

Para cada uno de los 25 datos se calculó un factor C, el cual es la relación entre la sacarosa en caña obtenida por el método de desintegración húmeda y la sacarosa en caña obtenida por el método de prensa hidráulica. En la tabla XVII se muestra el promedio de los factores C obtenidos para el total de muestras analizadas por polarimetría y HPLC.

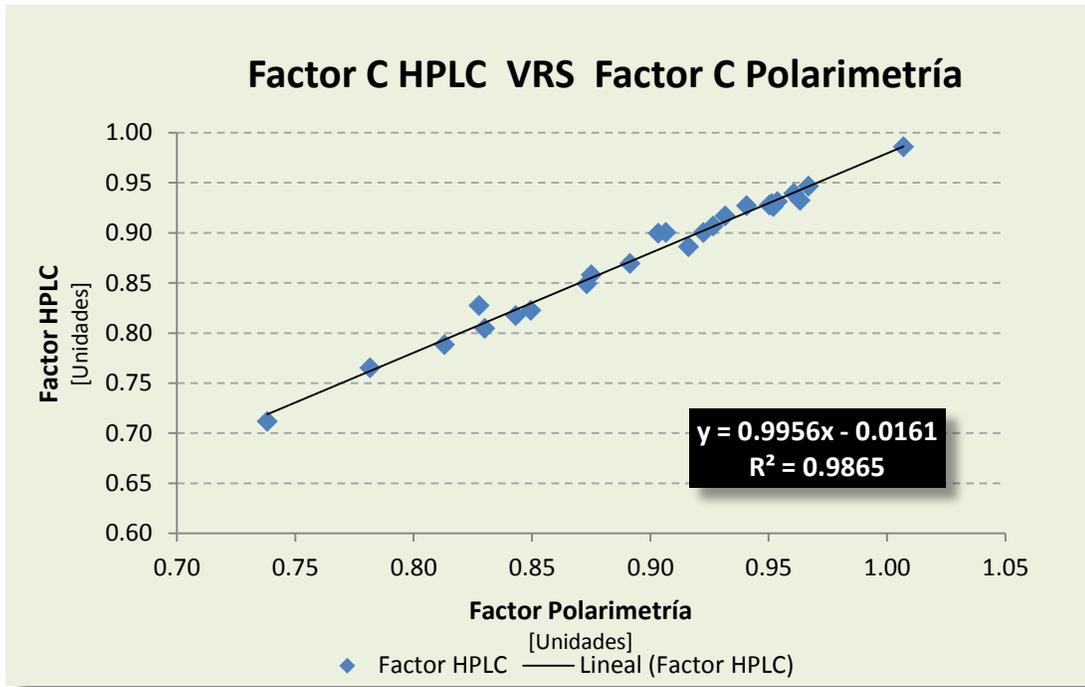
Tabla XVII. **Factor C obtenido por los métodos de polarimetría y HPLC - Valores promedio**

Parámetro	Factor C Polarimétrico	Factor C HPLC
Promedio	0,90	0,88
Desviación estándar	0,07	0,07

Fuente: elaboración propia.

En la figura 10, se muestra la correlación lineal entre los factores C polarimétricos y los factores C HPLC obtenidos para las 25 muestras analizadas.

Figura 10. Relación del factor C HPLC respecto al factor C polarimetría



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Relación del factor C HPLC respecto al factor C polarimetría

Método	Modelo Matemático	Correlación	Error típico	Intervalo de Validez
Polarimetría	$y = 0,9956x - 0,0161$	0,9865	0,008 %	[ 0,74 , 1,01 ]

Fuente: elaboración propia.

### 4.3. Correlación entre el porcentaje de fibra en caña y el factor C

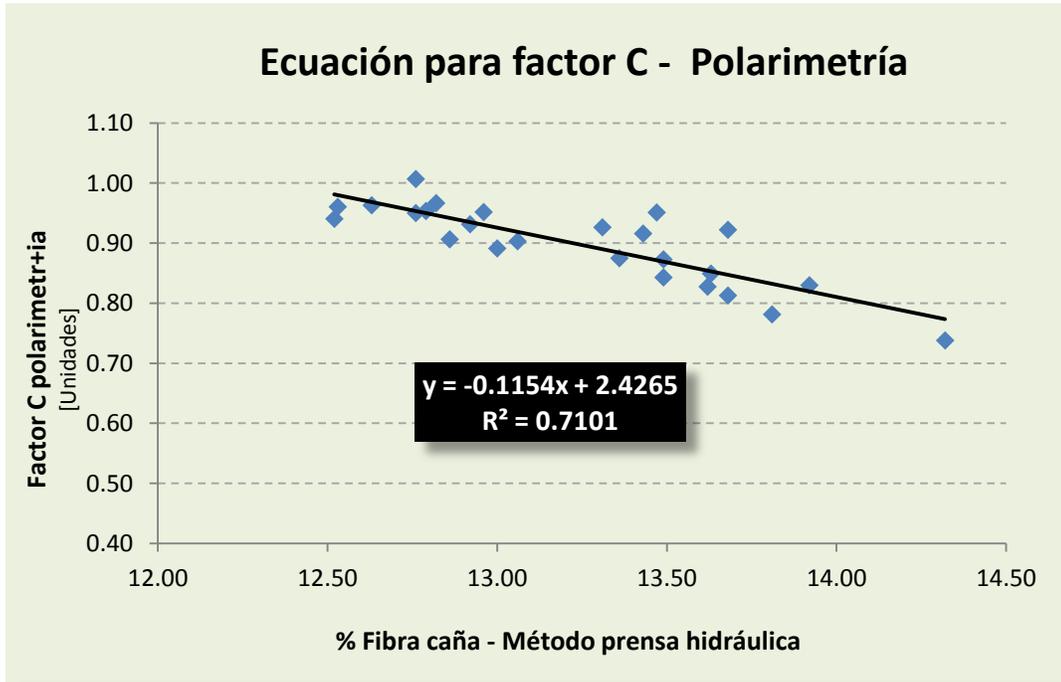
La ecuación a determinar es una relación entre el porcentaje de fibra en caña y el factor C calculado para cada muestras. En la tabla XIX se muestran los valores promedios obtenidos para los 25 datos analizados. En la figura 11 se observa que el conjunto de datos tiene una relación lineal.

Tabla XIX. **Porcentaje de fibra en caña y el factores C – valores promedio**

Parámetro	Fibra en caña	Factor C Polarimétrico	Factor C HPLC
Promedio	13,23	0,90	0,88
Desviación estándar	0,48	0,07	0,07

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Factor C en función del porcentaje fibra en caña - polarimetría**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Factor C en función del porcentaje fibra en caña –polarimetría**

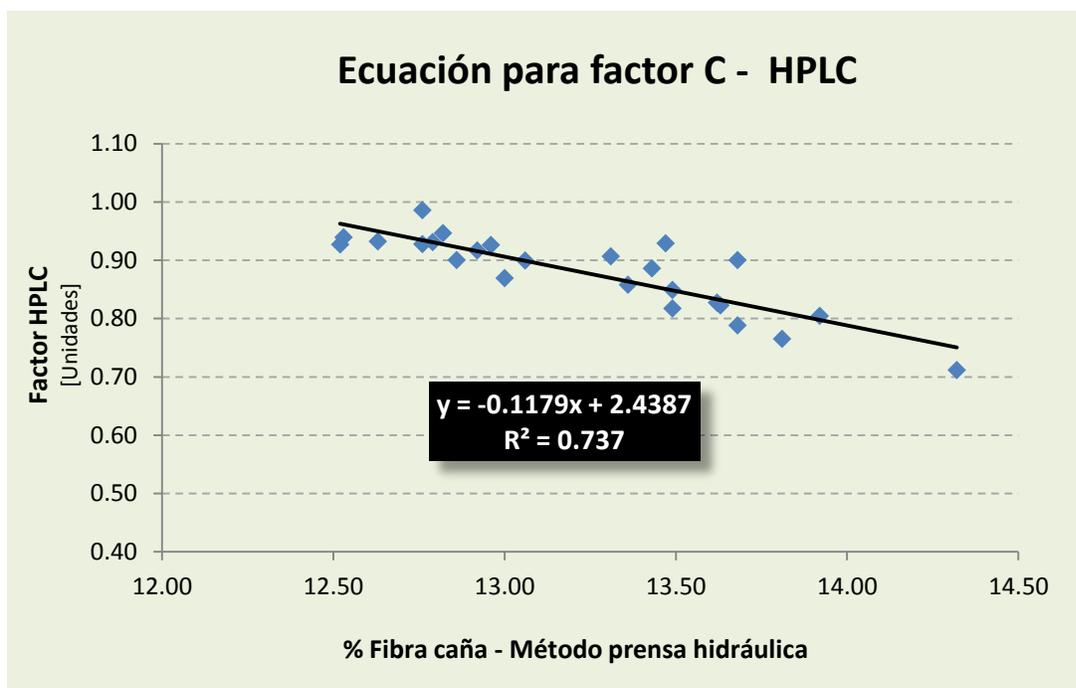
Método	Modelo Matemático	Correlación	Error típico	Intervalo de Validez
Polarimetría	$y = 2,4265 - 0,1154x$	0,710	0,04	[ 12,52 , 14,32 ]

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- y = Factor C
- x = Porcentaje fibra caña

Figura 12. **Factor C en función del porcentaje fibra en caña - HPLC**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Factor C en función del porcentaje fibra en caña –HPLC**

Método	Modelo Matemático	Correlación	Error típico	Intervalo de Validez
Polarimetría	$y = 2,4387 - 0,1179x$	0,737	0,03	[ 12,52 , 14,32 ]

Fuente: elaboración propia.

Donde:

y = Factor C  
x = Porcentaje fibra caña

#### 4.4. Modelo matemático propuesto

El valor de correlación  $R^2$  es aceptable para la relación lineal del factor C y el porcentaje de fibra caña, por lo tanto se propone un modelo matemático lineal para calcular el factor C en función del porcentaje fibra caña.

Tabla XXII. **Modelo matemático para el factor C en función del porcentaje fibra caña**

	Método polarimétrico	Método HPLC
Factor C	$C = 2,426 - 0,115F$	$C = 2,438 - 0,117F$
$R^2$	0,71	0,74

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- C = Factor C
- F = Porcentaje fibra caña
- $R^2$  = Coeficiente de correlación

Tabla XXIII. **Modelo matemático para la sacarosa en caña**

Sacarosa Caña $Sc = Sj(1 - 0.0.1F) C$	
Método polarimétrico	$Sc = Sj(1 - 0,0,1F)(2,438 - 0,117F)$
Método HPLC	$Sc = Sj(1 - 0,0,1F)(2,426 - 0,115F)$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- C = Factor C
- F = Porcentaje fibra caña
- Sc = Sacarosa en caña
- Sj = Sacarosa en jugo
- R<sup>2</sup> = Coeficiente de correlación

#### 4.5. Humedad en caña

Se calculó la humedad en caña en dos puntos de muestreo, *core sampler* báscula y conductor caña preparada. En la tabla XXIV se indica el valor promedio obtenido para cada punto, y la diferencia entre ambos como referencia del aporte de agua de lavado en las mesas del patio de caña.

Tabla XXIV. **Humedad en caña en *core sampler* y en caña preparada**

	Humedad en <i>Core Sampler</i> [ % ]	Humedad Caña preparada [ % ]	Diferencia [ % ]
Promedio	69,45	72,48	3,03
Desviación estándar	2,15	2,68	---

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El laboratorio de control de calidad es responsable de generar información confiable para estimar cuánta azúcar puede recuperarse, cuánta azúcar se pierde y medir el efecto de los cambios hechos para la mejora de los procesos. Para cumplir con esto, es importante disponer de un sistema que permita estimar con buena precisión la sacarosa porcentaje caña basado en el análisis directo de la caña (DAC). Las metodologías de análisis directo DAC aplicadas en este trabajo son métodos oficialmente reconocidos y avalados por los organismos internacionales TECNICAÑA e ICUMSA, respectivamente:

- Análisis directo de caña (DAC) vía seca, también conocido como método de prensa hidráulica
- Análisis directo de caña (DAC) vía húmeda, que también se conoce como método de desintegración por vía húmeda

Aunque el análisis directo de desintegración húmeda genera datos más exactos, su aplicación conlleva un aumento de costos y recursos; por lo tanto, los ingenios azucareros han optado por el método de prensa hidráulica para la generación de datos de análisis de caña.

A través de este trabajo, se propone determinar un modelo matemático que permita el cálculo de sacarosa en caña basada en la relación de los valores obtenidos por prensa hidráulica y desintegración húmeda. Este modelo permitirá continuar utilizando el método prensa hidráulica para no elevar los costos del ingenio y no afectar la representatividad de la muestra. Es decir, que

el laboratorio de caña generará datos con mayor exactitud sin aumentar los costos y recursos utilizados actualmente.

Se analizaron 25 muestras de caña en báscula, tomadas con un *core sampler* horizontal. Esta muestra fue preparada para ser analizada por los dos métodos en estudio. La investigación se realizó en las últimas semanas de zafra, cuando se empiezan a presentar lluvias aisladas. Las lluvias provocan que la caña en báscula ingrese con mayor materia vegetal y mineral, lo que pudo aumentar aún más la heterogeneidad de las últimas muestras tomadas.

Se inició con el análisis de la relación de los valores de sacarosa obtenidos por HPLC y por polarimetría (pol aparente). La relación de la sacarosa en caña HPLC y sacarosa en caña polarimetría presentó un comportamiento lineal para ambos métodos. La correlación para el método de prensa hidráulica fue de 0,9978, con un error típico de 0,08 %. La correlación para el método de desintegración vía húmeda fue de 0,9974, con un error típico de 0,09 %. Ambas correlaciones, indican que para la caña en báscula se podría trabajar un factor de corrección para los datos generados por el método de prensa hidráulica, que al ser aplicado, indicaría el valor real de sacarosa presente en la caña que ingresa al ingenio. Con el HPLC correctamente calibrado, se podrían realizar verificaciones del método de polarimetría y se lograrían reducir costos de operación del laboratorio.

Para futuros estudios, es válido aplicar el método de polarimetría, siempre y cuando se reduzca al mínimo el error humano (esto implica asignar un único analista para dichos estudios) y se mantengan constantes las condiciones ambientales del laboratorio, metodología y equipos.

Para cada muestra se obtuvo un valor de C, ya que este parámetro no es constante. El valor promedio del factor C HPLC fue de 0,88, y el valor promedio del factor C polarimétrico fue de 0,90, en ambos casos la desviación estándar fue de 0,07. Para el factor C se realizó el análisis de la relación entre los resultados obtenidos por HPLC y polarimetría, y como era de esperarse, esta relación se mantuvo lineal con una correlación alta de 0,9865, y un error típico de 0,008 %. Por lo tanto, el cálculo del factor C es confiable. Este factor se obtuvo con la división de la sacarosa en caña obtenida por el método de desintegración vía húmeda, y la sacarosa en caña obtenida por el método de prensa hidráulica.

Para determinar el modelo matemático, se analizó la relación del factor C con el porcentaje de fibra de caña para cada muestra. Para este análisis se aplicó el método de regresión y correlación de Pearson. Las dos variables se relacionan de forma lineal. Se obtuvo un valor promedio para la fibra en caña de 13,23 %, con una desviación estándar de 0,48 %.

Además, a través de un análisis de correlación de variables respuesta, se logró comprobar que C depende del contenido de fibra presente en la caña. El contenido de fibra en caña es la única variable que presentó relación con el factor C. Estas dos variables presentan una relación inversamente proporcional, esto se detalla en la tabla XIV: "Análisis de correlación de variables respuesta". Es decir, que si la cantidad de fibra aumenta, el factor C disminuye; lo que significa que el C se aleja del valor uno y por lo tanto, aumenta la diferencia entre el valor de sacarosa obtenido por prensa hidráulica y la sacarosa obtenida por desintegración húmeda. El valor de sacarosa obtenida por desintegración húmeda es menor al valor obtenido por el método de prensa hidráulica, por lo que el factor C no debería ser mayor a uno. A

mayor porcentaje de fibra contenida en caña, el valor de sacarosa obtenido por prensa hidráulica se aleja más del valor exacto.

La correlación obtenida es aceptable. Se obtuvo para el método polarimétrico una correlación de 0,71, con un error típico de 0,04 %; y para el método por HPLC se obtuvo una correlación de 0,737, con un error típico de 0,03 %. Como era de esperarse, la correlación con HPLC es mayor y el error típico disminuyó en un 0,01 % respecto al método polarimétrico.

Si se toma en cuenta que la caña es un material altamente heterogéneo el valor de las correlaciones obtenidas para el modelo matemático son aceptables. La composición de la caña puede variar debido a diversos factores. Para este caso, se tomó caña de variedades diferentes, de diferentes regiones y como se mencionó anteriormente, las lluvias también tuvieron un efecto en la heterogeneidad de las muestras. Estas son las variables que se presentan diariamente en las operaciones de un laboratorio azucarero.

Al finalizar el estudio se determinaron dos modelos matemáticos para el cálculo del factor C, los cuales se sustituyeron en el modelo para el cálculo de sacarosa en caña. A partir de este modelo con los resultados obtenidos por el método de prensa hidráulica, se puede calcular un valor más exacto del contenido de sacarosa presente en la caña que realmente ingresa al ingenio. El cual, será siempre menor de lo que el método de prensa hidráulica estima.

En el análisis estadístico que se detalla en la XIII se calculó el error típico para los modelos matemáticos propuestos<sup>1</sup>). Para el método polarimétrico se obtuvo un error de 0,032 %, y para el método HPLC se obtuvo un error de 0,0034 %. Este error es la diferencia entre el valor teórico calculado por el modelo matemático y el valor obtenido experimentalmente en la investigación.

Es decir, que se aplicó el modelo matemático obtenido a cada una de las muestras, y el porcentaje de error fue aceptable, menor a 0,04 % para ambos casos.

Los valores de porcentaje de fibra en caña para ambos métodos, prensa hidráulica y desintegración húmeda, se comportan como una distribución normal. El 80 % de los valores del factor C caen dentro de una curva de distribución normal.

Para el caso de la humedad, los resultados en ambos puntos de muestreo, *core sampler* báscula y conductor caña preparada, caen dentro de una curva de distribución normal. Se obtuvo una diferencia de 3,03 %. Esto debido a la humedad que aporta el lavado de agua de caña. Para este caso, en el que se utilizaron muestras de 500 gramos, esa diferencia representa aproximadamente 15,15 gramos. Esto indica que la cantidad de caña preparada es menor que la cantidad de caña en báscula debido al peso aportado por el agua de lavado. Esta cantidad de agua si es representativa para ser tomada en cuenta para futuros estudios de análisis directo de caña preparada, a partir de los cuales se puede calcular con mayor exactitud las pérdidas en patio de caña. Es decir, que el factor de dilución aumenta para el método de desintegración vía húmeda, y por lo tanto hay que validar si los métodos aplicados para determinar pol, y azúcares reductores son confiables con diluciones mayores.

Para obtener estos resultados se tomaron muestras de caña preparada que provenía de las mismas jaulas muestreadas en *core sampler* báscula.



## CONCLUSIONES

1. Al comparar los resultados de pol por polarimetría y sacarosa por HPLC, se determinó que estos presentan una relación lineal con altos valores de correlación, por lo que puede validarse el uso del método de polarimetría y determinar un modelo que prediga el valor real de sacarosa contenido en caña *core sampler* que se obtendría por medio del HPLC.
2. Existe una correlación entre los resultados de los métodos prensa hidráulica y desintegración húmeda que permite determinar un factor para obtener un resultado de sacarosa en caña más exacto utilizando el método prensa hidráulica.
3. La relación entre el porcentaje de sacarosa en caña obtenido por el método prensa hidráulica y el porcentaje de sacarosa en caña obtenido por el método de desintegración húmeda (Factor C), es menor a uno. Esto implica que el valor de sacarosa real contenido en caña es menor a lo que el método de prensa hidráulica determina. El método de prensa hidráulica por si solo, sobre estima la cantidad de sacarosa que ingresa al ingenio.
4. El porcentaje de fibra en caña y el factor C, tienen una relación lineal inversamente proporcional. Es decir que a medida que el porcentaje de fibra en caña aumenta, los valores del factor C disminuyen, y aumenta la diferencia entre el valor de sacarosa obtenido por prensa hidráulica y el valor de sacarosa obtenido por desintegración húmeda.



## RECOMENDACIONES

1. Cada ingenio debe determinar su propio modelo matemático para el cálculo de sacarosa en caña, pues el factor C calculado para este trabajo se ajusta a las condiciones propias del tercer tercio de zafra del ingenio azucarero donde se realizó el estudio.
2. La caña es un material muy heterogéneo, por lo que sería de gran aporte que al determinar un modelo matemático para el cálculo de sacarosa en caña, se tome en cuenta la variedad, el tipo de corte y se tome muestras de los tres tercios de zafra.
3. Los ingenios deben adoptar un método estándar para la determinación de fibra en caña, el cual podría ser el método Tanimoto.
4. Determinar el factor C para la caña preparada que tome en cuenta la dilución de la sacarosa por el agua de lavado, y poder determinar las pérdidas en patio de caña con mayor exactitud.
5. Al tener datos más exactos de pérdidas en patio, se podría determinar qué efecto tiene el agua de lavado en estas pérdidas, ya que se observó un leve aumento en la humedad de la caña, contrario a lo que se esperaba. Es probable que con valores más exactos no se justifique cambiar el sistema de lavado de caña por un sistema de limpieza en seco.

6. Utilizar para el cálculo de pol en jugo el método Horne, en vista que éste no implica una dilución extra que podría generar más error.

## BIBLIOGRAFÍA

1. FERNANDES, Antonio Carlos. *Cálculos na agroindustria da cana-de-açúcar*. 3a ed. Brasil: Sociedad de técnicos azucareros y alcoholeros de Brasil, 2011. 416 p.
2. LARRAHONDO, Jesús E.; GARCÍA E., Oscar. *Análisis directo y determinación del azúcar recuperable de la caña de azúcar*. Colombia: CENICAÑA, 1997. 5 p.
3. \_\_\_\_\_. *Calidad de la caña de azúcar*. Colombia: CENICAÑA, 1995. 354 p.
4. MELGAR, Mario; et al. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. Guatemala: CENGICAÑA, 2012. 512 p.
5. QUEME PEÑA, Mayra Maritza. *Evaluación de un método alternativo a nivel laboratorio para el análisis del jugo de la caña de azúcar desfibrada mediante el método de desintegración húmeda mediante el método de desintegración húmeda utilizando el equipo "Digestor de caña modelo TE-0501" en un ingenio azucarero de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad San Carlos de Guatemala, 2012. 125 p.
6. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012. 888 p.



## APÉNDICE

### Datos calculados

Tabla A1. **Humedad de la caña en Core Sampler**

ID	Humedad <i>Core Sampler</i>
1	69,00
2	66,89
3	68,09
4	68,19
5	67,29
6	67,09
7	69,00
8	71,20
9	69,60
10	72,31
11	71,30
12	67,99
13	67,29
14	73,51
15	66,59
16	65,99

Continuación de la tabla A1

ID	Humedad <i>Core sampler</i>
17	69,80
18	69,00
19	70,40
20	71,50
21	70,80
22	73,51
23	69,00
24	68,59
25	72,21

Fuente: elaboración propia

Tabla A2. **Humedad de la caña en *Core sampler* - Promedio**

Parámetro	Humedad <i>Core sampler</i>
Promedio	69,45
Desviación estándar	2,15

Fuente: elaboración propia

Tabla A3. **Datos calculados para el método desintegrador vía húmeda**

Método: Desintegrador vía húmeda						
ID	Fibra en caña	Brix en caña	Sacarosa en Caña_Pol	Pureza jugo caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Pureza jugo caña_HPLC
1	13,60	17,40	14,86	85,37	14,38	82,60
2	15,42	17,69	13,76	77,78	13,22	74,76
3	13,10	18,80	16,62	88,39	16,02	85,22
4	14,74	17,06	14,75	86,47	14,28	83,66
5	16,38	16,32	13,92	85,27	13,39	82,02
6	15,51	17,40	13,53	77,74	13,05	75,00
7	15,51	15,49	13,16	84,96	12,66	81,70
8	15,14	13,66	10,51	76,95	10,06	73,66
9	12,24	18,16	14,18	78,06	13,61	74,92
10	14,05	13,64	10,76	78,88	10,34	75,78
11	14,04	14,66	10,70	73,03	10,22	69,75
12	19,38	12,63	8,49	67,25	8,08	63,97
13	16,38	16,32	12,41	76,03	11,85	72,60
14	11,31	15,18	12,03	79,28	11,52	75,89
15	16,60	16,81	12,48	74,25	12,01	71,43

Continuación de la tabla A3

Método: Desintegrador vía húmeda						
ID	Fibra en caña	Brix en caña	Sacarosa en Caña_Pol	Pureza jugo caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Pureza jugo caña_HPLC
16	17,88	16,13	12,24	75,90	11,72	72,63
17	15,20	15,01	11,07	73,78	10,57	70,41
18	13,08	17,93	14,98	83,54	14,41	80,38
19	13,43	16,17	11,92	73,73	11,41	70,58
20	11,22	17,27	12,98	75,17	12,38	71,69
21	14,45	14,75	12,74	86,42	12,26	83,17
22	13,83	12,67	10,38	81,92	10,09	79,69
23	16,09	14,92	12,71	85,18	12,48	83,68
24	15,43	15,97	13,14	82,25	12,88	80,67
25	14,31	13,48	11,12	82,43	10,69	79,29

Fuente: elaboración propia

**Tabla A4. Datos calculados para el método desintegrador vía húmeda – Promedio**

Método: Desintegrador vía húmeda						
Parámetro	Fibra en caña	Brix en caña	Sacarosa en Caña_Pol	Pureza jugo caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Pureza jugo caña_HPLC
Promedio	14,73	15,82	12,62	79,60	12,14	76,61
Desviación estándar	1,89	1,73	1,80	5,35	1,76	5,55

Fuente: elaboración propia

Tabla A5. **Datos calculados para el método prensa hidráulica**

Método: Prensa Hidráulica							
ID	Fibra en caña	Jugo Absoluto caña	Brix en caña	Sacarosa en Caña_Pol	Pureza jugo caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Pureza jugo caña_HPLC
1	13,47	86,53	18,10	15,62	86,28	15,47	85,47
2	12,82	87,18	16,34	14,23	87,09	13,97	85,49
3	12,53	87,47	19,10	17,30	90,57	17,06	89,29
4	12,52	87,48	18,02	15,69	87,04	15,40	85,44
5	13,31	86,69	17,44	15,02	86,13	14,76	84,64
6	13,36	86,64	17,90	15,46	86,35	15,21	84,95
7	13,00	87,00	17,23	14,76	85,66	14,56	84,45
8	12,79	87,21	13,79	11,02	79,95	10,81	78,37
9	12,76	87,24	16,58	14,08	84,95	13,80	83,26
10	12,76	87,24	13,78	11,32	82,15	11,14	80,82
11	12,63	87,37	13,84	11,11	80,30	10,96	79,23
12	14,32	85,68	14,15	11,51	81,30	11,35	80,21
13	13,92	86,08	17,41	14,95	85,91	14,73	84,62
14	13,49	86,51	16,39	14,27	87,07	14,09	85,96
15	13,62	86,38	18,36	15,08	82,13	14,51	79,02

Continuación de la tabla A5

Método: Prensa Hidráulica							
ID	Fibra en caña	Jugo Absoluto caña	Brix en caña	Sacarosa en Caña_Pol	Pureza jugo caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Pureza jugo caña_HPLC
16	13,49	86,51	16,00	14,02	87,67	13,80	86,26
17	13,63	86,37	15,66	13,03	83,23	12,84	82,02
18	13,68	86,32	18,01	16,24	90,17	16,00	88,88
19	13,68	86,32	18,15	14,67	80,79	14,48	79,74
20	13,43	86,57	17,67	14,17	80,21	13,97	79,08
21	12,96	87,04	15,21	13,39	88,04	13,24	87,06
22	12,92	87,08	13,52	11,14	82,36	11,01	81,39
23	13,06	86,94	16,01	14,07	87,84	13,88	86,64
24	12,86	87,14	16,71	14,49	86,70	14,31	85,61
25	13,81	86,19	16,88	14,22	84,27	13,97	82,79

Fuente: elaboración propia

**Tabla A6. Datos calculados para el método prensa hidráulica - Promedio**

Método: Prensa Hidráulica							
Parámetro	Fibra en caña	Jugo Absoluto caña	Brix en caña	Sacarosa en Caña_Pol	Pureza jugo Caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Pureza jugo caña_HPLC
Promedio	13.23	86.77	66.49	14.03	84.97	13.81	83.63
Desviación estándar	0.48	0.48	1.65	1.68	3.11	1.65	3.18

Fuente: elaboración propia

Tabla A8. **Sacarosa en caña HPLC y sacarosa en caña pol**

ID	Desintegración vía húmeda		Prensa Hidráulica	
	Sacarosa en Caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Sacarosa en Caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC
1	14,86	14,38	15,62	15,47
2	13,76	13,22	14,23	13,97
3	16,62	16,02	17,30	17,06
4	14,75	14,28	15,69	15,40
5	13,92	13,39	15,02	14,76
6	13,53	13,05	15,46	15,21
7	13,16	12,66	14,76	14,56
8	10,51	10,06	11,02	10,81
9	14,18	13,61	14,08	13,80
10	10,76	10,34	11,32	11,14
11	10,70	10,22	11,11	10,96
12	8,49	8,08	11,51	11,35
13	12,41	11,85	14,95	14,73
14	12,03	11,52	14,27	14,09
15	12,48	12,01	15,08	14,51
16	12,24	11,72	14,02	13,80
17	11,07	10,57	13,03	12,84
18	14,98	14,41	16,24	16,00
19	11,92	11,41	14,67	14,48
20	12,98	12,38	14,17	13,97

Continuación de la tabla A8

ID	Desintegración vía húmeda		Prensa Hidráulica	
	Sacarosa en Caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC	Sacarosa en Caña_Pol	Sacarosa en Caña_HPLC
21	12,74	12,26	13,39	13,24
22	10,38	10,09	11,14	11,01
23	12,71	12,48	14,07	13,88
24	13,14	12,88	14,49	14,31
25	11,12	10,69	14,22	13,97

Fuente: elaboración propia. Datos calculados

Tabla A9. **Datos calculados para factores C**

ID	Polarimetría			HPLC		
	SC Desintegración	SC Prensa Hidráulico	Factor C Pol	SC Desintegración	SC Prensa Hidráulica	Factor C HPLC
1	14,86	15,62	0,95	14,38	15,47	0,93
2	13,76	14,23	0,97	13,22	13,97	0,95
3	16,62	17,30	0,96	16,02	17,06	0,94
4	14,75	15,69	0,94	14,28	15,40	0,93
5	13,92	15,02	0,93	13,39	14,76	0,91
6	13,53	15,46	0,88	13,05	15,21	0,86
7	13,16	14,76	0,89	12,66	14,56	0,87
8	10,51	11,02	0,95	10,06	10,81	0,93
9	14,18	14,08	1,01	13,61	13,80	0,99
10	10,76	11,32	0,95	10,34	11,14	0,93
11	10,70	11,11	0,96	10,22	10,96	0,93
12	8,49	11,51	0,74	8,08	11,35	0,71
13	12,41	14,95	0,83	11,85	14,73	0,80
14	12,03	14,27	0,84	11,52	14,09	0,82
15	12,48	15,08	0,83	12,01	14,51	0,83

Continuación de la tabla A9

ID	Polarimetría			HPLC		
	SC Desintegración	SC Prensa Hidráulico	Factor C Pol	SC Desintegración	SC Prensa Hidráulica	Factor C HPLC
16	12,24	14,02	0,87	11,72	13,80	0,85
17	11,07	13,03	0,85	10,57	12,84	0,82
18	14,98	16,24	0,92	14,41	16,00	0,90
19	11,92	14,67	0,81	11,41	14,48	0,79
20	12,98	14,17	0,92	12,38	13,97	0,89
21	12,74	13,39	0,95	12,26	13,24	0,93
22	10,38	11,14	0,93	10,09	11,01	0,92
23	12,71	14,07	0,90	12,48	13,88	0,90
24	13,14	14,49	0,91	12,88	14,31	0,90
25	11,12	14,22	0,78	10,69	13,97	0,77

Fuente: elaboración propia.

**Tabla A10. Datos calculados para factores C - Promedio**

Parámetro	Polarimetría			HPLC		
	SC Desintegración	SC Prensa Hidráulico	Factor C Pol	SC Desintegración	SC Prensa Hidráulica	Factor C HPLC
Promedio	12,62	14,03	0,90	12,14	13,81	0,88
Desviación estándar	1,80	1,68	0,07	1,76	1,65	0,07

Fuente: elaboración propia.

Tabla A11. **Porcentaje fibra en caña y factores C**

ID	Fibra en caña	Factor Polarimétrico	Factor HPLC
1	13,47	0,95	0,93
2	12,82	0,97	0,95
3	12,53	0,96	0,94
4	12,52	0,94	0,93
5	13,31	0,93	0,91
6	13,36	0,88	0,86
7	13,00	0,89	0,87
8	12,79	0,95	0,93
9	12,76	1,01	0,99
10	12,76	0,95	0,93
11	12,63	0,96	0,93
12	14,32	0,74	0,71
13	13,92	0,83	0,80
14	13,49	0,84	0,82
15	13,62	0,83	0,83
16	13,49	0,87	0,85
17	13,63	0,85	0,82
18	13,68	0,92	0,90
19	13,68	0,81	0,79
20	13,43	0,92	0,89

Continuación de la tabla A11

ID	Fibra en caña	Factor Polarimétrico	Factor HPLC
21	12,96	0,95	0,93
22	12,92	0,93	0,92
23	13,06	0,90	0,90
24	12,86	0,91	0,90
25	13,81	0,78	0,77

Fuente: elaboración propia.

Tabla A12. **Humedad en *Core sampler* y caña preparada**

	Humedad en <i>Core sampler</i> [ % ]	Humedad Caña preparada [ % ]
Promedio	69,45	72,48
Desviación estándar	2,15	2,68
Mínimo	65,99	68,40
Máximo	73,51	80,84
Rango	7,52	12,45

Fuente: elaboración propia.

**Datos calculados para análisis estadístico**

**Tabla A13. Datos calculados para error típico del modelo matemático del factor C polarimétrico**

ID	Valores experimentales		Dato calculado $C = 2,426 - 0,115F$	
	Fibra en caña	Factor Polarimétrico	Factor Polarimétrico Calculado	% Error absoluto
1	13,47	0,95	0,88	0,078
2	12,82	0,97	0,95	0,016
3	12,53	0,96	0,99	0,025
4	12,52	0,94	0,99	0,048
5	13,31	0,93	0,90	0,034
6	13,36	0,88	0,89	0,017
7	13,00	0,89	0,93	0,044
8	12,79	0,95	0,96	0,002
9	12,76	1,01	0,96	0,048
10	12,76	0,95	0,96	0,009
11	12,63	0,96	0,97	0,011
12	14,32	0,74	0,78	0,056
13	13,92	0,83	0,83	0,006
14	13,49	0,84	0,87	0,037

Continuación de la tabla A13

ID	Valores experimentales		Dato calculado $C = 2,426 - 0,115F$	
	Fibra en caña	Factor Polarimétrico	Factor Polarimétrico Calculado	% Error absoluto
15	13,62	0,83	0,86	0,039
16	13,49	0,87	0,87	0,002
17	13,63	0,85	0,86	0,011
18	13,68	0,92	0,85	0,075
19	13,68	0,81	0,85	0,049
20	13,43	0,92	0,88	0,038
21	12,96	0,95	0,94	0,017
22	12,92	0,93	0,94	0,009
23	13,06	0,90	0,92	0,023
24	12,86	0,91	0,95	0,045
25	13,81	0,78	0,84	0,072
			<b>Error típico</b>	<b>0,032</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla A14. **Datos calculados para error típico del modelo matemático del factor C HPLC**

ID	Valores experimentales		Dato calculado $C = 2,438 - 0,117F$	
	Fibra en caña	Factor HPLC	Factor HPLC Calculado	% Error absoluto
1	13,47	0,93	0,86	0,072
2	12,82	0,95	0,94	0,009
3	12,53	0,94	0,97	0,035
4	12,52	0,93	0,97	0,050
5	13,31	0,91	0,88	0,029
6	13,36	0,86	0,87	0,019
7	13	0,87	0,92	0,055
8	12,79	0,93	0,94	0,011
9	12,76	0,99	0,95	0,042
10	12,76	0,93	0,95	0,019
11	12,63	0,93	0,96	0,030
12	14,32	0,71	0,76	0,071
13	13,92	0,80	0,81	0,006
14	13,49	0,82	0,86	0,052

Continuación de la tabla A14

ID	Valores experimentales		Dato calculado $C = 2,438 - 0,117F$	
	Fibra en caña	Factor HPLC	Factor HPLC Calculado	% Error absoluto
15	13,62	0,83	0,84	0,021
16	13,49	0,85	0,86	0,012
17	13,63	0,82	0,84	0,025
18	13,68	0,90	0,84	0,070
19	13,68	0,79	0,84	0,062
20	13,43	0,89	0,87	0,022
21	12,96	0,93	0,92	0,005
22	12,92	0,92	0,93	0,010
23	13,06	0,90	0,91	0,011
24	12,86	0,90	0,93	0,037
25	13,81	0,77	0,82	0,074
			<b>Error típico</b>	<b>0,034</b>

Fuente: elaboración propia.

**Tabla A15. Datos calculados para error típico del modelo matemático del para el cálculo del dato polarimétrico de sacarosa en caña**

ID	Valores experimentales			Dato calculado $Sc = Sj (1 - 0,0,1F)(2,438 - 0,117F)$	
	Fibra en caña	Sj Polarimétrico	Sacarosa en Caña_Pol	Sacarosa en caña calculado	% Error absoluto
1	13,47	18,05	14,86	13,70	0,078
2	12,82	16,32	13,76	13,54	0,016
3	12,53	19,78	16,62	17,04	0,025
4	12,52	17,93	14,75	15,47	0,048
5	13,31	17,33	13,92	13,45	0,034
6	13,36	17,84	13,53	13,75	0,017
7	13	16,97	13,16	13,75	0,044
8	12,79	12,64	10,51	10,53	0,002
9	12,76	16,14	14,18	13,50	0,048
10	12,76	12,98	10,76	10,85	0,009
11	12,63	12,72	10,70	10,82	0,011
12	14,32	13,43	8,49	8,97	0,056
13	13,92	17,37	12,41	12,34	0,006
14	13,49	16,50	12,03	12,48	0,037

Continuación de la tabla A15

ID	Valores experimentales			Dato calculado $Sc = Sj (1 - 0,0,1F)(2,438 - 0,117F)$	
	Fibra en caña	Sj Polarimétrico	Sacarosa en Caña_Pol	Sacarosa en caña calculado	% Error absoluto
15	13,62	17,46	12,48	12,97	0,039
16	13,49	16,21	12,24	12,27	0,002
17	13,63	15,09	11,07	11,19	0,011
18	13,68	18,81	14,98	13,85	0,075
19	13,68	16,99	11,92	12,51	0,049
20	13,43	16,37	12,98	12,49	0,038
21	12,96	15,38	12,74	12,52	0,017
22	12,92	12,79	10,38	10,47	0,009
23	13,06	16,18	12,71	13,00	0,023
24	12,86	16,63	13,14	13,72	0,045
25	13,81	16,50	11,12	11,92	0,072
				<b>Error promedio</b>	<b>0,032</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla A16. **Datos calculados para error típico del modelo matemático del para el cálculo del dato HPLC de sacarosa en caña**

ID	Valores experimentales			Dato calculado $S_c = S_j (1 - 0,0,1F) (2,426 - 0,115F)$	
	Fibra en caña	S <sub>j</sub> _HPLC	Sacarosa en Caña_HPLC	Sacarosa en caña calculado	% Error absoluto
1	13,47	17,88	14,38	13,34	0,072
2	12,82	16,02	13,22	13,10	0,009
3	12,53	19,50	16,02	16,58	0,035
4	12,52	17,60	14,28	14,98	0,050
5	13,31	17,03	13,39	13,00	0,029
6	13,36	17,55	13,05	13,30	0,019
7	13	16,73	12,66	13,35	0,055
8	12,79	12,39	10,06	10,17	0,011
9	12,76	15,82	13,61	13,04	0,042
10	12,76	12,77	10,34	10,53	0,019
11	12,63	12,55	10,22	10,53	0,030
12	14,32	13,25	8,08	8,66	0,071
13	13,92	17,11	11,85	11,92	0,006
14	13,49	16,29	11,52	12,11	0,052
15	13,62	16,80	12,01	12,25	0,021

Continuación de la tabla A16

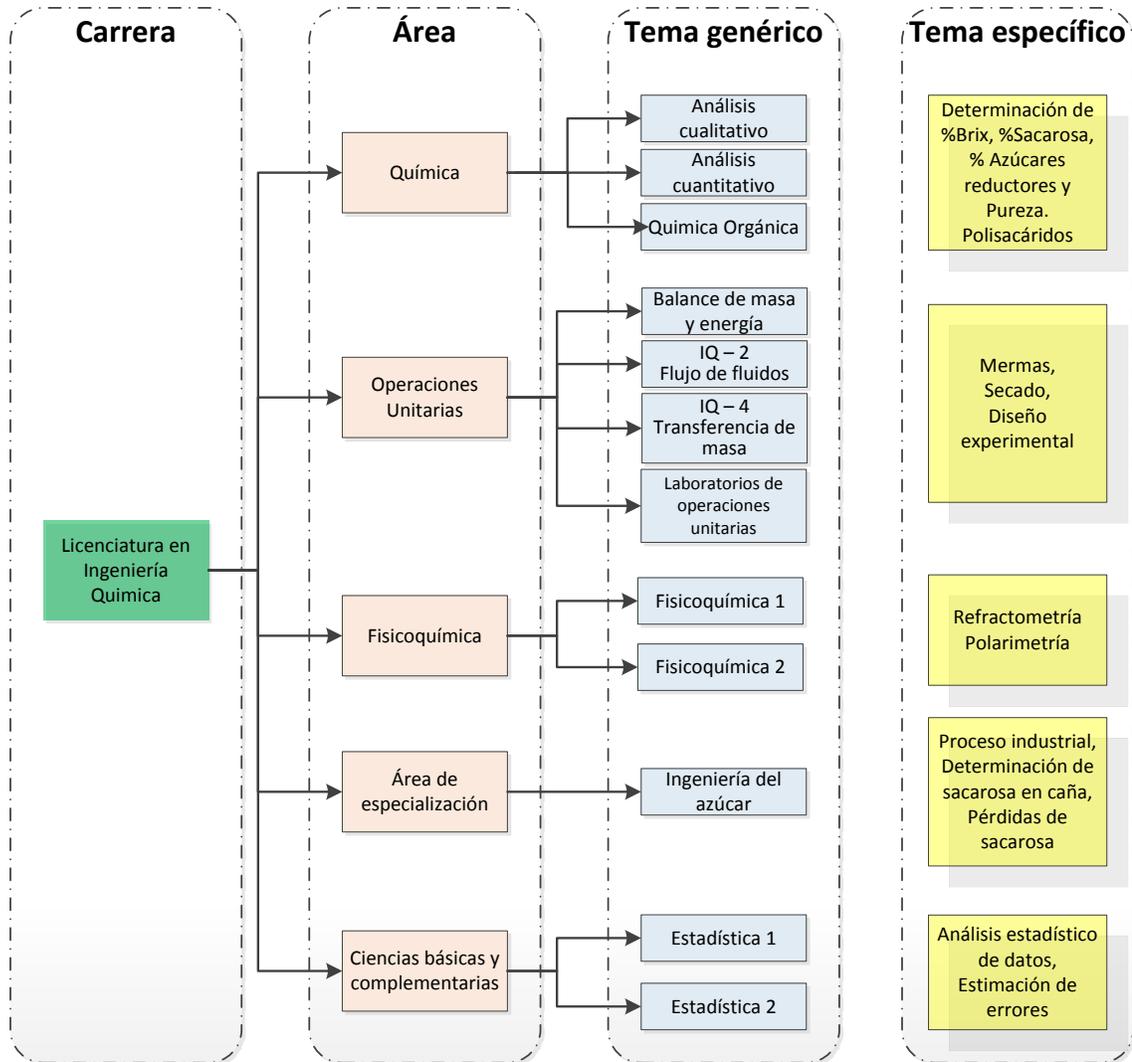
ID	Valores experimentales			Dato calculado $S_c = S_j (1 - 0,0,1F) (2,426 - 0,115F)$	
	Fibra en caña	S <sub>j</sub> _HPLC	Sacarosa en Caña_HPLC	Sacarosa en caña calculado	% Error absoluto
16	13,49	15,95	11,72	11,86	0,012
17	13,63	14,87	10,57	10,83	0,025
18	13,68	18,54	14,41	13,40	0,070
19	13,68	16,77	11,41	12,12	0,062
20	13,43	16,14	12,38	12,11	0,022
21	12,96	15,21	12,26	12,20	0,005
22	12,92	12,64	10,09	10,20	0,010
23	13,06	15,96	12,48	12,63	0,011
24	12,86	16,42	12,88	13,36	0,037
25	13,81	16,21	10,69	11,49	0,074
				<b>Error promedio</b>	<b>0,034</b>

Fuente: elaboración propia.



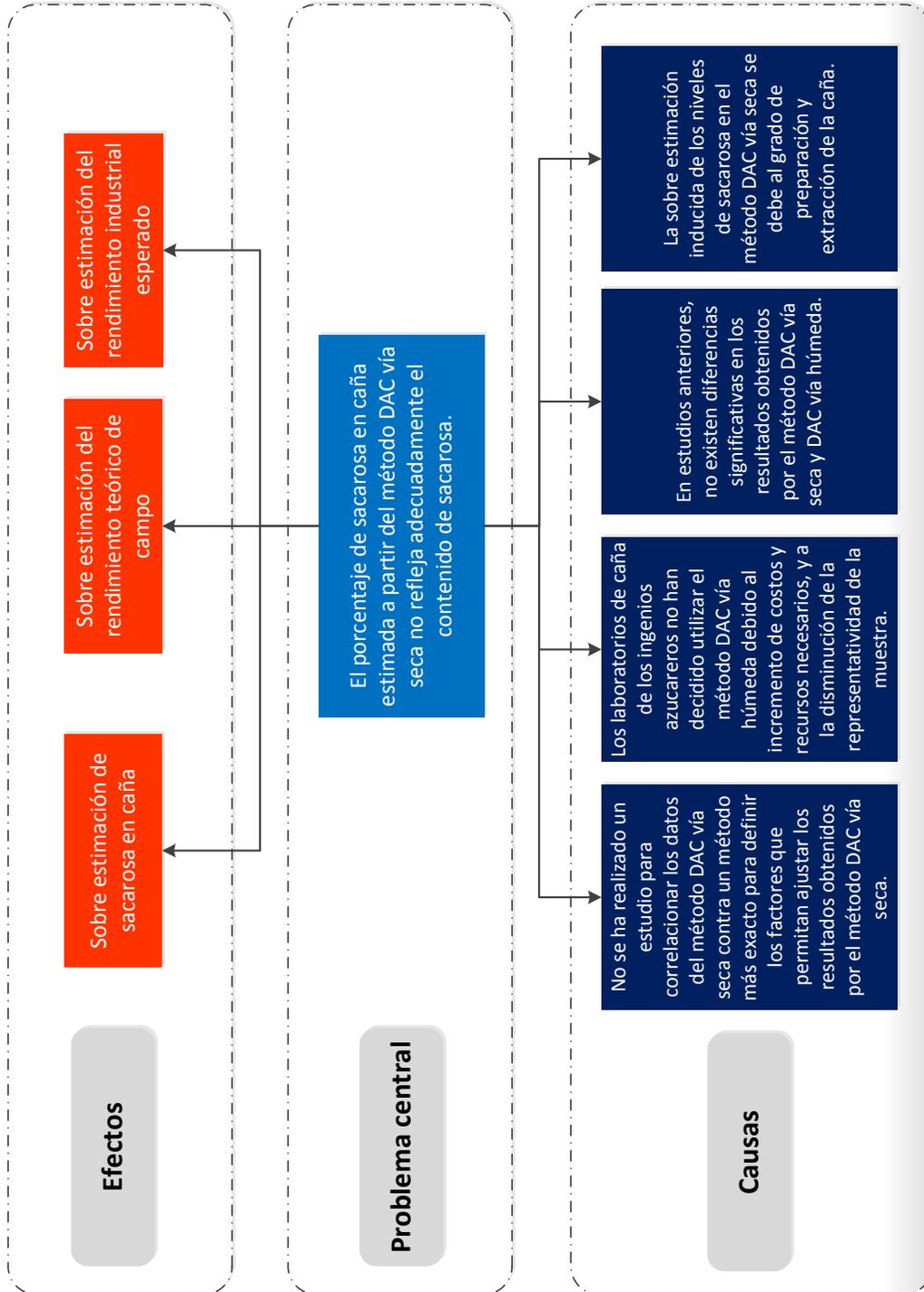
# ANEXOS

## Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

## Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.